

P248

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

# **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

САМАРА 2002



Составители: *А.И. Меркулов, В.Д. Дмитриев*

УДК 621.382(075)

**Расчет и проектирование элементов гибридных интегральных микросхем: Метод. указ. к курс. и дипломному проектир.** / Самар. аэрокосм. ун-т; Сост. *А.И. Меркулов, В.Д. Дмитриев*. Самара, 2002. 44 с.

Излагаются конструктивно-технологические особенности и основные способы проектирования пассивных элементов гибридных интегральных микросхем и микросборок вероятностным методом.

Предназначены для студентов спец. 20.08 "Конструирование и производство радиоэлектронных средств" и могут быть использованы при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва

Рецензент канд. техн. наук, доц. *В.В. Иванюк*

## КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

### Конструктивно-технологические особенности

Резисторы являются наиболее распространенными элементами пленочных микросхем. Резистивные элементы гибридных микросхем получают напылением на диэлектрические основания (подложки) узких резистивных пленочных полосок 1 (рис. 1) различной конфигурации и контактных площадок 2, имеющих с ними некоторую зону перекрытия 3. Конструкции пленочных резисторов должны 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 микросхем.

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

Величина сопротивления тонкопленочного резистора (ТНР) прямоугольной формы (рис. 1, а) связана с размерами  $l$  и  $b$  и величиной удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки  $R_{\square}$  соотношением

$$R = R_{\square} \frac{l}{b}. \quad (1)$$

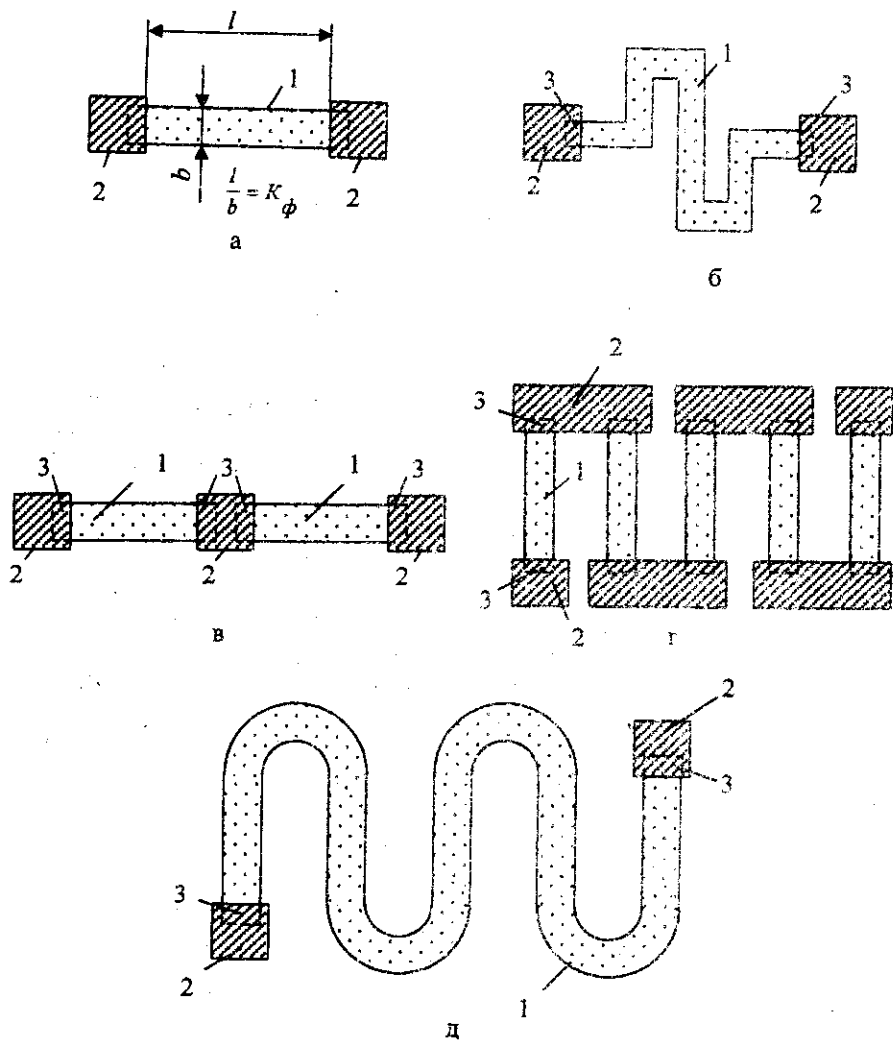


Рис. 1. Конструктивные формы пленочных резисторов: а - прямоугольная; б - типа "меандр"; в, г - последовательное соединение резистивных пленочных полосок; д - типа "змейка"

Отношение длины  $l$  к ширине  $b$  тонкопленочного резистора называют коэффициентом формы

$$\left( K_{\phi} = \frac{l}{b} \right).$$

В результате формулу (1) можно представить в виде

$$R = R_{\square} K_{\phi}. \quad (2)$$

Если длина резистора  $l > (5 \dots 8)$  мм, то резистор необходимо выполнять изогнутым в виде "меандра" или "змейки". Нецелесообразно принимать значение  $K_{\phi} < 0,5$ , так как при этом понижается точность изготовления резистора, увеличивается площадь контактных перекрытий.

Электрические характеристики и величина номинала зависят от конструкции резистора, материала 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.

#### Расчет пленочных резисторов прямоугольной формы

Пленочный резистор прямоугольной формы изображен на рис. 2.

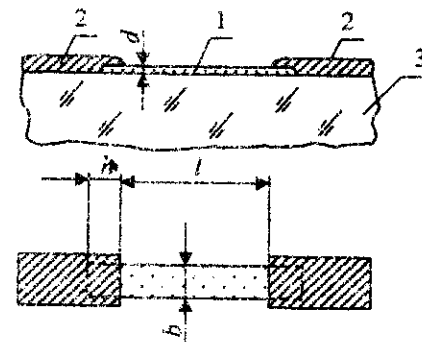


Рис. 2. Конструкция пленочного резистора: 1 - резистивная пленка; 2 - проводящие пленки; 3 - подложка

Для расчета пленочных резисторов исходными являются данные:

э л е к т р и ч е с к и е

$R_i$  - номиналы резисторов, Ом;

$P_i$  - мощности рассеивания резисторов, Вт;

$\bar{\delta}_{R_i \text{ доп}}$  - допустимые отклонения номиналов резисторов, %;

э к с п л у а т а ц и о н н ы е

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

$T$  - время эксплуатации, ч;

$f$  - рабочая частота, Гц;

т е х н о л о г и ч е с к и е

$\bar{\sigma}_{R_i}$  - относительное среднеквадратическое отклонение сопротивления квадрата резистивной пленки;

$\sigma_l$  - абсолютное среднеквадратическое отклонение размеров проводящего слоя, мм;

$\sigma_b$  - абсолютное среднеквадратическое отклонение ширины резистивных пленок, мм;

$\Phi_R$  - вероятность выхода годного резистора ( $\Phi_R = 0,8 \dots 1$ );

$b'$  - минимальная допустимая ширина резистивной пленки, мм.

Среднеквадратические значения отклонений технологических параметров пленочных резисторов для различных видов технологии приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Погрешности воспроизведения технологических параметров пленочных резисторов

Виды технологии изготовления	$\sigma_l$ , мм	$\sigma_b$ , мм	$\bar{\sigma}_{R_i}$	$b'$ , л'
Метод свободной маски	0,01...0,03	0,007...0,01	0,02...0,05	0,2
Фотолитография	0,003...0,007	0,002...0,005	0,02...0,05	0,1
Танталовая технология	0,003...0,007	0,002...0,005	0,02...0,05	0,1

В результате расчетов необходимо определить величину  $R_{\square}$  и размеры ТПР ( $b$ ,  $l$  и  $h$ ).

## Выбор материалов и определение оптимального значения $R_{\square}$ для группы ТПР

С технологической точки зрения желательно, чтобы все ТПР были выполнены на основе одного резистивного слоя, т.е. из одного материала с одним значением  $R_{\square}$ . Однако если диапазон номиналов резисторов в схеме широк (отношение сопротивления наиболее высокоомного резистора к сопротивлению наиболее низкоомного превышает число 50), выполнять все резисторы с одним значением  $R_{\square}$  не рекомендуется: при малом значении  $R_{\square}$  высокоомные резисторы будут слишком длинными, при большом значении  $R_{\square}$  низкоомные резисторы будут слишком короткими, погрешность при их изготовлении велика. В таких случаях целесообразно разделить резисторы на две группы: низкоомные и высокоомные, и для каждой группы выбрать материал с соответствующим значением  $R_{\square}$ . Выбирать более двух значений  $R_{\square}$  не рекомендуется.

