

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

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

**КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Утверждено редакционно-
издательским советом
института в качестве
методических указаний
к курсовому проектированию
по курсу "Конструкции
технологии микросхем"

Куйбышев 1983

УДК 621.382 /075/

В методических указаниях изложены конструктивно-технологические особенности и основные рекомендации по выбору материалов и расчету пленочных элементов в гибридных интегральных микросхемах.

Указания предназначены для студентов специальности 0705 "Конструирование и производство радиоаппаратуры" и могут быть использованы при выполнении курсового и дипломного проектов.

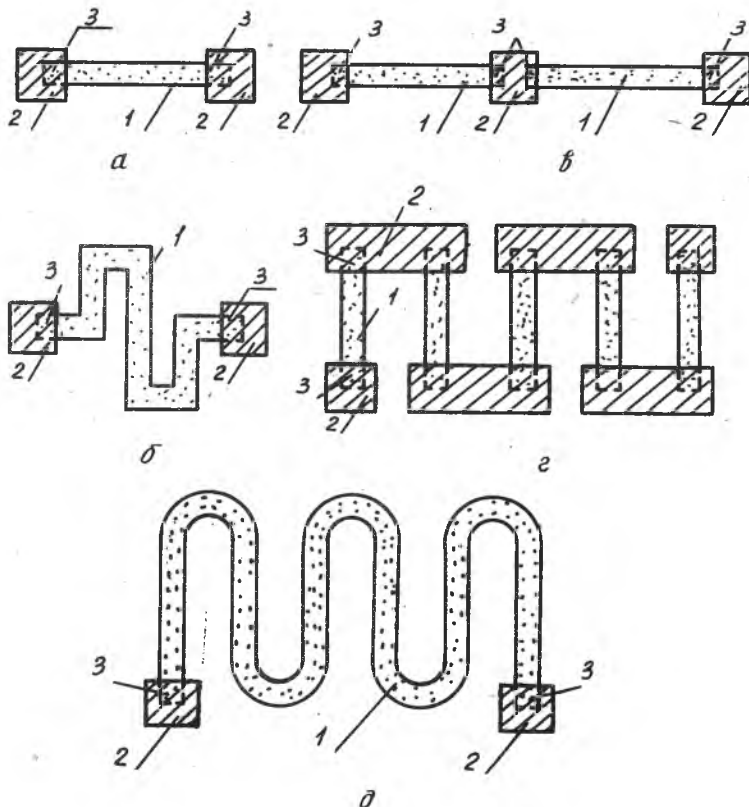
Составители: А.И.Меркулов, В.Д.Дмитриев, Т.С.Калугина

Рецензенты: Ю.В.Федотов, Е.Г.Гусева

1. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

1.1. Конструктивно-технологические особенности

Резисторы являются наиболее распространенными элементами пленочных микросхем. Резистивные элементы гибридных микросхем получают напылением на диэлектрическое основание (подложку) узких резистивных пленочных полосок 1 (рис.1.1) различной конфигурации и контактных площадок 2, имеющих с ними некоторую зону перекрытия 3.



Р и с. 1.1. Конструктивные формы пленочных резисторов:
а - прямоугольная; б- типа "меандр"; в, г-последовательное
соединение резистивных пленочных полосок; д-типа "змейка"

Конструкция пленочных резисторов должна учитывать особенности топологической структуры пленочного функционального узла (размеры подложки, количество и расположение выводов и т.д.), величину номинала, характеристики используемых материалов, технологию производства, требуемую и возможную точность воспроизведения номинала, условия эксплуатации микросхемы.

Наилучшими конфигурациями пленочных резисторов признаны прямоугольная и типа "меандр". В тех случаях, когда необходимо изготавливать высокоомные резисторы, предпочтительной является конструкция из нескольких последовательно соединенных резистивных полосок прямоугольной формы (рис. I.1, в, г). Такая конфигурация обеспечивает высокую механическую жесткость масок и плотное прилегание их к подложкам.

Электрические характеристики и величина номинала зависят от конструкции резистора, материалов подложки, резистивной пленки и контактных площадок, а также в большой степени от технологии изготовления. Наиболее распространенным в настоящее время является метод термического нанесения тонких резистивных пленок в вакууме. Применяют также катодное и ионно-плазменное распыление, осаждение из газовой и паровой фазы.

Широкий диапазон изменения номиналов резисторов, используемых в пленочных микросхемах, вызывает необходимость применять материалы резистивных пленок с различными удельными поверхностными сопротивлениями. Разнообразие предъявляемых требований ограничивает количество материалов, пригодных для изготовления резистивных пленок. Основные электрофизические характеристики наиболее распространенных материалов, используемых для производства пленочных резисторов методом термического вакуумного нанесения, приведены в табл. I.1.

При выборе толщины резистивной пленки (или значения ρR_0) следует помнить, что сопротивление и ТКС тонких (100–300 Å) пленок сильно зависят от толщины.

Каждый резистор, кроме резистивной пленки, содержит контактные площадки. Конструкция и техпроцесс изготовления контактных площадок должны обеспечивать минимальное переходное сопротивление между резистивной пленкой и контактами, хорошую адгезию контактной площадки к подложке, равномерное распределение линий тока.

Перечисленным требованиям лучше всего удовлетворяют многослойные контактные площадки. В качестве первого слоя, называемого

Электrofизические характеристики материалов для пленочных резисторов

Материал	$R_a, \text{ Ом}/\square$	$R_b, \text{ Ом}/\square$	$\alpha_R 10^{-4} / \text{град}$		ЕДС шумов при $D = 2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ $\text{мкВ}/\text{Вн} \cdot \text{г} \cdot \text{д}^{-1/2}$	Интенсивность от казов, дБ , $1/4$	Старение за 100ч при $D = 2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ $t = 60^\circ \text{C}$	Старение за 5000ч в норм. условиях
			$(-60 - +25^\circ \text{C})$	$(+25 - +125^\circ \text{C})$				
Хром ХО, ГОСТ 5905-67	200- 500	2,0	+ 1,8 + 0,6		$1 \cdot 10^{-3}$ $10,0 \cdot 10^{-3}$	2,6-3,1	1,6-3,2	2,0
Нихром Х20Н80 ГОСТ 12766-67	100- 300	1,0	-0,4 - +0,1 -0,1 - -0,4	-0,9 - 0,2 -3,1 - +0,1	$5 \cdot 10^{-3}$	-	1,1-1,3	0,1-0,4
Сплав МЛТ-3М БКО.028.005ТУ	300+ 500	2,0	$\pm(1,2 - 1,8)$ $\pm(1,9 - 2,4)$		$5 \cdot 10^{-3}$	1,8	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$
Кермет SiO-C ₂ ЕТО.021.013ТУ	500- 3000	2,0	3 + 7	0,5 - 2	-	0,9	$\pm 1,0$	$\pm 0,3$
Тантал СВС.021.041ТУ	300+ 500	2,0	- 1,5 - 2,8		-	-	-	2,6-3,2
Алюминий А-99 ГОСТ 61-32-63	0,1-0,2 1,0	1,0	0,24		-	-	-	-
Сплавы МСС-3	100- 500	2,0	$\pm(1,2 - 2,4)$		0,15	-	-	$\pm 0,1$
Сплавы: РС-4800 РС-3710 РС-3001 РС-1001 ЕТО.021.048ТУ	300-1000 500-3000 500-1500 10т-40т	2,0	2,0 0,5 - 2,0 10,0		-	-	-	2,0 2,0 1,0

подслоем, способного образовывать прочное сцепление с подложкой и последующими слоями, используются тонкие (100–200 Å) металлические пленки, чаще всего пленки хрома, никрома или марганца.

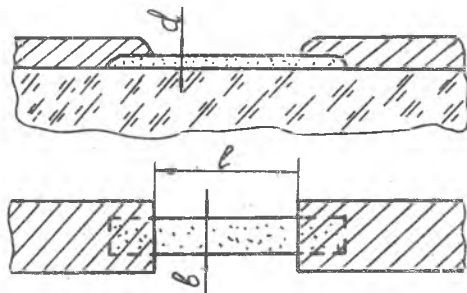
Основной слой контактной площадки напыляется из материала с высокой проводимостью (алюминий, медь, золото) на подслои и имеет толщину в несколько тысяч ангстрем. Для предотвращения окисления поверхности основного слоя на него наносят защитный слой.

Выбор подслоя, слоя и защитного слоя зависит от используемого материала резистивной пленки. Электрофизические характеристики пленочных контактных площадок и проводников представлены в табл. I.2. Размеры и форма контактных площадок выбираются с учетом используемого метода контактирования и плотности тока через резистор.

I.2. Проектирование и расчет резисторов

а) Расчет линейных резисторов

Линейными называют резисторы прямоугольной формы (рис. I.2).