Для каждой из групп резисторов желательно определить оптимальное, обеспечивающее минимизацию площади, занимаемой резисторами, значение  $R_{\square}$  [2]:

$$R_{\square \text{ опт}} = \frac{\sigma_b}{\sigma_l} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_b$  и  $\sigma_l$  - абсолютные среднеквадратические отклонения ширины и длины резисторов (см. табл. 1).

Разнообразие предъявляемых требований ограничивает количество материалов, пригодных для изготовления резистивных пленок. Основные электрофизические характеристики наиболее распространенных резистивных материалов приведены в табл. 2.

При выборе толщины резистивной пленки (или значения  $R_{\square}$ ) следует помнить, что сопротивление и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) тонких (100...300 Å) пленок сильно зависят от толщины. Полученное из формулы (3) значение  $R_{\square \text{ опт}}$  округляется. По этому значению выбирается материал резистивной пленки и определяются его эксплуатационные характеристики:

$P_0$  - максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной пленки, Вт/см<sup>2</sup>;

Электрофизические характеристики материалов для включенных резисторов и проводников

Материал	$R_{\square}$ , Ом / $\square$	$P_0$ , Вт / см <sup>2</sup>	$\alpha_R \cdot 10^{-4}, 1 / \text{град}$		Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}, 1 / \text{ч}$	Старение $\delta_{R_{\text{ст}}}$ , % за 5000 ч в норм. условиях
			-60...+25°C	+25...+125°C		
Хром ХО, ГОСТ 5905-67	200...500	2,0	1,8	0,6	2,6...3,1	2,0
Нихром Х20Н80 ГОСТ 12766-67	100...300	1,0	-0,4...+0,1	-0,9...+0,2	-	0,1...0,4
Сплав МЛТ-ЭМ БКО.028.005 ТУ	300...500	2,0	$\pm(1,2...1,8)$	$\pm(1,9...2,4)$	1,8	$\pm 0,1$
Кермет ЕТО.021.033 ТУ	$(0,5...3)10^3$	2,0	3...7	0,5...2,0	0,9	$\pm 0,3$
Тагал, СУО.021.041 ТУ	300...500	2,0	-1,5	-2,6	-	2,6...3,2
Алюминий, А99 ГОСТ 6132-63	0,1...0,2	1,0	0,24	-	-	-
Сплав: РС-4800	$(0,3...1)10^3$	2,0	2,0	-	-	2,0
РС-3710	$(0,5...3)10^3$		0,5...2,0	-	-	2,0
РС-3001	$(0,8...1,5)10^3$		1,0	-	-	1,0
РС-1004, ЕТО.021.048ТУ	$(1...4)10^4$		10,0	-	-	2,0

$\alpha_R$  - температурный коэффициент сопротивления материала пленки;  $\bar{\delta}_{R_{\text{ст}}}$  - относительное изменение сопротивления резистивной пленки в результате старения, %.

#### Определение технологического допуска

Так как все материалы, в том числе и резистивные, изменяют свои свойства в процессе старения и под воздействием температуры окружающей среды, заданное в электрической схеме значение допуска на номинал резистора  $\bar{\delta}_{R_{\text{доп}}}$  необходимо скорректировать. В результате получим значение технологического допуска (допуска на изготовление)  $\bar{\delta}_R$ :

$$\bar{\delta}_R = \bar{\delta}_{R_{\text{доп}}} - \bar{\delta}_{R_T} - \bar{\delta}_{R_{\text{ст}}} - \bar{\delta}_{R_K}, \quad (4)$$

где  $\bar{\delta}_{R_T}$  - относительная погрешность, обусловленная воздействием температуры окружающей среды в процессе эксплуатации;

$$\bar{\delta}_{R_T} = \alpha_R (t_{\text{max}} - 20^\circ \text{C}),$$

$\bar{\delta}_{R_K}$  - относительная погрешность, обусловленная наличием переходного сопротивления контактов ТПР, обычно составляет 1...2% (величину  $\bar{\delta}_{R_K}$  необходимо выбрать, а после определения ширины ТПР - уточнить).

Погрешность  $\bar{\delta}_{R_{\text{ст}}}$  вызвана медленным изменением структуры пленки во времени и ее окислением. Она зависит от материала пленки и эффективности защиты, а также от условий хранения и эксплуатации микросхем.

#### Определение геометрических размеров ТПР

Коэффициент формы ТПР определяется из соотношения

$$K_{\phi} = \frac{R}{R_{\square}}. \quad (5)$$

При определении размеров резистора необходимо учитывать ограничения выбранного вида технологии, рассеиваемую резистором мощность и допуск на номинал.

При  $K_\Phi > \sigma_l / \sigma_b$  сначала определяется ширина ТПР из соотношения

$$b = \max\{b', b'', b'''\}. \quad (6)$$

Здесь  $b'$  - минимальная допустимая ширина резистивной полоски (технологическое ограничение), выбирается из табл. 1;  $b''$  - минимальная допустимая ширина резистора, обеспечивающая его нормальную работу при заданной рассеиваемой мощности,

$$b'' > \sqrt{\frac{P}{P_0 K_\Phi}}. \quad (7)$$

О п р е д е л е н и е  $b'''$ . Величина  $b'''$  определяется из условия обеспечения заданной точности ТПР. Размеры резистора должны быть таковы, чтобы его сопротивление при заданных технологических погрешностях  $\bar{\sigma}_{R_\square} \sigma_b$  и  $\sigma_l$  с заданной вероятностью  $\Phi_R$  попало в заданный допуск  $\pm \bar{\delta}_R$ .

При изготовлении пленочных резисторов возникают погрешности воспроизведения геометрии, т.е. коэффициента формы, и получения расчетного значения сопротивления квадрата  $R_\square$ . Как правило, все отклонения носят случайный характер и распределяются по нормальному закону [4]. Следовательно, отклонение номиналов резисторов случайно и имеет нормальный (гауссовский) закон распределения.

На основании выражения (1) дисперсию номинала резистора можно выразить через дисперсии  $R_\square$ ,  $l$  и  $b$ :

$$\bar{\sigma}_R^2 = \bar{\sigma}_{R_\square}^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2, \quad (8)$$

где  $\bar{\sigma}_{R_\square}$  - относительное среднеквадратическое отклонение  $R_\square$ , определяемое технологическим процессом (см. табл. 1);  $\frac{\sigma_l}{l} = \bar{\sigma}_l$  - относительное среднеквадратическое отклонение длины ТПР;

$\frac{\sigma_b}{b} = \bar{\sigma}_b$  - относительное среднеквадратическое отклонение ширины ТПР.

Значение  $\bar{\sigma}_R^2$  (реальная дисперсия), определяемое выражением (8), не должно превышать допустимое значение дисперсии номинала резистора при заданном значении допуска  $\bar{\delta}_R$  и заданном значении вероятности выхода годного резистора  $\Phi_R$  [2], т.е. должно выполняться соотношение

$$\bar{\sigma}_R \leq \bar{\sigma}_{R_{\text{доп}}}. \quad (9)$$

Величину  $\bar{\sigma}_{R_{\text{доп}}}$ , исходя из закона нормального распределения погрешности сопротивления резистора, можно определить [4] из соотношения

$$\bar{\sigma}_{R_{\text{доп}}} = \frac{\bar{\delta}_R}{Z\sqrt{2}}, \quad (10)$$

где  $\bar{\delta}_R$  - технологический (суженный) допуск на номинал резистора (4);  $Z$  - аргумент интеграла вероятностей  $\Phi_R$  [1],

$$\Phi_R = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-x^2} dx.$$

Величина  $Z$  определяется по заданному значению  $\Phi_R$  из табл. 3.

Зная значение  $\bar{\sigma}_{R_{\text{доп}}}$ , заданные значения  $\bar{\sigma}_{R_\square}$ ,  $\sigma_l$ ,  $\sigma_b$  и заменяя величину  $l$  на  $l = bK_\Phi$ , из выражения (8) с учетом неравенства (9) получаем

$$b''' = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sigma_l}{K_\Phi}\right)^2 + \sigma_b^2}{\bar{\sigma}_{R_{\text{доп}}}^2 - \bar{\sigma}_{R_\square}^2}}. \quad (11)$$

Подставив это значение в выражение (6), определим ширину резистора  $b$ , а из выражения  $l = bK_\Phi$  - его длину.