Р и с. I.2. Размеры пленочного резистора прямоугольной формы

Исходными данными для расчета прямоугольных резисторов являются:

номинальная величина сопротивления резисторов R , Ом;

допустимая относительная погрешность сопротивления

резистора δ_R , %;

мощность, рассеиваемая резистором P , Вт;

коэффициент рассеиваемой резистором мощности P и номинальной мощности $P_{ном}$ (выбирается в пределах 0,5–0,8);

Т а б л и ц а I.2

Электрофизические характеристики пленочных контактных площадок и проводников

Название слоя	М а т е р и а л	Толщина, Нм	R_{Ω} , Ом/	Рекомендуемый способ контактирования
Слой	Алюминий А-99	300 - 600	0,08 - 0,16	пайка
Подслои	Нихром Х20Н80 (Хром Х0)	10 - 30		
Слой	Алюминий А-99	300 - 600	0,08 - 0,16	пайка, сварка
Подслои	Нихром Х20Н80 (Хром Х0)	40 - 50		
Слой	Алюминий А-99	250 - 350	0,1 - 0,2	пайка, сварка
Покрытие	Никель	50		
Подслои	Нихром Х20Н80 (Хром Х0)	10 - 30		
Слой	Медь МВ	600 - 800	0,02 - 0,04	сварка
Покрытие	Никель	80 - 120		
Подслои	Нихром Х20Н80 (Хром Х0)	10 - 30		
Слой	Медь МВ	400 - 1000	0,02 - 0,04	пайка, сварка
Покрытие	Серебро Ср 999,9	80 - 100		
Подслои	Нихром Х20Н80	10 - 30		
Слой	Медь МВ	600 - 800	0,02 - 0,04	пайка, сварка
Покрытие	Золото Зл 999,9	50 - 60		
Подслои	Нихром Х20Н80 (Хром Х0)	10 - 30		
Слой	Золото Зл. 999,9	600 - 800	0,03 - 0,04	пайка, сварка

минимальная допустимая ширина пленочного резистора, определяемая производственными возможностями изготовителя, мкм; при использовании биметаллических масок $\delta'_{\text{мин}} = 200$ мкм;

абсолютные производственные погрешности геометрических размеров резистора Δl и $\Delta \delta$, мм;

погрешность установки и совмещения масок $\Delta \delta_y$, мм;

удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки

R_0 , Ом;

максимально допустимая удельная мощность рассеяния P_0 , Вт/см²;

максимальная температура окружающей среды $t_{\text{макс}}$, °С;

предполагаемая длительность работы микросхемы T , ч;

температурный коэффициент сопротивления резистора α_R ,

1/град;

удельное переходное сопротивление контактов ρ_K , Ом.см² (зависит от условий напыления).

Сопротивление резистора прямоугольной формы рассчитывается по формуле

$$R = R_0 K_{\text{ф}}, \quad (\text{I.1})$$

где $K_{\text{ф}} = \frac{l}{\delta}$ - коэффициент формы резистора.

Точность номинала пленочного резистора зависит от большого количества факторов. Относительная погрешность $\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$ сопротивления пленочного резистора выражается следующей зависимостью:

$$\delta_R = \delta_{R_0} + \delta_{K_{\text{ф}}} + \delta_{R_t} + \delta_{R_{\text{см}}} + \delta_{R_K}, \quad (\text{I.2})$$

где $\delta_{R_0} = \frac{\Delta R_0}{R_0}$ - относительная погрешность удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки;

$\delta_{K_{\text{ф}}} = \frac{\Delta K_{\text{ф}}}{K_{\text{ф}}}$ - относительная погрешность коэффициента формы; здесь $\delta_{K_{\text{ф}}} = \delta_l + \delta_{\delta}$, $\delta_l = \frac{\Delta l}{l}$ - относительная погрешность длины пленочного резистора, $\delta_{\delta} = \frac{\Delta \delta}{\delta}$ - относительная погрешность ширины пленочного резистора;

δ_{R_t} - относительная температурная погрешность сопротивления,

$$\delta_{R_t} = \alpha_R (t - 20^{\circ}\text{C});$$

$\delta_{R_{\text{см}}}$ - относительное изменение сопротивления резистора в процессе старения (см. табл. I.1);

\mathcal{F}_{R_k} - относительная погрешность сопротивления, обусловленная образованием переходных сопротивлений R_k .

$$\mathcal{F}_{R_k} = \frac{2R_k}{R}. \text{ Обычно величина } R_k \text{ составляет } 1 - 3 \%.$$

Анализ формулы (I.2) показывает, что при заданной (допустимой) величине относительной погрешности резистора $\mathcal{F}_{R_{\text{доп}}}$ конструктор проще всего обеспечит необходимую точность резистора, варьируя величину коэффициента \mathcal{K}_Φ . Варьирование любого из оставшихся слагаемых правой части равенства (I.2) ведет к необходимости изменения технологического процесса изготовления резисторов или к необходимости применения другого материала. При этом происходит трудно контролируемое изменение всех, кроме \mathcal{K}_Φ , коэффициентов.

Допустимая относительная погрешность коэффициента формы оценивается по формуле

$$\mathcal{F}_{\mathcal{K}_\Phi \text{ доп}} = \mathcal{F}_{R_{\text{доп}}} - \mathcal{F}_{R_0} - \mathcal{F}_{R_t} - \mathcal{F}_{R_{\text{см}}} - \mathcal{F}_{R_k}. \quad (\text{I.3})$$

Учитывая, что $\mathcal{K}_\Phi = \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta \delta}{\delta}$, можно получить выражения для расчета минимальных размеров резистора:

$$\delta''_{\text{мин}} = \frac{\Delta \delta + \frac{\Delta \ell}{\mathcal{K}_\Phi}}{\mathcal{F}_{\mathcal{K}_\Phi \text{ доп}}};$$

$$\ell''_{\text{мин}} = \frac{\Delta \ell + \Delta \delta \mathcal{K}_\Phi}{\mathcal{F}_{\mathcal{K}_\Phi \text{ доп}}}.$$

Величина \mathcal{K}_Φ определяется из выражения (I.1).

Минимальные размеры пленочного резистора определяются не только требованием к его точности. От размеров резистора зависит рассеиваемая им мощность. Поэтому размеры должны быть такими, чтобы при работе пленочной микросхемы действительная удельная мощность рассеяния $P_{\text{одв}}^{\text{дв}} / \text{см}^2$ не превосходила предельную удельную мощность P_0 , которая является характеристикой материала пленки и определяется экспериментально. Для наиболее часто применяемых материалов значения удельной мощности приведены в табл. I.1. Из условия рассеяния всей мощности, выделяющейся в пленочном резисторе, его размеры определяются по формулам

$$\delta''_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{P R_0}{P_0 R}};$$

$$\ell_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{\rho R}{\rho_0 R_0}}$$

Ширина пленочного резистора, таким образом, должна выбираться наибольшей из трех величин δ' , δ'' и δ''' .

Длина резистора ℓ находится по формуле

$$\ell = \delta K_{\varphi}$$

Расчет пленочных резисторов начинают с выбора материала и R_0 , затем определяют K_{φ} , величину $\delta_{K_{\varphi}}$ [по формуле (1.3)], величину δ и величину ℓ . Если $\ell > 10$ мм, то резистор необходимо выполнять в виде "меандра" или "змейки". Нецелесообразно принимать значения $K_{\varphi} < 1$, так как при этом понижается точность изготовления резистора, увеличивается площадь контактных переходов и электрическое поле в переходе может быть неоднородным.

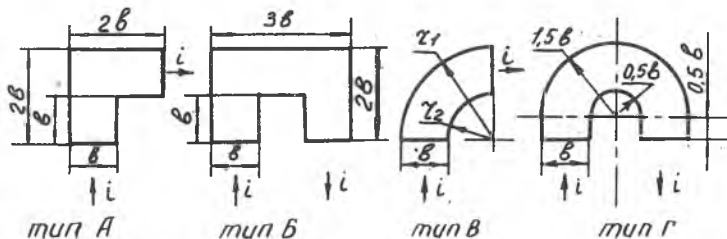
В заключение определяется площадь, занимаемая резистором на подложке (без учета площади контактных переходов)

$$S = \ell \delta$$

б) Расчет резисторов сложной формы

Установлено, что электрическое поле в резисторах сложной формы ("меандры" "змейка" и т.д.) неравномерно. Наибольшего значения градиент плотности тока достигает в местах излома или изгиба резистивной пленки. Неравномерность электрического поля приводит к сокращению электрической длины пленочного резистора, что сопровождается уменьшением его сопротивления. В связи с этим расчет сопротивления резисторов сложной формы по длине геометрической средней линии является неточным. Сопротивление изогнутых участков пленочных резисторов можно выразить в виде произведения некоторого коэффициента на величину поверхностного сопротивления резистивной пленки R_0 .

Для расчета сопротивления резисторов сложной формы (например изображенных на рис. 1.1, б, д) резистивная полоска условно разбивается на элементы сопряжения типа изображенных на рис. 1.3 и участки прямолинейной формы. Сопротивление элементов сопряжения рассчитывается по следующим формулам:



Р и с. I.3. Элементы сопряжения

$$R = 2,55 R_0 \quad (\text{тип } A);$$

$$R = 4 R_0 \quad (\text{тип } B);$$

$$R = \frac{1,57}{\ln \frac{r_1}{r_2}} R_0 \quad (\text{тип } B);$$

$$R = 3,86 R_0 \quad (\text{тип } \Gamma).$$

Общее сопротивление резистора определяется как сумма сопротивлений всех элементов сопряжения и сопротивления участков прямоугольной формы.

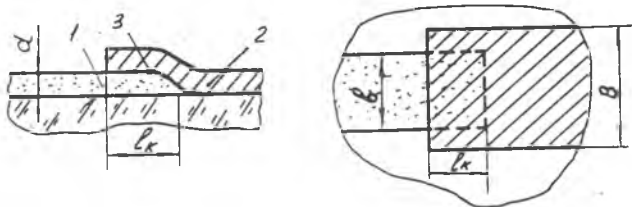
I.3. Расчет сопротивления контактных переходов

Эквивалентное сопротивление контактного перехода, образованного резистивной и низкоомной пленками, зависит от геометрических размеров контакта, проводимости резистивной пленки и от величины удельного переходного сопротивления ρ_K .

Под удельным переходным сопротивлением ρ_K понимают сопротивление единицы площади контактного слоя Z (рис. I.4) току, протекающему по нормали к слоям контакта.

Удельное переходное сопротивление ρ_K , определяемое экспериментально для каждой вакуумной установки, для многопозиционных установок, в которых напыление резистивных пленок и контак-

ных площадок производится без сьема вакуума, равно $0,05-0,25 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$.



Р и с. 1.4. Контактный переход пленочного резистора
1 - резистивная пленка; 2 - проводящая пленка; 3 -
контактный переход

Если при изготовлении микросхемы используют несколько установок, каждая из которых приспособлена для напыления тонких пленок из одного материала, то при перестановке подложек с одной установки на другую пленки, нанесенные на них, подвергаются воздействию атмосферы. Удельное переходное сопротивление в этом случае увеличивается ($\rho_k = 2,5 - 5,0 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2$), и соответственно возрастает эквивалентное сопротивление контактного перехода.

Наименьшее возможное значение переходного сопротивления при известных физических свойствах контактирующих пленок (R_0 и ρ_k) и известной ширине перекрытия определяется по формуле

$$R_{k \text{ мин}} = \frac{\sqrt{R_0 \rho_k}}{b}$$

Длина перекрытия пленок, при которой превышение сопротивления переходного контакта по сравнению с $R_{k \text{ мин}}$ составляет не более 10%, выражается соотношением

$$l_{\text{мин}} \geq 1,5 \sqrt{\frac{\rho_k}{R_0}}$$

В тех случаях, когда длина переходного контакта по топологическим соображениям оказывается меньше $l_{\text{мин}}$, для точного расчета переходного сопротивления следует ввести коэффициент μ :

$$R_k = R_{k \text{ мин}} \mu,$$

где
$$\mu = \frac{1}{th\left(\ell\sqrt{\frac{R_a}{\rho_k}}\right)} .$$

Полная длина контактного перехода ℓ_k и ширина пленки проводника B определяются с учетом погрешностей изготовления масок $\Delta\ell$ и Δb , установки и совмещения их с подложкой $\Delta\ell_y$:

$$\ell_k \geq \ell_{k\text{мин}} + \Delta\ell + \Delta\ell_y ;$$

$$B \geq b + 2(\Delta b + \Delta\ell_y) .$$

1.4. Расчет резисторов повышенной точности

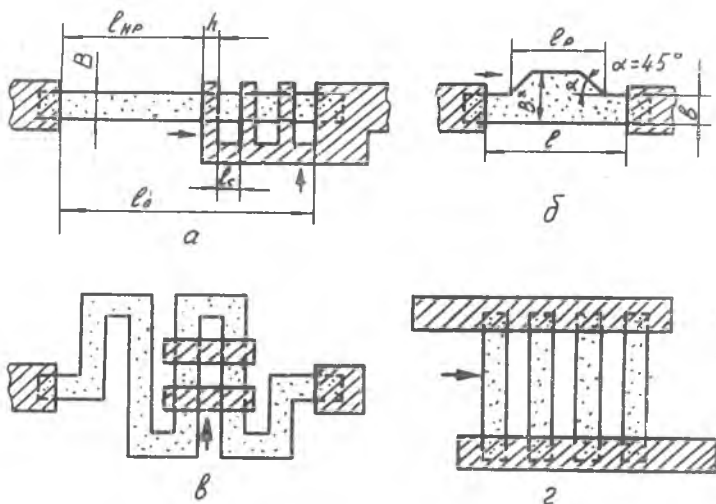
Схемное назначение некоторых резисторов требует высокой точности их изготовления, превосходящей технологические возможности современного оборудования для напыления микросхем. В таких случаях при конструировании микросхем применяют специальные пленочные резисторы, сопротивление которых можно изменять после изготовления. Подгонка величины сопротивления может производиться либо скачками - путем удаления заранее предусмотренных шунтирующих перемычек из проводящей или резистивной пленки, либо плавно - путем постепенного удаления части резистивной пленки. В обоих случаях изменять сопротивление можно лишь в сторону его увеличения.

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

Некоторые конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов приведены на рис.1.5. Наибольшее распространение получили конструктивные формы, изображенные на рис.1.5, а, б.

а) Расчет резисторов со ступенчатой подгонкой

Рассмотрим конструктивный расчет резисторов со ступенчатой подгонкой (см.рис.1.5, а). Участок подгонки резистора представляет собой n последовательно включенных секций, закороченных при



Р и с. I.5. Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

напылении низкоомной пленкой. Если величина сопротивления резистора при напылении получилась меньше значения, соответствующего нижней границе допуска, подгонка осуществляется последовательным подключением одной или нескольких секций к основному участку резистивной пленки.

По заданному номиналу пленочного резистора R и относительному допуску δ_R , за пределы которого сопротивление не должно выходить за все время эксплуатации микросхемы в условиях повышенной температуры, определяем максимальное и минимальное значения сопротивления:

$$R_{\max} = R \left(1 + \frac{\delta_R - \delta_{R_t} - \delta_{R_{cm}}}{100} \right); \quad (I.4)$$

$$R_{\min} = R \left(1 - \frac{\delta_R - \delta_{R_t} - \delta_{R_{cm}}}{100} \right). \quad (I.5)$$

Значения сопротивлений, определяемые выражениями (I.4) и (I.5), являются границами диапазона подгонки. При вычислении R_{\max} и R_{\min} подразумевалось, что коэффициенты δ_{R_t} и $\delta_{R_{ст}}$ могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Для того чтобы при подгонке не "перескочить" через поле допуска, необходимо, чтобы шаг подгонки, равный сопротивлению одной секции, был не больше величины $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$.

Точность настройки может быть выше, если шаг подгонки будет меньше этой величины.

Минимальное число n секций подгонки определяется по формуле

$$n = \frac{\delta_{R_0} + \delta_{K\Phi}}{\delta_R'}$$

где $\delta_R' = \frac{\Delta R}{R}$.

Определим теперь длину нерегулируемого участка резистора $l_{н.р.}$ и длину одной секции подгонки l_c . При заданных значениях R_0 , δ и R величину $l_{н.р.}$ следует выбирать такой, чтобы она соответствовала наибольшему допустимому значению сопротивления при наибольшем R_0 и наименьшем значении ширины резистора δ :

$$l_{н.р.} = \frac{R_{\max} \delta_{\min}}{R_{0\max}} - \Delta l,$$

где $\delta_{\min} = \delta - \Delta \delta$; $R_{0\max} = R_0 \left(1 + \frac{\delta_{R_0}}{100}\right)$.

Затем определяется наименьшее возможное сопротивление резистора, т.е. сопротивление нерегулируемого участка резистора при наименьшем значении R_0 и наибольшем значении ширины резистора δ :

$$R_{\min.возм} = \frac{R_{0\min} \delta_{н.р.}}{\delta_{\max}},$$

где $\delta_{\max} = \delta + \Delta \delta$; $R_{0\min} = R_0 \left(1 - \frac{\delta_{R_0}}{100}\right)$.

Если полученное значение $R_{\min.возм}$ выходит за пределы допуска, т.е. если $R_{\min.возм} < R_{\min}$, то необходимо предусмотреть регулируемый участок, подключение которого могло бы компенсировать технологические погрешности и довести величину сопротивления до минимального допустимого значения.

Общая длина резистора с учетом длин нерегулируемого и регулируемого участков определяется по минимально допустимому

значению сопротивления при $R_{\text{мин}}$ и $\vartheta_{\text{макс}}$:

$$\ell = \ell_{\text{н.р.}} + \ell_p + \Delta\ell(n+1) = \frac{R_{\text{мин}} \vartheta_{\text{макс}}}{R_{\text{о.мин}}} + \Delta\ell(n+1).$$

Длина одной секции подгонки равна

$$\ell_c = \frac{\ell - \ell_{\text{н.р.}}}{n}.$$

Далее необходимо выбрать ширину перемычки h , учитывая технологические возможности изготовления масок и стремясь при этом получить минимальное значение R_k .

Обычно $h = 0,2 - 0,5$ мм.

Длина резистора с учетом перемычек равна

$$\ell_o = \ell + nh.$$

б) Расчет резисторов с плавной подгонкой

Плавная подгонка применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить узкий допуск на сопротивление резистора. Точность плавной подгонки достигает долей процента. Наиболее приемлемая конструкция резистора с плавной подгонкой изображена на рис. I.5, б.

Ширина регулируемого участка ϑ^* выбирается из следующих соображений: при малых значениях ϑ^* мал диапазон регулировки, при больших значениях ϑ^* увеличивается площадь регулировочной секции и снижается эффективность подгонки (съем одинаковой площади резистивной пленки отражается на изменении сопротивления при больших ϑ^* меньше, чем при малых).

Углы расширения подстраиваемого участка рекомендуется выбирать в пределах $40-50^\circ$. Увеличение угла расширения приводит к резкой концентрации плотности тока в местах перехода от узкого участка к широкому. Малые углы расширения резистивной пленки на регулируемом участке сужают диапазон регулировки.

Исходными данными для расчета точных подгоняемых резисторов являются:

- номинальное сопротивление R и допуск \mathcal{J}_R , %.
- сопротивление квадрата пленки R_o и допуск \mathcal{J}_{R_o} , %.
- ширина резистора ϑ и допуск $\Delta\vartheta$, мм.

Погрешностью длины и базировки пренебрегаем, так как в этом случае они слабо влияют на точность изготовления резисторов.

Так как изменение сопротивления при плавной подгонке возможно лишь в сторону его увеличения, предельные размеры резистора необходимо устанавливать, исходя из наименьшего допустимого значения сопротивления. При этом длина резистора определяется по формуле

$$l = R_{\text{мин}} \frac{b_{\text{макс}}}{R_{0\text{мин}}},$$

из которой видно, что даже при сочетании $b_{\text{макс}}$ $R_{0\text{мин}}$ путем подгонки можно достичь нижней границы допуска.