В знаменателе выражения (11) может получиться "ноль" или отрицательное число. Это значит, что при выбранных технологических параметрах обеспечить требуемую точность резистора за счет увеличения его размеров невозможно, необходима подгонка.

Если длина резистора  $l > (5...8)$  мм, целесообразно выполнять его изогнутым в виде "меандра" или использовать другую конструкцию (см. рис. 1).

Таблица 3

Значения интеграла вероятностей  $\Phi(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-x^2} dx$

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	0,60	0,6039	1,20	0,9103	1,80	0,9891
02	0226	62	6194	22	9155	82	9899
04	0451	64	6346	24	9205	84	9907
06	0676	66	6494	26	9252	86	9915
08	0901	68	6638	28	9297	88	9922
0,10	1125	0,70	6778	1,30	9340	1,90	9928
12	1348	72	6914	32	9381	92	9934
14	1569	74	7047	34	9419	94	9939
16	1790	76	7175	36	9456	96	9944
18	2009	78	7300	38	9490	98	9949
0,20	2227	0,80	7421	1,40	9523	2,00	9953
22	2443	82	7538	42	9554	05	9963
24	2657	84	7651	44	9583	10	9970
26	2869	86	7761	46	9610	15	9976
28	3079	88	7867	48	9636	20	9981
0,30	3286	0,90	7969	1,50	9661	2,25	9985
32	3491	92	8068	52	9684	30	9988
34	3694	94	8163	54	9706	35	9991
36	3893	96	8254	56	9726	40	9993
38	4090	98	8342	58	9745	45	9995
0,40	4284	1,00	8427	1,60	9763	2,50	9996
42	4475	02	8508	62	9780	60	9998
44	4662	04	8586	64	9796	70	9999
46	4847	06	8661	66	9811	80	9999
48	5027	08	8733	68	9825	2,90	0,9999
0,50	5205	1,10	8802	1,70	9838	3,00	1,0000
52	5379	12	8868	72	9850	20	1,0000
54	5549	14	8931	74	9861	40	1,0000
56	5716	16	8991	76	9872	60	1,0000
58	0,5879	18	0,9048	78	0,9882	3,80	1,0000

При  $K_{\Phi} < \sigma_l / \sigma_b$  сначала определяют длину резистора из соотношения

$$l = \max\{l', l'', l'''\},$$

где  $l'$  выбирают из табл. 1,

$$l'' = \sqrt{\frac{P}{P_0} K_{\Phi}},$$

$l'''$  - определяют из формулы (8), заменяя в ней величину  $b$  на  $b = l / K_{\Phi}$ , т.е.

$$l''' = \sqrt{\frac{\sigma_l^2 + (\sigma_b K_{\Phi})^2}{\sigma_{R_{\text{доп}}}^2 - \sigma_{R_0}^2}} \quad (12)$$

Ширина резистора определяется по формуле  $b = l / K_{\Phi}$ .

Если в знаменателе выражения (12) получится "ноль" или отрицательное число, то необходима подгонка. Если ширина ТПР  $b > 5$  мм, необходимо подумать о возможности его замены навесным резистором.

#### Учет сопротивления контактных переходов

Каждый пленочный резистор кроме резистивной зоны имеет зону контактного перехода  $h$  (см. рис. 2). Конструкция и техпроцесс изготовления ТПР должны обеспечивать минимальное переходное сопротивление между резистивной и проводящей пленками, хорошую адгезию к подложке, равномерное распределение линий тока в зоне контакта. Контактный слой между резистивной и проводящей пленками представляет собой сложную структуру, содержащую окислы и газовые включения, количество и состав которых зависят от степени вакуума, при котором изготовлена микросхема, и от времени между операциями нанесения резистивных и проводящих пленок. Переходное сопротивление, следовательно, зависит от геометрических размеров  $h$  и  $h'$  контактной зоны, удельного поверхностного сопротивления  $R_{\square}$  резистивной пленки и удельного сопротивления переходного слоя  $R^*$  току, перетекающему из резистивной пленки в проводящую.

Величина переходного сопротивления контакта определяется как

$$R_x = \sqrt{\frac{R_{\square} R^*}{b}} \quad (12')$$



Величина  $R^*$  для различных режимов технологического процесса может составлять 0,01...2,0 Ом·мм<sup>2</sup>. Наименьшие значения соответствуют высокому уровню технологии, наибольшие - низкому (низкий вакуум, раздельное нанесение слоев).

Относительная погрешность сопротивления ТПР из-за наличия контактного сопротивления определяется как

$$\bar{\delta}_{R_k} = \frac{2R_k}{R} \quad (13)$$

Если величина  $\bar{\delta}_{R_k}$ , полученная из формулы (13), больше выбранной ориентировочно при определении технологического допуска по формуле (4), то расчет ТПР необходимо повторить, подставив в формулу (4) значение из формулы (13).

Длина перекрытия  $h$  резистивной и проводящей пленок определяется по формуле

$$h \geq 1,53 \sqrt{\frac{R^*}{R_{\square}}}$$

Однако учитывая возможность смещения трафаретов в процессе напыления резистивных и проводящих пленок (при методе свободной маски), величину  $h$  необходимо брать не менее 0,2 мм.

Суммарная длина резистивной пленки с учетом длины контактных переходов определяется выражением  $l_2 = l + 2h$ .

Помимо контактных переходов пленочных резисторов в ГИС имеются контактные площадки для подсоединения выводов навесных компонентов и соединения схемы с выводами корпуса. Они должны обеспечивать не только хорошую адгезию к подложке и малое сопротивление, но и хороший контакт с присоединяемыми проводниками при пайке или термокомпрессии.

Перечисленным требованиям лучше всего удовлетворяют многослойные контактные площадки. В качестве первого слоя, называемого подслоем, способного образовывать прочное сцепление с подложкой и последующими слоями, используются тонкие (100...200 Å) металлические пленки, чаще всего пленки хрома, никрома или марганца. Нередко в качестве подслоя используют те же слои и материалы, из которых изготовлены резисторы.

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 из материала, обладающего устойчивостью к окислению и хорошей паяемостью и свариваемостью. Часто в качестве верхнего слоя используют никель, реже - золото.

### Оценка частотных свойств пленочных резисторов

В процессе эксплуатации интегральной микросхемы резисторы работают в цепях как постоянного, так и переменного токов, поэтому необходимо знать, каково комплексное сопротивление пленочного резистора токам высокой частоты. Резистор, имея конечные геометрические размеры, кроме активного сопротивления обладает собственными индуктивностью и емкостью. Полная эквивалентная схема пленочного резистора показана на рис. 3, а. Анализ такой схемы громоздок. Достаточно точно изменение сопротивления пленочного резистора можно описать по приближенной эквивалентной схеме (рис. 3, б), где  $R$  - сопротивление резистора постоянному току;  $C_n$  - собственная емкость с учетом емкости контактных площадок;  $L_n$  - собственная индуктивность резистора.

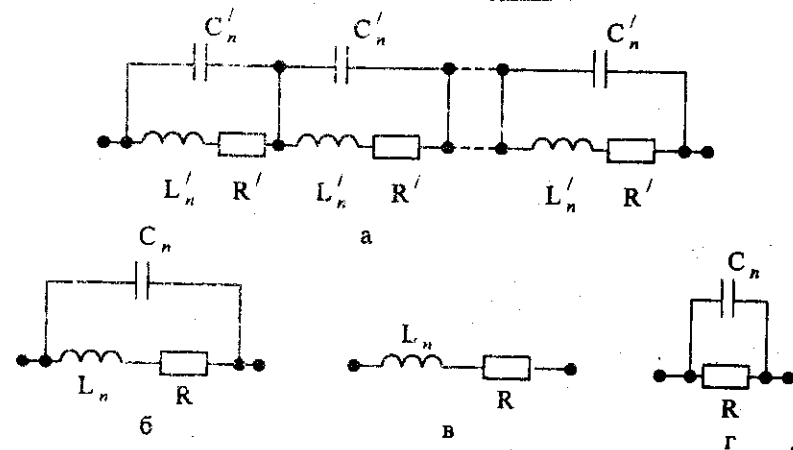


Рис. 3. Эквивалентная схема пленочного резистора: а - полная; б - упрощенная; в - для низкоомных резисторов; г - для высокоомных резисторов

Реальные конструкции пленочных резисторов имеют паразитные индуктивности до десятков наногенри и паразитные емкости до единиц пикофард. Следовательно, есть смысл индуктивную состав-

ляющую учитывать для резисторов малых номиналов, когда шунтирующим действием паразитной емкости можно пренебречь (рис. 3, в). Для высокоомных резисторов можно пренебречь индуктивной составляющей сопротивления, но учитывать шунтирующее действие паразитной емкости (рис. 3, г). При этом следует отметить, что для большинства резисторов (особенно типа "меандр") комплексное сопротивление носит емкостной характер.

Для низкоомных резисторов верхняя частота, до которой можно не учитывать паразитную индуктивность, определяется по формуле

$$f = \sqrt{\frac{\delta_R}{2}} \frac{R}{\pi L_{\Pi}}$$

Для высокоомных резисторов, где следует учитывать паразитную емкость, верхняя граничная частота определяется как

$$f \leq \sqrt{\frac{\delta_R}{2}} \frac{1}{\pi RC_{\Pi}}$$

Величины собственных значений паразитной емкости резистора  $C_{\Pi}$  и индуктивности  $L_{\Pi}$  зависят от конструкции резистора и контактных площадок и точно могут быть определены после выбора конструкции.

### Проектирование резисторов сложной формы

Установлено, что электрическое поле в резисторах сложной формы ("меандр", "змейка" и т.д.) неравномерно. Наибольшего значения градиент плотности тока достигает в местах излома или изгиба резистивной пленки. Неравномерность электрического поля приводит к изменению сопротивления пленочного резистора. В связи с этим расчет сопротивления резисторов сложной формы по длине геометрической средней линии является неточным.

Для расчета размеров резисторов сложной формы (например, изображенных на рис. 1, б, д) резистивная полоска условно разбивается на прямоугольные участки и элементы сопряжения типа изображенных на рис. 4, сопротивление которых рассчитывается по формулам

$$R = 2,55 R_{\square} \quad (\text{тип А}); \quad (14)$$

$$R = 4 R_{\square} \quad (\text{тип Б}); \quad (15)$$

$$R = \frac{1,57}{\ln \frac{r_1}{r_2}} R_{\square} \quad (\text{тип В}); \quad (16)$$

$$R = 3,86 R_{\square} \quad (\text{тип Г}). \quad (17)$$

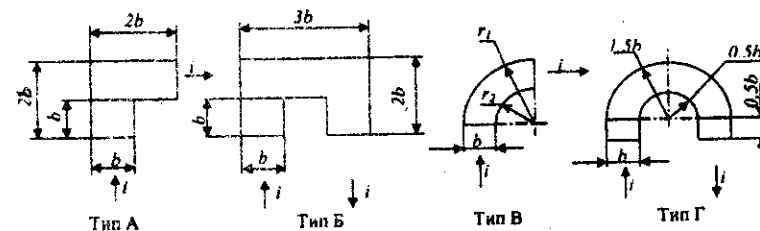


Рис. 4. Элементы сопряжения

Общее сопротивление резистора определяется как сумма сопротивлений всех элементов сопряжения и сопротивлений участков прямоугольной формы (рис. 5).

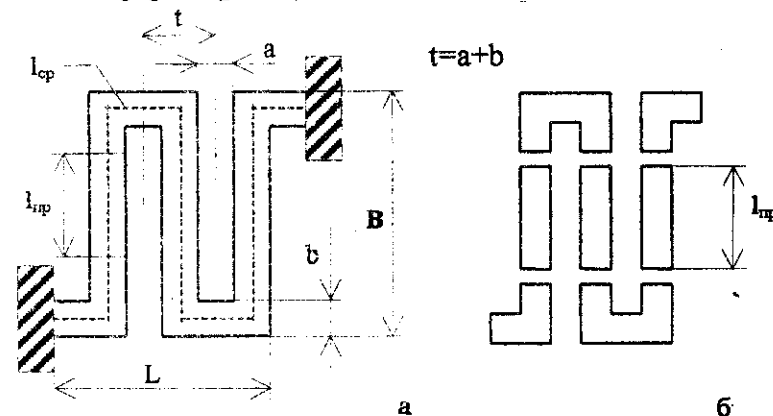


Рис. 5. Пленочный резистор сложной формы: а - реальная конструкция; б - условное представление в виде элементов сопряжения

Конструкция изогнутого пленочного резистора с прямоугольными (рис. 1, б) и криволинейными (рис. 1, д) перегибами имеет

конструктивно-технологические ограничения на размеры  $a$  и  $B$  (рис. 5, а). Например, при нанесении резистивного слоя через биметаллическую маску (трафарет) размер  $a$  определяется как минимально возможное расстояние между двумя щелями в маске, равное примерно  $2h_m$ , где  $h_m$  - толщина маски. Размер  $B$  ограничен необходимой жесткостью маски. Обычно придерживаются соотношения  $B/a \approx 10$ . Большое соотношение  $B/a$  не допускается также потому, что при нагревании маски в процессе напыления наблюдаются изгибы "язычков" и соответственно изменяются геометрические размеры резистивной пленки за счет подпыления наносимого материала под маску.

В конструкции резистора с металлическими перемычками (рис. 1, г) допускается соотношение  $B/a \approx 50$ , так как резистивные слои и перемычки формируются отдельно.

Оптимальное число звеньев "меандра" (или число перегибов) вычисляется приближенно по формуле

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\left(\frac{a}{2r}\right)^2 + \frac{l_{\text{ср}}}{t}} - \frac{a}{2r}, \quad (18)$$

в которой все обозначения соответствуют рис. 5, а. При  $L = B$  (проектируется "меандр" квадратной формы) и  $a = b$  можно использовать упрощенную формулу

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{\frac{K_{\Phi}}{2}}.$$

Значение  $n_{\text{опт}}$  округляют до ближайшего целого.

Длина прямоугольных участков определяется по формуле

$$l_{\text{пр}} = \frac{(R - \Sigma R_{\text{э.с}})b}{R_{\square} n_{\text{опт}}},$$

где  $\Sigma R_{\text{э.с}}$  - сумма сопротивлений элементов сопряжения (см. рис. 4; 5). Габаритные размеры резистивной пленки вычисляют по формулам

$$L = n_{\text{опт}} a + (n_{\text{опт}} + 1)b,$$

$$B = l_{\text{пр}} + 4b.$$

## Конструирование и расчет подготавливаемых пленочных резисторов

При изготовлении пленочных резисторов возникают погрешности как в воспроизведении формы, так и поверхностного удельного сопротивления  $R_{\square}$ . Если необходимо изготовить резисторы, допуск на номинал которых составляет единицы или доли процента, обеспечить точность за счет увеличения их размеров не всегда удастся. Как было показано, в знаменателе формул (11) и (12) появляется "ноль" или отрицательное число. В таких случаях применяют резисторы, номинал которых можно изменять после изготовления (рис. 6). Подгонять резистор можно в сторону увеличения номинала изменением коэффициента формы (разрывом замыкающих перемычек или удалением части резистивной пленки). Следовательно, расчетная величина сопротивления подготавливаемого пленочного резистора должна быть меньше номинального значения. При нормальном законе распределения погрешностей подавляющее число резисторов имеет поле рассеяния номинала в пределах  $\pm 3\bar{\sigma}_R$ , следовательно, расчетное значение сопротивления нерегулируемой части резистора можно определить по формуле

$$R_{\text{расч}} = \frac{R}{1 + 3\bar{\sigma}_R}, \quad (19)$$

где  $\bar{\sigma}_R$  - относительное среднеквадратическое отклонение номиналов резисторов для выбранного технологического процесса,

$$\bar{\sigma}_R = \sqrt{\bar{\sigma}_{R_{\square}}^2 + \left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2}. \quad (20)$$

Ширина резистора  $b$  при подгонке выбирается из соотношения

$$b = \max\{b', b''\}; \quad (21)$$

длина - только для расчета по формуле (20) - определяется как

$$l = bK_{\Phi},$$

где  $K_{\Phi} = \frac{R}{R_{\square}}$ .

В настоящее время известны различные способы подгонки сопротивления пленочных резисторов: лучом лазера, электрической искрой, факельным разрядом, механическим удалением слоя и др.