Если же в процессе изготовления резистора величина b примет минимальное, а R_0 - максимальное значение, то сопротивление определяется по формуле

$$R_{\text{макс.возм}} = R_{0\text{макс}} \frac{l}{b_{\text{мин}}}.$$

Если окажется, что $R_{\text{макс.возм}} > R_{\text{макс}}$, необходимо предусмотреть регулируемую секцию, наличие которой позволило бы уменьшить величину $R_{\text{макс.возм}}$ до $R_{\text{макс}}$.

Следует заметить, что при изготовлении точных резисторов необходимо выбирать материал и режимы техпроцесса изготовления такими, чтобы выполнялось неравенство

$$\delta_{R_t} + \delta_{R_{\text{ст}}} \leq \delta_R,$$

в противном случае никакая подгонка не поможет. Номинал резистора будет уходить за пределы допуска под действием температуры окружающей среды и старения.

Расчет размеров регулируемой секции производится следующим образом:

1. Вычисляется отношение $\frac{R_{\text{макс.возм}}}{R_{\text{макс}}}$ и по графикам рис. I.6, а на его основании выбираются (из конструктивно-технологических соображений) отношения $R_{\text{макс}}^*/R_{\text{мин}}^*$ и $R_{\text{н.р}}/R_{\text{макс}}^*$. Здесь $R_{\text{н.р}}$ - сопротивление нерегулируемого участка резистора, $R_{\text{макс}}^*$ и $R_{\text{мин}}^*$ - максимальное и минимальное сопротивления участка резистора, на котором есть подстраиваемая секция. $R_{\text{макс}}^*$ соответствует сопротивлению этого участка при полностью удаленной подстроечной секции. Необходимая степень подгонки может быть обеспечена при различных отношениях $R_{\text{макс}}^*/R_{\text{мин}}^*$ и $R_{\text{н.р}}/R_{\text{макс}}^*$. Нетрудно заметить, что

$$\frac{R_{\text{н.р}}}{R_{\text{макс}}^*} = \frac{l_{\text{н.р}}}{l_p},$$

откуда, учитывая, что $l_{н,р} + l_p = l$, получаем:

$$l_p = \frac{l}{1 + R_{н,р}/R_{макс}^*} \quad (I.6)$$

2. В зависимости от выбранного отношения $R_{макс}^*/R_{мин}^*$ и отношения l_p/δ , которое можно получить, определив из выражения (I.6) величину l_p , по графикам рис. I.6, б находится отношение δ^*/δ и вычисляется δ^* - ширина подстраиваемого участка резистора.

I.5. Оценка сопротивления и индуктивности пленочных проводников

В связи с малой толщиной пленок коммутационные проводники в микросхемах имеют значительное активное сопротивление, пренебрегать которым можно далеко не во всех случаях. На высоких частотах возрастает реактивное сопротивление проводников. Индуктивность соединительных проводников микросхем (как пленочных, так и проволочных) необходимо учитывать уже при рабочей частоте 60-100 МГц. На этих и более высоких частотах величина индуктивности соединительных проводников микросхемы становится соизмеримой с величиной индуктивности контурных катушек, а модуль их полного сопротивления - с сопротивлением $Z_{б}$ транзистора.

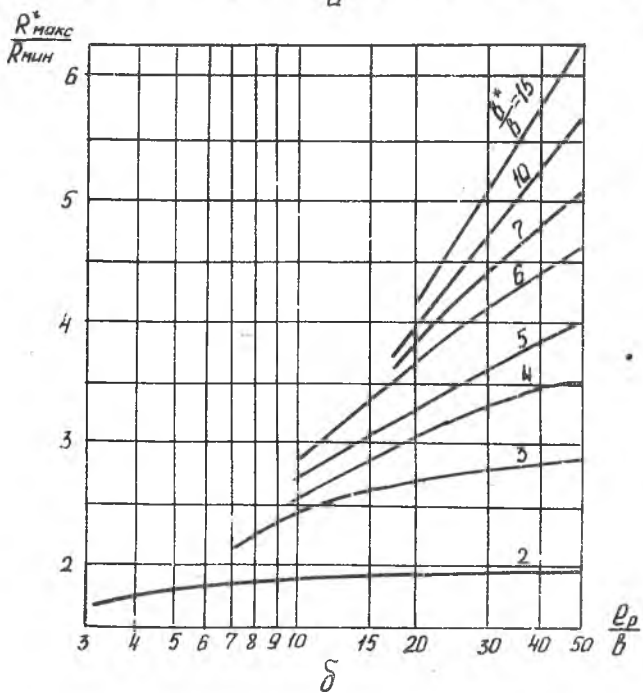
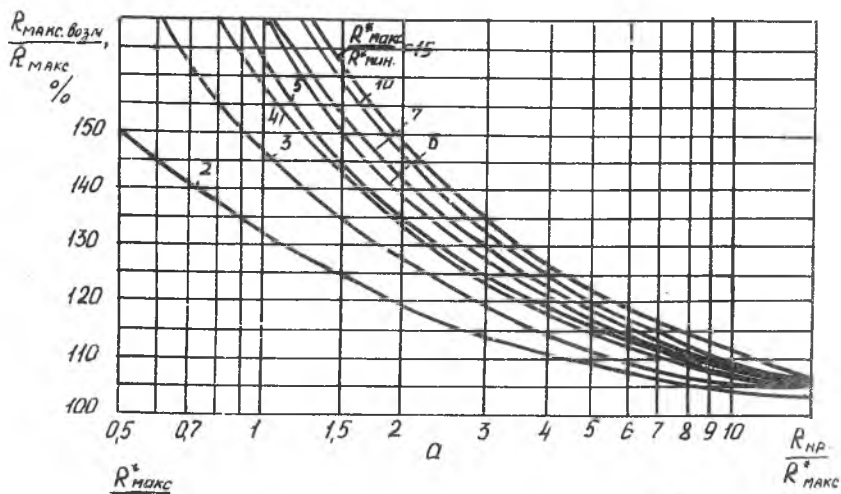
У пленочных проводников, имеющих относительно большое сопротивление на постоянном токе, на высоких частотах комплексное сопротивление еще больше увеличивается за счет того, что толщина пленки намного меньше глубины проникновения поля (толщины скин-эффекта). В этом случае несколько увеличивается индуктивность проводника.

Индуктивность пленочного проводника может быть определена по следующей формуле:

$$L = 2l \left(1,35 + 2,3 \lg 2K_{\phi} + \frac{0,2235}{K_{\phi}} \right) 10^{-4} \text{ мкГн,}$$

где $K_{\phi} = \frac{l}{\delta}$ - длина проводника, мм.
 l - коэффициент формы проводника.

Некоторые параметры соединительных проводников гибридных микросхем, определенные экспериментально, приведены в табл. I.3 и I.4.



Р и с. 1.6. Графики для расчета точных подгоняемых резисторов

Таблица 1.3

Индуктивности и сопротивления пленочных проводников
из алюминия на ВЧ ($R_0 = 0,1 \text{ Ом}$)

l , мм	b , мм	f , МГц	L , мкГн	R_f , Ом	R_0 , Ом
11	1,2	107	0,008	1,0	0,9
15	1,5	105	0,01	1,25	1,0

Таблица 1.4

Индуктивности и сопротивления проволоочных проводников
микросхем на ВЧ

Материал	ϕ , мм	l , мм	f , МГц	L , мкГн	R_f , Ом
Медь	0,1	10	110	0,011	0,37
		30	78	0,031	0,45
Серебро	0,05	10	107	0,012	0,39
		38	70	0,043	0,65
Золото	0,05	10	107	0,012	0,41
		36	70	0,044	0,76
Золотс	0,1	10	107	0,01	0,27
		30	61	0,029	0,39

В таблицах приняты следующие обозначения:

f - частота, на которой производилось измерение комплексного сопротивления;

R_f - комплексное сопротивление на частоте измерения;

R_0 - сопротивление проводника, измеренное на постоянном токе.

1.6. Частотные свойства пленочных резисторов

Если резистор предназначен для работы в цепях высокой частоты, необходимо произвести оценку его частотных свойств, так как сопротивление в этом случае нельзя рассматривать как чисто активное. Реактивная составляющая сопротивления резистора появ-

ляется в связи с наличием распределенной емкости, собственной индуктивности и потерь в материале подложки.