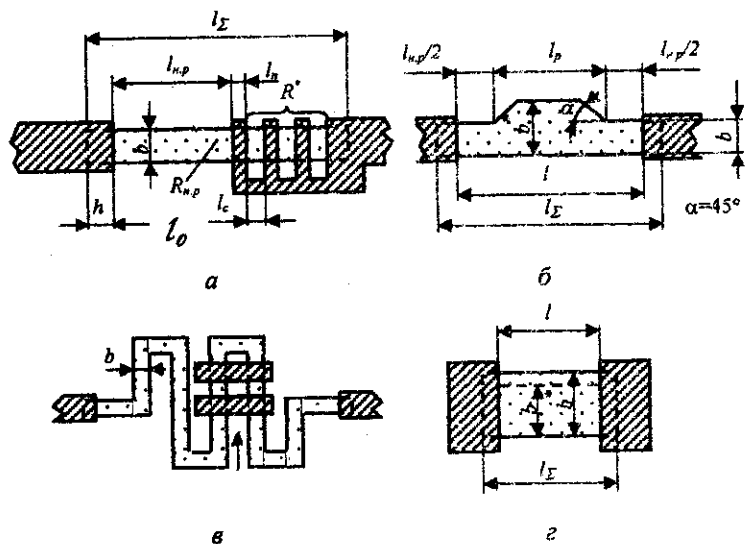


Рис. 6. Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

**Ступенчатая подгонка.** При конструировании резистора, подстраиваемого разрывом замыкающих перемычек, кроме  $R_{расч}$  (нерегулируемая часть), рассчитанного по формуле (19), необходимо иметь дополнительно замкнутый перемычками резистор (регулируемая часть)  $R^*$  (рис. 6, а, в). Расчетное значение  $R^*$  выбирается из условия

$$R = (R_{н.р.} + R^*)(1 - 3\bar{\sigma}_R). \quad (22)$$

Используя выражения (19) и (22), получаем

$$R^* = R \frac{6\bar{\sigma}_R}{1 - 9\bar{\sigma}_R^2}. \quad (23)$$

Количество секций  $n$ , из которых состоит  $R^*$ , выбирается таким, чтобы сопротивление каждой секции было не более абсолютного значения погрешности резистора при подгонке:

$$n = \frac{R^*(1 + 3\bar{\sigma}_R)}{\delta_R} = \frac{6\bar{\sigma}_R}{\delta_R(1 - 3\bar{\sigma}_R)}, \quad (24)$$

где  $\delta_R$  - абсолютная допустимая погрешность сопротивления резис-

тора, Ом;  $\delta_R = \bar{\delta}_R R$ ,  $\bar{\delta}_R$  - технологический допуск. Значения  $l_{н.р.}$  и  $l_c$  определяются по формулам

$$l_{н.р.} = \frac{R_{н.р.} \cdot b}{R_{\square}}; \quad l_c = \frac{R \cdot b}{R_{\square} n}.$$

При большом значении  $l_{н.р.}$  нерегулируемую часть резистора необходимо выполнить изогнутой.

Если длина подгоночной секции  $l_c$  окажется меньше 0,2 мм, число подгоночных секций  $n$  можно уменьшить, но не более, чем в 2 раза, однако точность подгонки при этом снизится. Если и при этом  $l_c < 0,2$  мм, то ее можно увеличить до 0,2 мм, пропорционально увеличив ширину резистора  $b$ , однако размеры подгоняемого участка резистора в этом случае могут значительно увеличиться. В том случае, когда указанные приемы все же не позволяют сделать  $l_c \geq 0,2$  мм, необходимо проектировать резистор с плавной подгонкой. При узком допуске на сопротивление резистора и плохой технологии расчетное число подгоночных секций может достигать десятков, что делает конструкцию громоздкой. В этом случае также необходимо выполнить ТПР с плавной подгонкой.

Ширина перемычек  $l_{п}$  выбирается равной 0,2...0,5 мм. Суммарная длина резистивной пленки  $l_{\Sigma} = l_{н.р.} + 2h + n(l_n + l_c)$ .

**Плавная подгонка.** Плавная подгонка применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить узкий допуск на сопротивление резистора. Точность плавной подгонки составляет доли процента. Наиболее приемлемая конструкция резистора с плавной подгонкой изображена на рис. 6, б. Ширина регулируемого участка  $b^*$  выбирается из следующих соображений: при малых значениях  $b^*$  мал диапазон регулировки, при больших значениях - увеличивается площадь регулировочной секции и снижается эффективность подгонки (съем одинаковой площади резистивной пленки отражается на изменении сопротивления при больших  $b^*$  меньше, чем при малых).

Углы расширения подстраиваемого участка рекомендуется выбирать в пределах 40...50°. 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 значение сопротивления  $R$ , Ом и допуск  $\bar{\delta}_R$ , %;
- сопротивление квадрата пленки  $R_{\square}$ , Ом;
- среднеквадратическое отклонение сопротивления квадрата пленки  $\bar{\sigma}_{R_{\square}}$ ;
- ширина резистора  $b$ , мм, определяемая из соотношения (21);
- среднеквадратическое отклонение ширины  $\sigma_b$ , мм.

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

$$l_{\min} = \frac{R(1 - \bar{\delta}_R)(b + 3\sigma_b)}{R_{\square}(1 - 3\bar{\sigma}_{R_{\square}})}, \quad (25)$$

тогда  $l = l_{\min} + 3\sigma_l$ .

Если же в процессе изготовления резистора величина  $b$  примет минимальное, а  $R_{\square}$  - максимальное значение, то сопротивление определяется по формуле

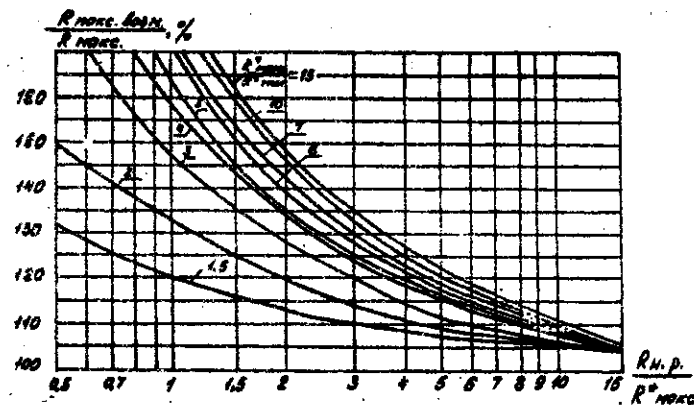
$$R_{\max \text{ возм}} = \frac{R_{\square}(1 + 3\bar{\sigma}_{R_{\square}})l}{b - 3\sigma_b}$$

Если окажется, что  $R_{\max \text{ возм}} > R_{\max}$ , где  $R_{\max} = R(1 + \bar{\delta}_R)$ , то необходимо предусмотреть регулирующую секцию, наличие которой позволило бы уменьшить величину  $R_{\max \text{ возм}}$  до  $R_{\max}$ .

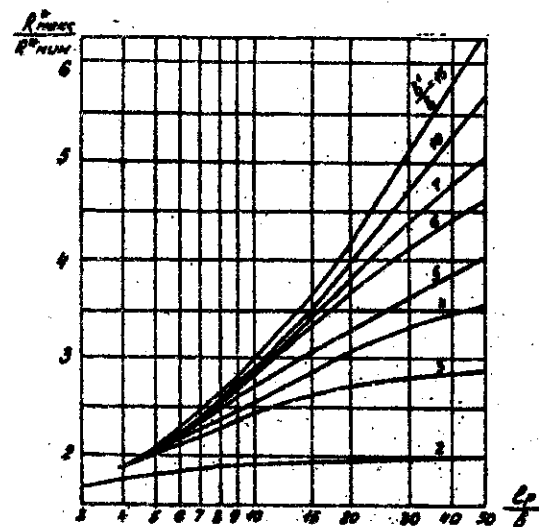
Следует отметить, что при изготовлении точных резисторов необходимо выбирать материал и режимы техпроцессов изготовления такими, чтобы выполнялось неравенство  $\bar{\delta}_{R_f} + \bar{\delta}_{R_{ст}} \leq \bar{\delta}_R$ , в противном случае никакая подгонка не поможет. Номинал резистора будет уходить за пределы допуска под действием температуры окружающей среды и старения.

Расчет размеров регулируемой секции производится следующим образом:

1. Вычисляется отношение  $\frac{R_{\max \text{ возм}}}{R_{\max}}$ . По графикам рис. 7, а выбирается из конструктивно-технологических соображений отношение  $\frac{R_{\max}^*}{R_{\min}^*}$  (кривая) и с учетом отношения  $\frac{R_{\max \text{ возм}}}{R_{\max}}$  определяется



а



б

Рис. 7. Графики для расчета точных подгоняемых тонкопленочных резисторов

отношение  $\frac{R_{н.р}}{R_{\max}^*}$ , здесь  $R_{н.р}$  - сопротивление нерегулируемого участка резистора,  $R_{\max}^*$  и  $R_{\min}^*$  - максимальное и минимальное сопротивления участка резистора, на котором есть подстраиваемая секция. Сопротивление  $R_{\max}^*$  соответствует сопротивлению этого участка при полностью удаленной подстроечной секции. Необходимая степень подгонки может быть обеспечена при различных отношениях  $\frac{R_{\max}^*}{R_{\min}^*}$

и  $\frac{R_{н.р}}{R_{\max}^*}$ . Нетрудно заметить, что

$$\frac{R_{н.р}}{R_{\max}^*} = \frac{l_{н.р}}{l_p} = \frac{l - l_p}{l_p},$$

откуда получаем

$$l_p = \frac{l}{1 + R_{н.р} / R_{\max}^*}. \quad (26)$$

Если значение  $l_p$  велико, следует подумать о смене величины  $R_{\square}$  для всей группы резисторов.

2. В зависимости от выбранного отношения  $\frac{R_{\max}^*}{R_{\min}^*}$  и отношения  $l_p / b$ , которое можно получить, определив из выражения (26) величину  $l_p$ , по графикам рис. 7, б находится отношение  $b^* / b$  и вычисляется  $b^*$  - ширина резистора на подстраиваемом участке.

Если  $K_{\phi} < 10$ , использование графиков (см. рис. 7, а, б) затруднительно. В таких случаях целесообразно применить конструкцию резистора с плавной подгонкой, изображенную на рис. 6, г. Ширина  $b$  и длина  $l$  находятся из соотношений (21) и (25) соответственно, а величина  $b^*$  определяется по формуле

$$b^* = \frac{lR_{\square}(1 + 3\bar{\sigma}_{R_{\square}})}{R(1 + \bar{\delta}_R)} + 3\sigma_b.$$

В технологической документации на подгонку таких резисторов необходимо указывать, что уменьшение ширины ТПР возможно только до величины  $b$ . Следует помнить, что  $l_{\Sigma} = l + 2h$ .

## КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### Конструктивно-технологические особенности

Конденсаторы являются широко распространенными элементами пленочных микросхем. По конструктивному признаку тонкопленочные конденсаторы (ТПК) можно разделить на три группы: однослойные, многослойные и гребенчатые [3]. Однослойными принято считать такие конденсаторы, которые состоят из двух обкладок и одного слоя диэлектрика (рис. 8, а, б, в). Многослойные конденсаторы имеют более чем один слой диэлектрика (рис. 8, г). Конструктивной особенностью гребенчатых конденсаторов является одностороннее расположение обкладок (рис. 8, д). 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. 4. 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/кв. 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<sup>2</sup>, то ТПК проектируют в виде однослойной конструкции, изображенной на рис. 8, а. Если же полезная площадь конденсатора получается меньше 5 мм<sup>2</sup>, необходимо выбрать меньшее значение удельной емкости  $C_0$ . Конденсаторы с малой величиной емкости рекомендуется проектировать в виде двух пересекающихся проводящих пленок, разделенных слоем диэлектрика или в виде "гребенки". Если расчетная площадь ТПК меньше 1 мм<sup>2</sup>, то его можно выполнить в виде последователь-

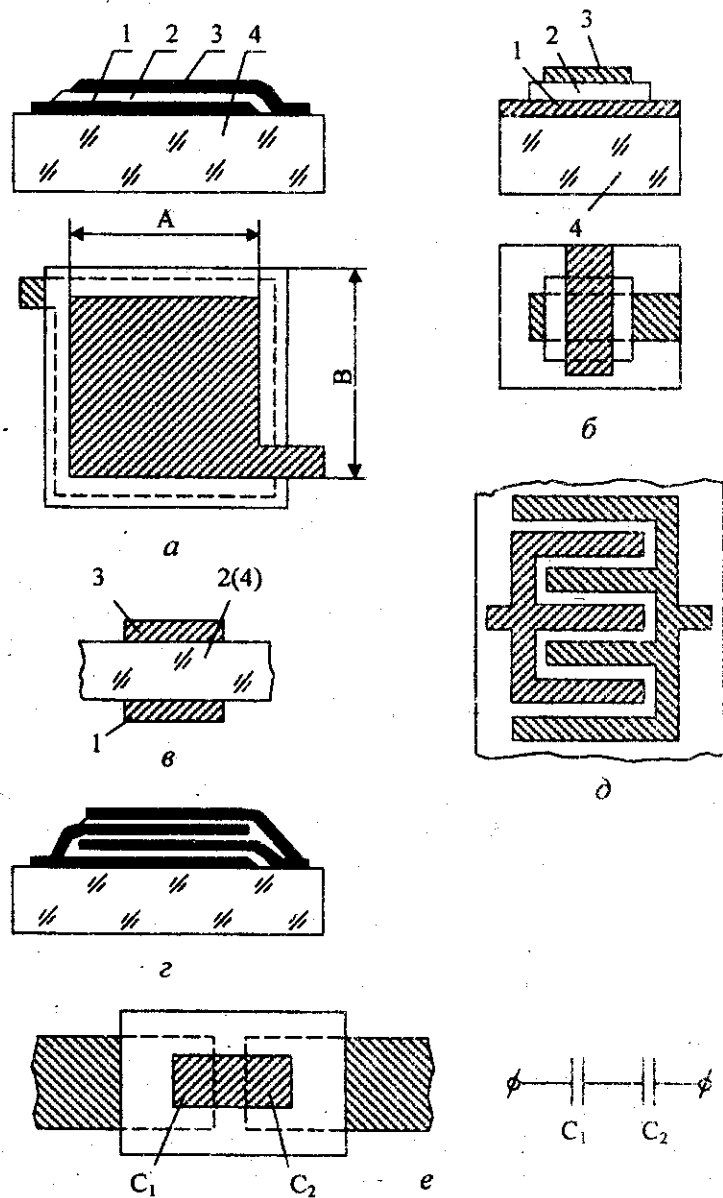


Рис. 8. Конструкции ТПК: а - однослойный; б - малой емкости; в - двухсторонняя конструкция; г - многослойный; д - гребенчатый; е - последовательное соединение двух ТПК; 1 - нижняя обкладка; 2 - диэлектрик; 3 - верхняя обкладка; 4 - подложка

Таблица 4

Основные характеристики диэлектрических материалов ТПК

Материал диэлектрика	Материал обкладок	$R_{\square}$ , Ом/□	$C_0$ , пФ/см <sup>2</sup>	$U_{\text{раб}}$ , В	$s$ при $f = 1 \text{ кГц}$	$\lg \delta$ при $f = 1 \text{ кГц}$	$E_{\text{пр}}$ , В/см	$\alpha_c, 1/^\circ\text{C}$ (-60...+125°C)	$\bar{\delta}_{C_{\text{ст}}}, \%$ за 1000 ч
Монокись кремния ЕКО.028.004 ТУ	Алюминий А-99, ГОСТ 11069-64	0,2	5000	60	5,0...6,0	0,01...0,02	(2...3)10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	±(1,5...6)
			10000	30					
Монокись германия ЕТО.021.014 ТУ	То же	0,2	5000	10	11...12	0,005...0,007	1·10 <sup>6</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	-1,0
			10000	7					
			15000	5					
Боросиликатное стекло ЕТО.035 ТУ	--	0,2	2500	24	4	0,001...0,0015	(3...4)10 <sup>6</sup>	0,35·10 <sup>-4</sup> при +25...+125°C	±1,0
			5000	15					
Стекло электровакуумное, С41-1, НПО.027.600	--	0,2	15000	12,6	5,2	0,002...0,003	(3...4)10 <sup>6</sup>	(0,5...1,0)10 <sup>-4</sup> при -60...+25°C;	±1,0
			20000	10...12,6					
			30000	6,3...10				(1,5...1,8)10 <sup>-4</sup> при +25...+125°C;	
			40000	6,3					

но соединенных ТПК (рис. 8, е). 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.