Относительное изменение сопротивления на высокой частоте можно определить по формуле

$$\frac{|R_f|}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_0 C_{np})^2}},$$

где $|R_f|$ - модуль сопротивления резистора на частоте f ;
 ω - круговая частота;
 C_{np} - приведенная емкость, действие которой эквивалентно совместным действиям распределенной емкости и сопротивления потерь:

$$C_{np} \approx 0,3 - 0,5 \text{ пФ.}$$

Резистор считается частотно-независимым, если на рабочей частоте его полное сопротивление отличается от сопротивления постоянному току не более чем на 0,5%. Условия частотной независимости для резисторов имеют вид:

а) для высокоомных

$$f_{\text{макс}} \leq \frac{0,1}{R_0 C_{np}};$$

б) для низкоомных

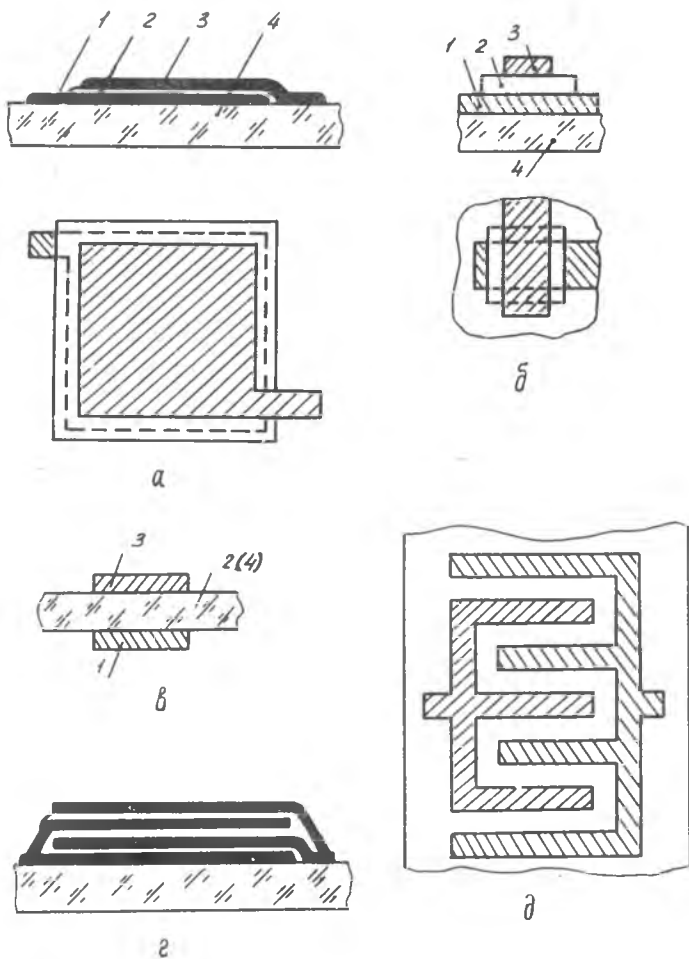
$$f_{\text{макс}} \leq \frac{R_0}{62,8L},$$

где L - собственная индуктивность резистора.

2. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

2.1. Конструктивно-технологические особенности

Конденсаторы являются широко распространенными элементами пленочных микросхем. По конструктивному признаку тонкопленочные конденсаторы (ТК) можно разделить на три группы: однослойные, многослойные и гребенчатые. Однослойными принято считать такие конденсаторы, которые состоят из двух обкладок и одного слоя диэлектрика (рис.2.1, а, б, в). Многослойные конденсаторы имеют более чем один слой диэлектрика (рис.2.1, г). Конструктивной особенностью гребенчатых конденсаторов является одностороннее расположение обкладок (рис.2.1, д).



Р и с. 2.1. Конструкции тонкопленочных конденсаторов:
 а - однослойный ТПК; б - ТПК малой емкости; в - двухсторонняя конструкция: 1 - нижняя обкладка; 2 - диэлектрик;
 3 - верхняя обкладка; 4 - подложка; г - многослойный ТПК; д - гребенчатый ТПК

Большинство характеристик ТПК зависит от выбранных материалов и технологии изготовления. Материал, применяемый для изготовления диэлектрических слоев, должен иметь хорошую адгезию к материалам подложки и обкладок, не вступать с ними в химические реакции; диэлектрическая пленка должна быть достаточно плотной, иметь высокую электрическую прочность, малые диэлектрические потери.

Лучше других этим требованиям удовлетворяют характеристики диэлектриков, приведенных в табл. 2.1.

Для обкладок ТПК наилучшим материалом является алюминий. Удельное поверхностное сопротивление алюминиевой пленки достаточно мало и при ее толщине 2500–5000 Å находится в интервале 0,2 – 0,06 Ом/квадрат. Это обеспечивает высокую добротность ТПК. Рекомендуется одновременно с изготовлением обкладок ТПК наносить и тонкопленочные проводники.

Многослойные ТПК применяют редко в связи с тем, что с ростом числа слоев увеличивается сложность технологического процесса изготовления конденсаторов, увеличивается процент брака и снижается их надежность.

Если площадь конденсатора S больше 5 мм^2 , то ТПК проектируют в виде однослойной конструкции типа изображенной на рис. 2.1, а. Если же полезная площадь конденсатора получается меньше, необходимо выбрать меньшее значение удельной емкости C . Конденсаторы с малой величиной емкости рекомендуется проектировать в виде двух пересекающихся проводящих полосок, разделенных слоем диэлектрика, или в виде "гребенки".

Желательно, чтобы все конденсаторы, расположенные на одной подложке, были изготовлены на основе одной диэлектрической пленки.

Нижняя обкладка ТПК должна выступать за край верхней не менее чем на 200 мкм, а диэлектрик – не менее чем на 200 мкм за край нижней обкладки. Для повышения точности и надежности ТПК необходимо выбирать наиболее простую форму обкладок.

2.2. Исходные данные и основные расчетные соотношения

Для расчета ТПК исходными данными являются следующие: номинальная величина емкости ТПК C , пФ; диэлектрическая проницаемость диэлектрика ϵ ;

Т а б л и ц а 2.1

Электродиффузионные характеристики материалов для пленочных конденсаторов

Материал, ТУ или ГОСТ	ε	$E_{пр},$ $\frac{В}{см} \cdot 10^6$	Цробр, В	S_0 макс, $\frac{пФ}{см^2}$	Рекомендуе- мый диапазон $\frac{пФ}{см^2}$	$t_{г\delta}$ но $f = 1 кГц$	ТКЕ ($\frac{1}{град}$) $\times 10^4$ (-65 + 85°C) макс средн.	Изменение по- раметров по в норм. испытаниях $f = 10 МГц$ $\Delta C/C, \%$	Старение в норм. испытаниях за 1000 ч
Монокись кремния, SiO БХД.028.000 ТУ	5-6	2-4	15	15000	8000	0,002 - 0,02	3,5 2,0	3-5	±(1,5-6)
Монокись германия, GeO, Е.ТД.021.014 ТУ	10-11	0,5-1,5	10-15	20000	10 000 - 12 000	0,001 - 0,005	3,0	3-5	-1,0
Трехсернистая сурьма Sb ₂ S ₃ , МРТУ6-09-2838-68	18-21	0,2-1,0	4,0	20 000	10 000 - 15 000	0,004 - 0,01	5,0	3-5	±15
Двуокись кремния SiO ₂	5	3-4	15	12 000	8000	0,002	1,0	-	-
Стекло ХГ-44	9-10	0,4	10	20 000	10 000 - 15 000	0,004 - 0,02	28,0	-	28,0
Стекло ИКС-24, РМО.1096-61	5-6	0,4	8	10 000	5 000 - 10 000	0,02	5-9	-	-

рабочее напряжение на ТПК U_p, B ;
 допустимая относительная погрешность емкости $\delta_{\text{доп}}\%$;
 удельная емкость $C_0, \text{ пФ/см}^2$;
 абсолютные производственные погрешности изготовления размеров верхней обкладки ΔL и $\Delta B, \text{ мм}$;
 погрешность установки и совмещения масок $\Delta l_y, \text{ мм}$;
 максимальная температура окружающей среды $t, ^\circ\text{C}$;
 предполагаемая длительность работы микросхемы $T, \text{ ч}$.
 В общем случае емкость C ТПК можно вычислить по формуле

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon S(n-1)}{d} = C_0 S, \quad (2.1)$$

где S - активная площадь конденсатора, равная площади перекрытия обкладок, см^2 ;
 d - толщина диэлектрического слоя, см ;
 n - число обкладок.

Формула (2.1) не учитывает дополнительной емкости, образующейся по контуру обкладок из-за краевого эффекта. Однако на точность расчетов это почти не влияет, так как краевая емкость очень мала (доли пикофарады).

Проектирование однослойных ТПК следует начинать с выбора материала диэлектрической пленки (см. табл. 2.1).

При этом необходимо учитывать номинальное значение емкости, требования к стабильности, условия эксплуатации и технологичность изготовления ТПК. Затем по формуле

$$d(\text{мкм}) \geq \frac{K_3 U_p}{E_{\text{пр}}} \quad (2.2)$$

определяется толщина диэлектрической пленки.

Здесь K_3 - коэффициент запаса электрической прочности конденсатора (для ТПК $K_3 = 2 - 4$) ;

$E_{\text{пр}}$ - электрическая прочность материала диэлектрика, В/мкм .

Практика показывает, что диэлектрические пленки толщиной 200-3000 Å и менее нередко оказываются несплошными и ТПК на их основе являются ненадежными элементами. Многие конденсаторы с такой толщиной диэлектрика после изготовления оказываются негодными из-за замыкания обкладок. В связи с этим в тех случаях, когда значение d , полученное на основании формулы (2.2), оказывается меньше 3000 Å, за расчетное значение толщины

пленки диэлектрика принимается величина $d \gg 3000 \text{ \AA}$.

Далее по формуле

$$C_0 = 0,0884 \frac{\epsilon}{d} \quad (2.3)$$

определяется значение удельной емкости.

Активную площадь и размеры верхней обкладки конденсатора можно вычислить по следующим формулам:

$$S = \frac{C}{C_0};$$
$$L_2 = \sqrt{K_{\Phi} S};$$
$$B_2 = \sqrt{\frac{S}{K_{\Phi}}}, \quad (2.4)$$

где $K_{\Phi} = \frac{L_2}{B_2}$ - коэффициент формы конденсатора. (2.5)

2.3. Расчет ТПК с учетом точностных характеристик

а) Расчет ТПК без подстроечных секций

Приведенная в п.2.2 методика расчета ТПК очень проста и удобна для ориентировочных расчетов на стадии эскизного проектирования при разработке топологии микросхемы.

Однако задача конструктора состоит не только в том, чтобы удачно расположить все элементы микросхемы, но и в том, чтобы спроектировать такую конструкцию, при изготовлении которой брак был бы минимальным, а сама конструкция удовлетворяла бы всем предъявляемым к ней требованиям в течение установленного срока работы. Поэтому конструктор с помощью различных конструктивно-технологических приемов должен обеспечить заданную точность изготовления радиоэлементов.