Исходными данными для расчета пленочных конденсаторов являются:

**электрические**

$C_i$  - номинал емкости ТПК, пФ;

$U_{Pi}$  - рабочие напряжения ТПК, В;

$\bar{\delta}_{C_i}$  - допустимые относительные отклонения номиналов ТПК, %;

**эксплуатационные**

$t_{\max}$  - максимальная температура окружающей среды, °С;

$T$  - время эксплуатации, ч;

**технологические**

$\bar{\sigma}_{C_0}$  - относительное среднеквадратическое отклонение удельной емкости;

$\sigma_A, \sigma_B$  - абсолютные среднеквадратические отклонения размеров верхней обкладки, мм;

$r$  - коэффициент корреляции между отклонениями размеров верхней обкладки;

$\Phi_c$  - вероятность выхода годного конденсатора ( $\Phi_c = 0,7 \dots 1$ );

$d'$  - минимальная допустимая толщина диэлектрической пленки конденсатора, мкм.

Среднестатистические значения отклонений технологических параметров пленочных конденсаторов для различных видов технологии приведены в табл. 5.

Таблица 5

Погрешности воспроизведения технологических параметров пленочных конденсаторов

Вид технологии изготовления	$\sigma_A, \sigma_B, \text{мм}$	$\bar{\sigma}_{C_0}$	$r$	$d', \text{мкм}$
Метод свободной маски	0,01...0,07	0,03...0,07	0,8...1	0,3...0,5
Танталовая технология	0,003...0,007	0,03...0,07	0,8...1	0,1...0,3

В результате расчетов необходимо определить величину  $C_0$  и размеры А и В.

### Выбор материала диэлектрика

Проектирование однослойных ТПК следует начинать с выбора типа конструкции и материала диэлектрической пленки (см. табл. 4). При этом необходимо учитывать номинальное значение емкости, требования к стабильности, условия эксплуатации и технологичность изготовления ТПК. Для выбранного материала определяются технологические и эксплуатационные характеристики:

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$E_{пр}$  - электрическая прочность материала диэлектрика, В/см;

$\alpha_c$  - температурный коэффициент емкости конденсатора;

$\bar{\delta}_{C_{ст}}$  - относительное изменение емкости во времени, %.

### Определение технологического допуска

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. Эту погрешность можно исключить, увеличив размеры нижней обкладки. Кроме того, в условиях эксплуатации на ТПК будет воздействовать температура окружающей среды и он будет со временем "стареть". Для того, чтобы в течение времени эксплуатации в реальных условиях емкость ТПК не выходила за пределы допуска  $\bar{\delta}_{C_{доп}}$ , расчетное значение допуска  $\bar{\delta}_C$  (технологический допуск) должно быть меньше, т.е.

$$\bar{\delta}_C = \bar{\delta}_{C_{доп}} - \bar{\delta}_{C_t} - \bar{\delta}_{C_{ст}}, \quad (27)$$

где  $\bar{\delta}_{C_t}$  - относительное изменение емкости ТПК при воздействии окружающей среды,

$$\bar{\delta}_{C_t} = \alpha_c (t_{\max} - 20^\circ).$$

### Определение удельной емкости ТПК

В общем случае емкость ТПК можно вычислить по формуле

$$C = 0,0885 \frac{\epsilon S (n-1)}{d} = C_0 S, \quad (28)$$



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

Формула (28) 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 (составляет доли пикофарады).

Конструктивные формы ТПК могут быть различными, однако с точки зрения простоты расчетов и удобства размещения ТПК на подложке наиболее приемлемой является прямоугольная конструкция с размерами верхней обкладки  $A$  и  $B$ . В этом случае коэффициент формы ТПК можно выразить отношением

$$K_{\Phi} = A/B.$$

Известно, что погрешность емкости ТПК при одних и тех же абсолютных погрешностях выполнения размеров верхней обкладки будет минимальной при  $A = B$ , т.е. при  $K_{\Phi} = 1$ .

Величина удельной емкости  $C_0$  определяется из соотношения

$$C_0 = \min \{C'_0, C''_0, C'''_0\}. \quad (29)$$

Величины  $C'_0$  и  $C''_0$  вычисляются по формуле

$$C_0 = 0,0885 \frac{\epsilon}{d}. \quad (30)$$

При определении  $C'_0$  в знаменатель выражения (30) необходимо подставить значение  $d'$  - минимальную допустимую толщину диэлектрической пленки (см. табл. 5).

При определении  $C''_0$  в знаменатель выражения (30) подставляется величина

$$d'' = \frac{K_3 U_p}{E_{цр}}, \quad (31)$$

где  $K_3 = 2...4$  - коэффициент запаса электрической прочности ТПК. Величина  $C'''_0$  определяется из условия обеспечения заданной точности ТПК.

Величина  $C'''_0$  и соответственно размеры ТПК должны быть такими, чтобы его емкость при заданных технологических погрешностях  $\bar{\sigma}_{C_0}$ ,  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$  с заданной вероятностью  $\Phi_c$  попала в заданный допуск  $\pm \bar{\delta}_C$ .

При точностных расчетах ТПК, если задана вероятность выхода (изготовления)  $\Phi_c$  годного ТПК, допустимое значение среднеквадратического отклонения емкости при нормальном законе распределения погрешностей определяется по формуле

$$\bar{\sigma}_{C_{\text{доп}}} = \frac{\bar{\delta}_C}{Z\sqrt{2}}, \quad (32)$$

где  $Z$  - значение аргумента интеграла вероятностей (см. табл. 3);

$\bar{\delta}_C$  - технологический допуск, определяемый из выражения (27).

Истинное значение  $\bar{\sigma}_C$ , получаемое в результате изготовления ТПК, учитывая, что  $C = C_0 S$ , можно определить по формуле

$$\bar{\sigma}_C^2 = \bar{\sigma}_{C_0}^2 + \bar{\sigma}_S^2, \quad (33)$$

где  $\bar{\sigma}_{C_0}$  - дисперсия значений удельной емкости ТПК, определяемая экспериментально при отладке техпроцесса изготовления ТПК, зависит от точности воспроизведения толщины и свойств диэлектрической пленки ТПК;  $\bar{\sigma}_S^2$  - дисперсия значения площади ТПК, зависящая от точности выполнения размеров ТПК.

Так как площадь ТПК  $S = AB$ , а размеры  $A$  и  $B$  верхней обкладки ТПК получаются в едином технологическом процессе, в расчетах  $\bar{\sigma}_S$  на основе теории вероятностей необходимо учитывать коэффициент корреляции между отклонениями размеров  $A$  и  $B$ . Поэтому [4]

$$\bar{\sigma}_S^2 = \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + 2r_{AB} \left(\frac{\sigma_A}{A}\right) \left(\frac{\sigma_B}{B}\right), \quad (34)$$

где  $r_{AB}$  - коэффициент корреляции между отклонениями размеров  $A$  и  $B$ ;  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$  - абсолютные среднеквадратические отклонения размеров верхней обкладки.

Так как эти отклонения получаются в процессе одной технологической операции, можно считать  $\sigma_A = \sigma_B = \sigma_l$ .

Получаемая в процессе изготовления величина  $\bar{\sigma}_C$  не должна превышать  $\bar{\sigma}_{C_{\text{доп}}}$ , определяемую по формуле (32), т.е. должно выполняться неравенство  $\bar{\sigma}_C \leq \bar{\sigma}_{C_{\text{доп}}}$ . Следовательно, с учетом соотношения (33) для расчетов можно принять

$$\bar{\sigma}_S^2 = \bar{\sigma}_{C_{\text{доп}}}^2 - \bar{\sigma}_{C_0}^2. \quad (35)$$

Подставляя полученное из (35) значение  $\bar{\sigma}_S^2$  в (34) и заменяя величину  $B$  на  $B = A/K_\Phi$ , получим уравнение с одним неизвестным  $A$ . Значения  $\bar{\sigma}_{C_0}$ ,  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$  заданы или выбираются из табл. 5. Решение уравнения (34) относительно  $A$  позволяет найти один из размеров верхней обкладки ТПК

$$A = \frac{\sigma_I \sqrt{1 + K_\Phi (K_\Phi + 2r_{AB})}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{C_{\text{доп}}}^2 - \bar{\sigma}_{C_0}^2}}; \quad (36)$$

при  $K_\Phi = 1$  (квадратная форма верхней обкладки) получим

$$A = \frac{\sigma_I \sqrt{2(1 + r_{AB})}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{C_{\text{доп}}}^2 - \bar{\sigma}_{C_0}^2}}. \quad (37)$$

Второй размер верхней обкладки определяем как  $B = A/K_\Phi$ .