Точность изготовления ТПК определяется воспроизводимостью удельной емкости C_0 и размеров обкладок. На точность емкости также влияет погрешность установки масок и совмещения их с подложками Δl_y (рис.2.2).

Эту погрешность можно исключить, увеличив размеры нижней обкладки:

$$l_1 \gg l_2 + \Delta l_1 + 2 \Delta l_y; \quad (2.6)$$

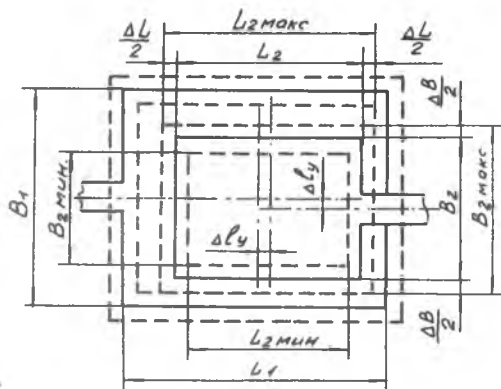
$$B_1 > B_2 + \Delta B + 2 \Delta l_y, \quad (2.7)$$

где L_1, B_1 - размеры нижней обкладки,

L_2, B_2 - размеры верхней обкладки ТПК.

Относительная погрешность емкости конденсаторов, обусловленная технологическими факторами, а также воздействием температуры окружающей среды, за время эксплуатации микросхемы определяется выражением

$$\mathcal{I}_C = \mathcal{I}_{C_0} + \mathcal{I}_S + \mathcal{I}_{C_t} + \mathcal{I}_{C_{cm}},$$



Р и с. 2.2. Одно из предельных взаимных расположений обкладок ТПК

где \mathcal{I}_{C_0} - относительная погрешность удельной емкости (зависит от воспроизводимости свойств и толщины диэлектрической пленки); обычно определяется экспериментально или задается в пределах от ± 5 до $\pm 10\%$;

\mathcal{I}_S - относительная погрешность активной площади ТПК, определяется по формуле

$$\mathcal{I}_S = \Delta L \frac{1 + K_\Phi}{\sqrt{K_\Phi S_2}} \quad (2.8)$$

(здесь $K_\Phi = \frac{L^2}{B^2}$ - коэффициент формы ТПК, S_2 - площадь верхней обкладки); \mathcal{I}_{C_t} - относительное изменение емкости под действием температуры окружающей среды;

$$\delta_{C_t} = \alpha_C (t - 20^\circ\text{C})$$

(здесь α_C - температурный коэффициент емкости ТПК, определяется из табл. 2.1);

$\delta_{C_{cm}}$ - относительное изменение емкости во времени, определяется из табл. 2.1.

Для обеспечения заданной точности емкости необходимо, чтобы выполнялось условие $\delta_C \leq \delta_{C_{доп}}$,

где $\delta_{C_{доп}}$ - допуск на изготовление емкости, т.е. должно выполняться неравенство

$$\delta_{доп} \geq \delta_{C_0} + \delta_S + \delta_{C_t} + \delta_{C_{cm}}. \quad (2.9)$$

Так как все величины неравенства (2.9), кроме δ_S , конструктору, как правило, заданы, значения δ_S можно определить по формуле

$$\delta_S = \delta_{C_{доп}} - \delta_{C_0} - \delta_{C_t} - \delta_{C_{cm}}.$$

Из формулы (2.8) видно, что требуемое значение δ_S можно обеспечить, задаваясь различными значениями ΔL , K_φ и S . Так как величина ΔL , определяемая уровнем технологии, как правило, известна, а значение K_φ выбирается исходя из топологических соображений, определяют величину S по формуле

$$S_2 \geq \left(\frac{\Delta L}{\delta_S} \right)^2 \frac{(1 + K_\varphi)^2}{K_\varphi}. \quad (2.10)$$

Если в выражении (2.10) выполняется равенство, получаем:

$$C_{0_{макс}} = C \left(\frac{\delta_S}{\Delta L} \right)^2 \frac{K_\varphi}{(1 + K_\varphi)^2}. \quad (2.11)$$

Анализ выражения (2.8) показывает, что существует оптимальное значение K_φ , при котором величина δ_S минимальна. Это значение равно единице. При $K_\varphi = 1$ выражения (2.10) и (2.11) принимают вид

$$S_2 = 4 \left(\frac{\Delta L}{\delta_S} \right)^2;$$

$$C_{0_{макс}} = C \left(\frac{\delta_S}{2\Delta L} \right)^2.$$

После определения S_2 по формулам (2.4) и (2.5) вычисляют размеры верхней, а по формулам (2.6) и (2.7) - размеры нижней обкладок ТПК. Размеры диэлектрического слоя вычисляют:

$$L_0 \geq L_1 + \Delta L + 2\Delta l_y;$$

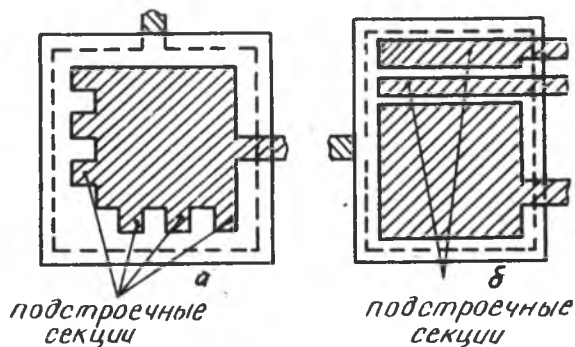
$$B_0 \geq B_1 + \Delta B + 2\Delta l_y.$$

б) Расчет ТПК повышенной точности

Если допуск на номинал емкости $\mathcal{I}_{с\text{дон}}$ мал, а величины $\mathcal{I}_{с\text{т}}$, $\mathcal{I}_{с\text{ст}}$ относительно велики, то величина $\mathcal{I}_{с}$ может оказаться отрицательной. Это значит, что при изготовлении ТПК может быть большой процент брака. При положительных, но очень малых значениях $\mathcal{I}_{с}$ величина S_2 может оказаться слишком большой, а величина $C_{0\text{макс}}$ малой, что невыгодно с точки зрения миниатюризации ТПК.

В таких случаях целесообразно проектировать ТПК с регулируемыми секциями (рис.2.3).

Отсоединение секции конденсатора, изображенного на рис.2.3,а, позволяет уменьшать его емкость. Подсоединение или отсоединение секции ТПК, изображенного на рис.2.3,б, позволяет изменять емкость в сторону как увеличения, так и уменьшения.



Р и с. 2.3. ТПК с подстраиваемыми секциями

Для конструктивного расчета подстраиваемых ТПК необходимо знать минимальные и максимальные значения емкости. Их можно определить из выражений

$$C_{\text{макс}} = C \left(1 + \frac{\delta_c - \delta_{c_k} - \delta_{c_{cm}}}{100} \right);$$

$$C_{\text{мин}} = C \left(1 - \frac{\delta_c - \delta_{c_k} - \delta_{c_{cm}}}{100} \right),$$

где относительные погрешности выражены в процентах. В процессе настройки номинал емкости обязательно должен попасть в диапазон

$$C_{\text{мин}} - C_{\text{макс}}.$$

Шаг подгонки, равный емкости одной секции, должен быть не больше поля допуска: $\Delta C = C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}}$.

Число подстраиваемых секций можно определить из отношения

$$n = \frac{\delta_{c_0} + \delta_s}{\delta_c - \delta_{c_{cm}}} + 1,$$

где $C_{0\text{макс}}$ - максимальная удельная емкость,

$$C_{0\text{макс}} = C_0 (1 + \delta_{c_0} / 100);$$

величина C_0 вычисляется по формуле (2.3).

При $K_{\text{ф}} = 1$ размеры верхней обкладки определяются из соотношения

$$L_{\text{осн}} = B_{\text{осн}} = \sqrt{S_{\text{осн.макс}}} - \Delta L.$$

Площадь одной подстроечной секции равна

$$S_{\text{смин}} = \frac{S_{\Sigma\text{мин}} - S_{\text{осн.мин}}}{n},$$

где

$$S_{\Sigma\text{мин}} = \frac{C_{\text{мин}}}{C_{0\text{мин}}}; \quad C_{0\text{мин}} = C_0 \left(1 - \frac{\delta_{c_0}}{100} \right);$$

$$S_{\text{осн.мин}} = B_{\text{осн.мин}} L_{\text{осн.мин}}; \quad B_{\text{осн.мин}} = B - \Delta B; \quad L_{\text{осн.мин}} = L - \Delta L.$$

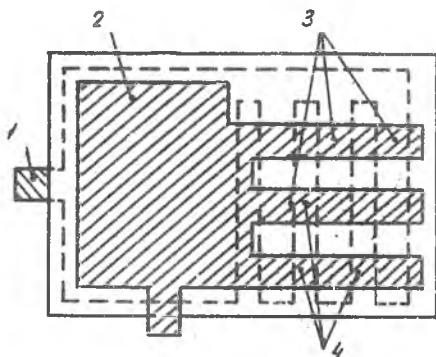
Дальнейшее конструирование заключается в рациональном расположении подстроечных секций на одной или двух сторонах верхней обкладки. Расстояние между секциями и их ширина выбираются из топологических соображений с учетом технологических ограничений.

Высота секции вычисляется по формуле

$$h_c = \frac{S_{\text{мин}}}{\epsilon_c - \Delta \epsilon}.$$

Чтобы не допустить повреждения диэлектрика, которое может произойти при подгонке номинала конденсатора, изображенного на рис.2,3,а, иногда применяют другую конструкцию регулируемого ТПК (рис.2.4) с так называемыми "матричными" секциями.

В местах перекрещивания полосок, принадлежащих обкладкам I и 2, образуются подстроечные секции конденсатора 3, которые можно отсоединить разрывом перемычек 4.



Р и с. 2.4. ТПК с матричными подстраиваемыми секциями

2.4. Расчет гребенчатых конденсаторов

Если расчетная величина активной площади ТПК меньше 1 мм^2 , рекомендуется конструировать гребенчатый пленочный конденсатор, внешний вид которого показан на рис.2.5.

Емкость такого конденсатора ($n\Phi$) в основном состоит из паразитной емкости, обусловленной краевым эффектом, и определяется по эмпирической формуле

$$C = \epsilon_p \beta \epsilon,$$

где β - коэффициент, зависящий от ширины пленочных проводников и расстояния между ними; определяется по графику (рис.2.6);

l - длина совместной границы проводников, см;

ϵ_p - расчетное значение относительной диэлектрической проницаемости:

для конденсатора, не имеющего защитного покрытия,

$$\epsilon_p = \frac{1 + \epsilon_n}{2};$$

для конденсатора, покрытого защитным слоем,

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon_d + \epsilon_n}{2},$$

где ϵ_d - относительная диэлектрическая проницаемость слоя покрытия;

ϵ_n - относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки.

2.5. Добротность ТПК

О качестве ТПК на рабочей частоте можно судить по величине угла потерь $tg \delta$ или обратной ее величине, называемой добротностью Q :

$$Q = \frac{1}{tg \delta}. \quad (2.12)$$

Потери энергии в ТПК складываются из следующих составляющих:

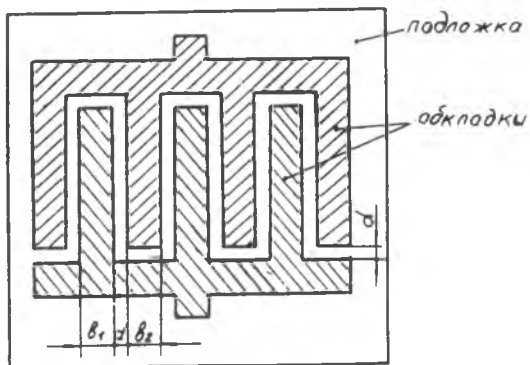
потерь энергии в диэлектрических слоях: в основном диэлектрическом слое ТПК, в подложке, в защитном слое;

потерь энергии в металлических элементах ТПК: обкладках, выводах конденсатора.

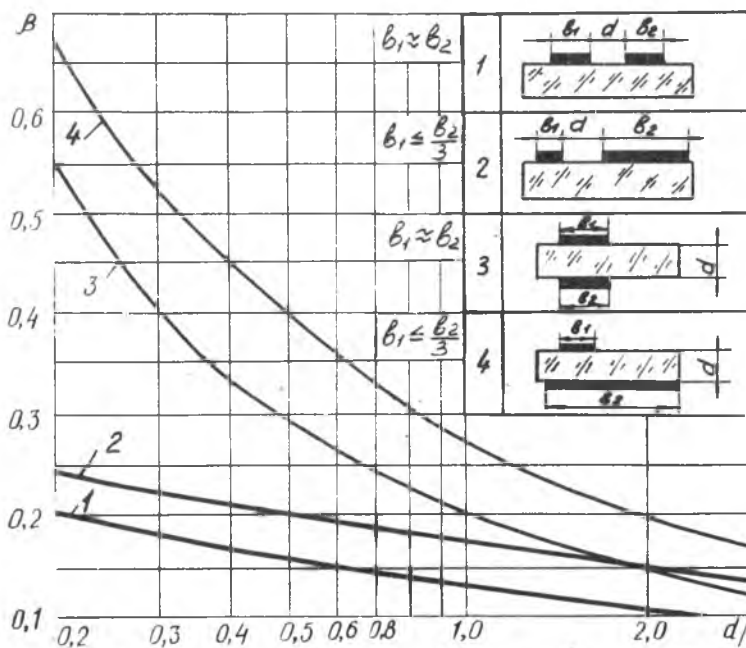
В связи с этим эквивалентную схему ТПК можно представить в виде последовательного соединения емкости без потерь C , эквивалентного сопротивления диэлектрических потерь $Z_{d\delta}$ и эквивалентного сопротивления потерь в металлических элементах конденсатора $Z_{э.м}$ (рис.2.7).

Тангенс угла потерь можно представить в виде суммы

$$tg \delta = tg \delta_d + tg \delta_m,$$

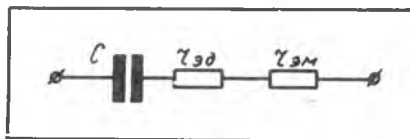


Р и с. 2.5. Гребенчатый конденсатор



Р и с. 2.6. Зависимость коэффициента B от расположения элементов гребенчатого ПК

где $\operatorname{tg} \delta_D$ - тангенс угла потерь в диэлектрических материалах;
 $\operatorname{tg} \delta_M$ - тангенс угла потерь в металлических элементах ТПК.



Р и с. 2.7. Эквивалентная схема ТПК

Значения $\operatorname{tg} \delta_D$ для некоторых диэлектрических материалов приведены в табл. 2.1. Величина $\operatorname{tg} \delta_M$ может быть вычислена по формуле

$$\operatorname{tg} \delta_M = \omega C Z_{эМ},$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота (f - рабочая частота, Гц);
 C - емкость конденсатора, Ф;
 $Z_{эМ}$ - эквивалентное сопротивление потерь переменному току в обкладках и выводах

$$Z_{эМ} = Z_{э.об} + Z_{э.выв}.$$

Сопротивление выводов ТПК определяется выражением

$$Z_{э.выв} = R_{0.выв} K_{ф.выв},$$

а эквивалентное сопротивление обкладок ТПК переменному току можно определить как

$$Z_{э.об} = \frac{2}{3} R,$$

где R - сопротивление одной обкладки конденсатора постоянному току (Ом), вычисляемое по формуле

$$R = R_{0.об} K_{ф.об}. \quad (2.13)$$

Формула (2.13) справедлива, если выполняется условие

$$\omega RC \leq 0,04,$$

при котором распределение тока в обкладках подчинено линейному закону.

После преобразований формула (2.12) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_2 + \omega C R_{008} \left(\frac{2}{3} K_{\Phi 08} + K_{\Phi \delta_{08}} \right)} \quad (2.14)$$

При выводе формулы (2.14) предположено, что обкладки и выводы ТПК изготовлены из одного материала, по одной технологии и имеют одинаковую толщину, т.е. выполняется условие

$$R_{008} = R_{088}.$$

3. ПЛЕНОЧНЫЕ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. Наибольшее распространение в мегагерцовом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рис.3.1). Ограниченные размеры подложки пленочных микросхем и конечная ширина проводящей полоски не позволяют изготовить однослойные плоские пленочные катушки с индуктивностью более 5-7 мкГн. Это означает, что наиболее реальным является изготовление микросхем с колебательными контурами, резонансная частота которых соответствует нескольким десяткам мегагерц. Методы увеличения индуктивности плоских спиральных катушек, основанные на нанесении ферритовых пленок, позволяют увеличить индуктивность катушек лишь на 10-40%, но значительно усложняют технологический процесс их изготовления.

Различные схемные эквиваленты индуктивностей, в которых используются активные элементы, пока не нашли широкого применения из-за зависимости их параметров от частоты и температуры.

Исходными данными для расчета являются:

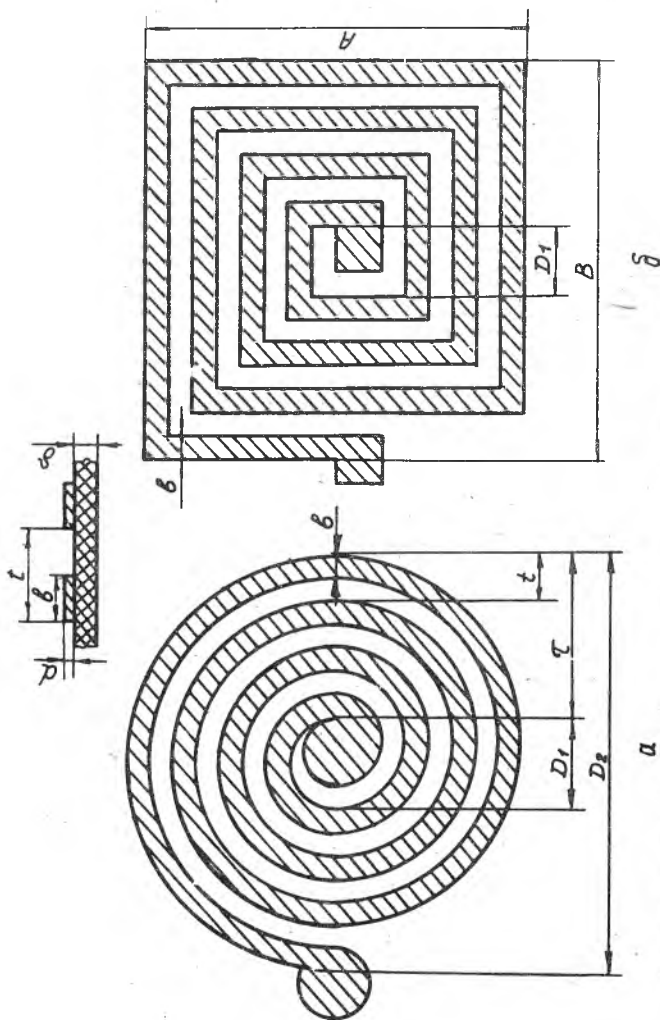
- величина индуктивности - L ;
- величина добротности - Q ;
- рабочая частота - f ;
- ориентировочные размеры подложки.

По ним выбираются:

- форма катушки, ее наружный размер D_2 ;
- материал проводника катушки ;
- материал подложки ;
- способ изготовления катушки ;
- способ получения фотооригинала.

В результате расчетов необходимо определить:

- шаг спирали - t ;



Р и с. 3.1. Пленочные катушки индуктивности: а - круглая спираль; б - квадратная спираль

ширину витка - b ;
 толщину витка - d ;
 внутренний диаметр катушки - D_1 ;
 число витков - N .

При проектировании пленочных катушек индуктивности нужно учитывать следующие положения:

1. Главным фактором, определяющим индуктивность одновитковой петли, является площадь, заключенная в плоскости петли.

2. Для заданной площади кольцеобразная петля соответствует наименьшей длине проводника.

3. При условии, что связь между витками достаточно сильная, индуктивность катушки возрастает пропорционально квадрату числа витков.

4. Поперечные размеры проводника катушки слабо влияют на ее индуктивность и существенно влияют на добротность.

5. При одинаковых габаритных размерах индуктивность квадратной катушки примерно на 12% больше, чем круговой; добротность ее на 10% ниже.

Расчет пленочных катушек индуктивности производится в следующей последовательности:

1. Выбирается внутренний размер катушки D_1 . Из технологических соображений его не следует брать меньше 2 мм.

2. Определяется шаг спирали по формуле

$$t = K \frac{D_1 \sqrt{D_1}}{\sqrt{L}} \text{ мм}, \quad (3.1)$$

где L - индуктивность катушки, мкГн;

D_1 - внутренний диаметр катушки, мм;

K - коэффициент, зависящий от отношения $\frac{D_2}{D_1}$, определяется по графику рис.3.2.

3. Из условия $d \geq (2-4)d_c$ определяется толщина проводника катушки d .

Здесь d_c - толщина слоя скин-эффекта в мкм, рассчитываемая по формуле

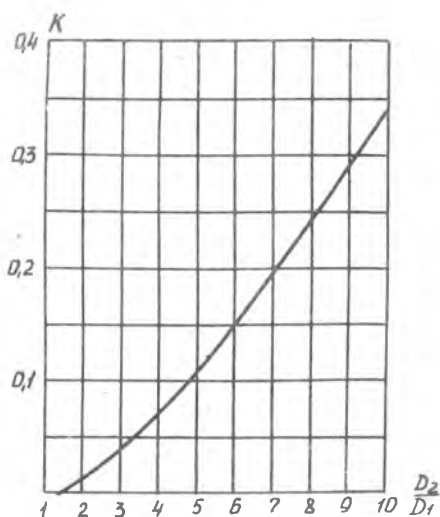
$$d_c = K_1 \sqrt{\lambda} ,$$

где K_1 - коэффициент, учитывающий материал пленки:

для серебра $K_1 = 0,37$; для меди $K_1 = 0,39$;

для алюминия $K_1 = 0,51$;

λ - длина волны, см ($\lambda = \frac{c}{f}$).



Р и с. 3.2. Зависимость коэффициента K от размеров пленочной катушки

4. Определяется ширина витка, при которой получается заданная добротность катушки

$$\delta = \frac{\rho t \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right] Q 10^4}{16 f D_1 K^2 d}, \quad (3.2)$$

где δ - ширина витка, мм;

ρ - удельное объемное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·см;

t - шаг спирали, мм;

D_1, D_2 - внутренний и внешний размеры катушки, мм;

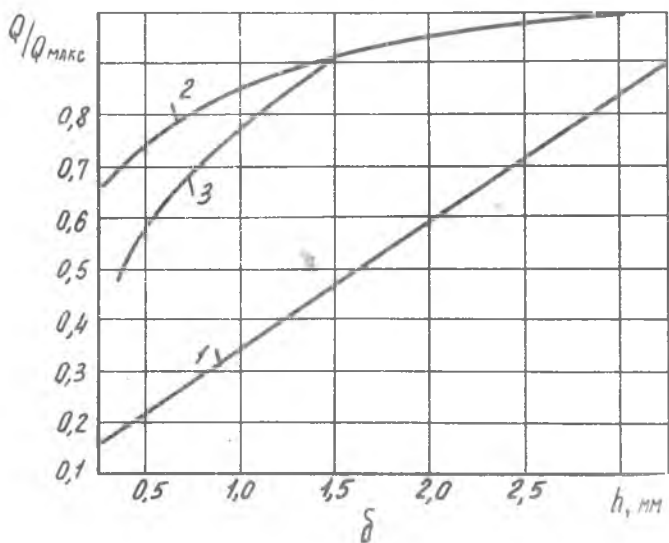
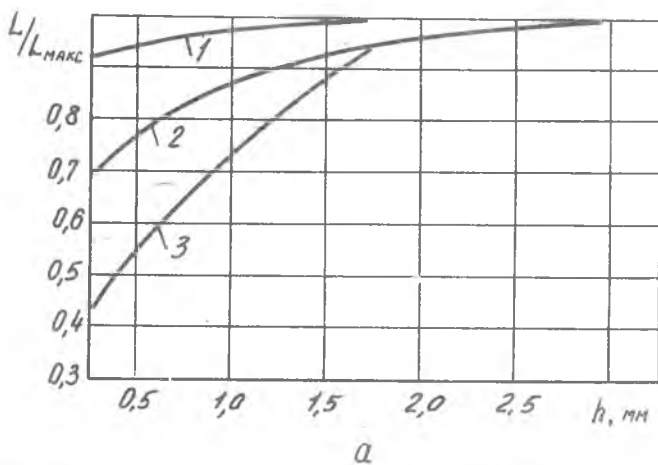
f - частота, МГц;

K - коэффициент, определяемый из графика рис.3.2;

d - толщина проводника катушки, мкм.

Так как формула (3.2) выведена без учета влияния скин-эффекта, то ширину витка, рассчитанную по этой формуле, следует увеличить и выбирать равной $(1,5-2) \delta$ для $d = (2-4) d_c$.

Если новое значение ширины δ' получится больше t , следует, оставляя прежним внутренний размер спирали D_1 и задаваясь шагом спирали $t > \delta'$, из формулы (3.1) определить внешний размер спирали D_2 , при котором можно получить заданную индук-



Р и с. 3.3. Влияние плоских металлических поверхностей на индуктивность (а) и добротность (б): 1 - алюминиевая пленка на частотах 20-100 МГц; 2, 3 - латунный лист на частотах 100 и 20 МГц

тивность, а затем по формуле (3.2) определить ширину витков δ .

5. Определяется число витков по формуле

$$N = \frac{D_2 - D_1}{2t},$$

где t - шаг намотки.

Расчет плоской прямоугольной спиральной катушки сводится к расчету круглой с эквивалентным наружным диаметром:

$$D_2' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{AB}.$$

Здесь A и B - габаритные размеры прямоугольной спиральной катушки.

При расчете и конструировании пленочных катушек индуктивности необходимо учитывать влияние близлежащих металлических поверхностей (стенок корпуса, подложек с нанесенными пленками), на их индуктивность и добротность. Это влияние проявляется в уменьшении L и Q . Зависимость индуктивности и добротности плоских катушек, расположенных на расстоянии h от металлической поверхности, приведена на рис.3.3,

где L_{\max} и Q_{\max} - величины индуктивности и добротности при $h \rightarrow \infty$;

L и Q - величины индуктивности и добротности при конечном значении h .

Вычисленные при расчете электрической схемы L и Q должны быть перед конструктивным расчетом катушки индуктивности увеличены с учетом размагничивающего влияния металлических поверхностей в соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис.3.3.

Л и т е р а т у р а

1. Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Д.Г. Конструкции и технология микросхем. - М.: Сов.радио, 1980. - 256 с.
2. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. - М.: Радио и связь, 1982. - 288 с.
3. Ненашев А.П., Коледов Л.А. Основы конструирования микроэлектронной аппаратуры. - М.: Радио и связь, 1981. - 304 с.
4. Конструирование и расчет больших гибридных интегральных схем, микросборок и аппаратуры на их основе /Под ред. Б.Ф.Высоцкого. - М.: Радио и связь, 1981. - 216 с.
5. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. - М.: Наука, 1977.

С о д е р ж а н и е

1. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ.....	3
1.1. Конструктивно-технологические особенности.....	3
1.2. Проектирование и расчет резисторов.....	6
1.3. Расчет сопротивления контактных переходов.....	11
1.4. Расчет резисторов повышенной точности.....	13
1.5. Оценка сопротивления и индуктивности пленочных проводников	18
1.6. Частотные свойства пленочных резисторов.....	20
2. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ.....	21
2.1. Конструктивно-технологические особенности.....	21
2.2. Исходные данные и основные расчетные соотно- шения.....	23
2.3. Расчет ТПК с учетом точностных характеристик....	26
2.4. Расчет гребенчатых конденсаторов.....	31
2.5. Добротность ТПК	32
3. ПЛЕНОЧНЫЕ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ.....	35
Л и т е р а т у р а	40

Составители: Анатолий Игнатьевич М е р к у л о в,
Василий Дмитриевич Д м и т р и е в,
Татьяна Серафимовна К а л у г и н а

КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ
ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Редактор Е.Г.Ф и л и п ц о в а
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор М.И. Л о г у н о в а

Подписано в печать 30.01.84 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.

Печать оперативная. Усл.п.л. 1,63. Уч.-изд.л. 1,5.

Т. 500 экз. Заказ 1571 Бесплатно.

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

Обл.тип.им.В.П.Мяги, г.Куйбышев, ул.Венцека, 60.