Площадь ТПК, при которой обеспечивается заданная точность:

$$S = AB, \quad (38)$$

а величина удельной емкости  $C_0''' = C/S$ .

Подставив величину  $C_0'''$  в (29), получим значение  $C_0$ , а из соотношения  $S = \frac{C}{C_0}$  - площадь ТПК. Задаваясь одним из размеров верхней обкладки ( $A$  или  $B$ ) из (38) найдем другой размер.

Если в схеме несколько ТПК, то  $C_0$  определяется для каждого из них, затем выбирается наименьшее значение. Оно и принимается за значение  $C_0$  для всех ТПК.

### Расчет и конструирование подстраиваемых ТПК

В тех случаях, когда в ГИС требуется изготовить ТПК с высокой точностью (единицы и доли процента), применяют конструкции ТПК с подгонкой (рис. 9). Переходить к расчету ТПК с подгонкой необходимо в том случае, когда при определении размеров обкладки по формулам (36) или (37) в знаменателе этих выражений получается "ноль" или отрицательное число.

Если конструируется ТПК с плавной подгонкой, то конструкция его может быть такой, как на рис. 8, а или на рис. 9, а. Процесс подгонки заключается в удалении части верхней обкладки ТПК при помощи электроэрозии или факельным разрядом. Расчетное значение емкости такого ТПК определяется по формуле

$$C_{\text{расч}} = \frac{C}{1 - 3\bar{\sigma}_C},$$

где  $C$  - номинальное значение емкости ТПК;  $\bar{\sigma}_C$  - относительное среднеквадратическое отклонение емкости ТПК после изготовления.

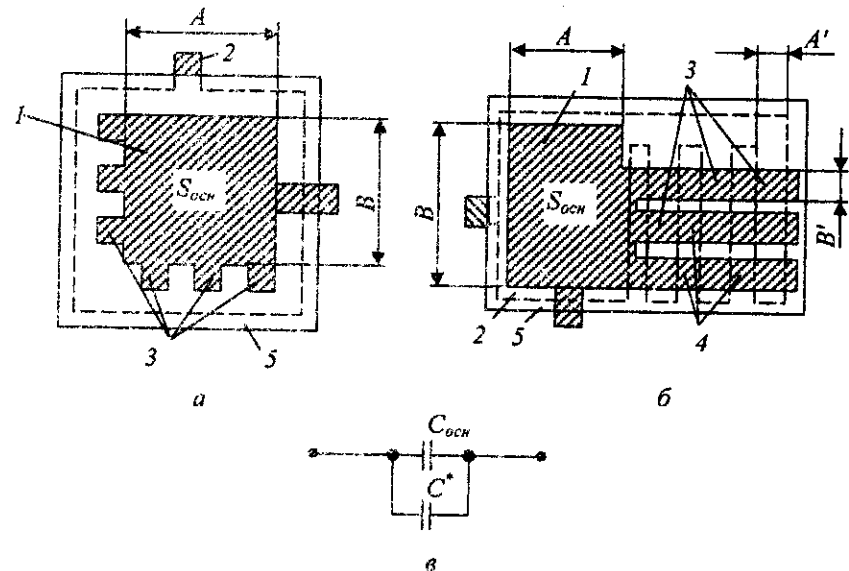


Рис. 9. Конструкции подгоняемых ТПК: а - с плавной подгонкой; б - со ступенчатой подгонкой; в - эквивалентная схема; 1 - верхние обкладки ТПК; 2 - нижние обкладки ТПК; 3 - подгоночные секции; 4 - места разрыва перемычек; 5 - диэлектрик

Для выбранного техпроцесса  $\bar{\sigma}_C$  находится из соотношений (33) и (34); при этом предварительно необходимо определить

$$C_0 = \min\{C'_0, C_0''\},$$

$$S = C / C_0,$$

$$B = \sqrt{S / K_{\Phi}},$$

$$A = BK_{\Phi}.$$

Величины  $\sigma_A$ ,  $\sigma_B$ ,  $r_{AB}$  и  $K_{\Phi}$  заданы или выбраны ранее.

При конструировании ТПК со ступенчатой подгонкой (рис. 9, б) ненастраиваемую часть  $C_{осн}$  определяют по формуле

$$C_{осн} = \frac{C}{1 - 3\bar{\sigma}_C},$$

откуда

$$S_{осн} = \frac{C_{осн}}{C_0}, \quad B = \sqrt{S_{осн} / K_{\Phi}}, \quad A = BK_{\Phi}.$$

Величина емкости подстраиваемой части ТПК, состоящей из секций, определяется из выражения

$$C^* = C \frac{6\bar{\sigma}_C}{1 - 9\bar{\sigma}_C^2},$$

а необходимое число секций

$$n = \frac{6\bar{\sigma}_C}{\delta_C(1 - 3\bar{\sigma}_C)}.$$

Площадь одной подгоночной секции вычисляется по формуле

$$S_C = \frac{C^*}{nC_0},$$

размеры  $A'$  и  $B'$  определяются конструктором ( $A'B' = S_C$ ). Размеры  $A'$  и  $B'$  не рекомендуется брать меньше 0,2 мм. Если это условие не удастся выполнить, то следует использовать ТПК с плавной подгонкой (рис. 9, а).

#### Расчет конструкции компланарного конденсатора

Компланарные конденсаторы (рис. 10) используются в колебательных LC-контурах на основе плоских спиральных индуктивностей для частот более 50 МГц и в интегральных микросхемах СВЧ-диапазона. Обкладки этих конденсаторов расположены на подложке в одной плоскости и разделены небольшим зазором. Часть электрического поля конденсатора проходит по подложке, часть по воздуху или защитному слою.

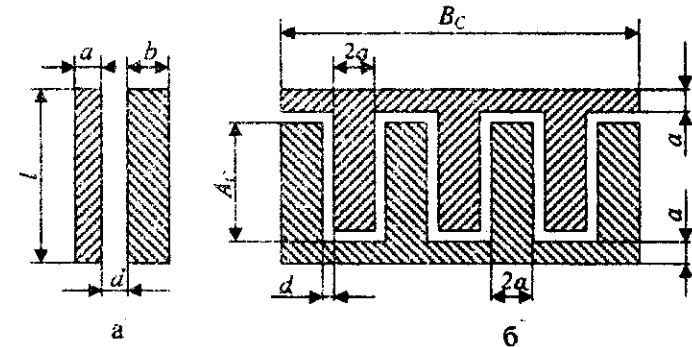


Рис. 10. Конструкции компланарного конденсатора: а - в виде параллельных полосок; б - в виде гребенки

Емкость компланарного конденсатора рассчитывается [2] по формуле  $C = \beta \epsilon_p l$ , где  $\epsilon_p$  - расчетное значение диэлектрической проницаемости,  $\epsilon_p = \frac{\epsilon_{II} + \epsilon_3}{2}$ ;  $\epsilon_{II}$ ,  $\epsilon_3$  - диэлектрическая проницаемость подложки и защитного слоя соответственно;  $\beta$  - коэффициент, зависящий от соотношения размеров  $a$ ,  $b$  и  $d$ ;  $l$  - длина совместной границы обкладок.

Коэффициент  $\beta$  при  $d \ll a$  и  $d \ll b$  определяется из выражения

$$\beta = 1,3 \cdot 10^{-2} \lg \left[ 16 \frac{\left(1 + \frac{a}{d}\right) \left(1 + \frac{b}{d}\right)}{1 + \frac{a}{d} + \frac{b}{d}} \right].$$

Произведение коэффициентов  $\beta$  и  $\epsilon_p$  составляет погонную емкость конденсатора, показанного на рис. 10, а:  $C_l = \beta \epsilon_p$ .

Полная емкость  $C = C_l l$ .

При расчете конструкции компланарных конденсаторов размеры  $a$  и  $b$  следует брать в 3-5 раз больше зазора  $d$ , который, в свою очередь, определяется разрешающей способностью технологического процесса изготовления. Разработка конструкции конденсатора начинается с определения  $d$ ,  $a$  и  $b$ , затем определяются значения  $\beta$ ,  $\epsilon_p$  и

$C_1$  и длина совместной границы обкладок  $l$ . Удельная емкость компланарных конденсаторов составляет 1-3 пФ/см<sup>2</sup>. Если длина  $l$  окажется значительной, компланарный конденсатор выполняется в виде конструкции, показанной на рис. 10, б. Размер  $B_c$  определяется из конструктивных соображений, размер  $A_c$  по формуле

$$A_c = \frac{l - B_c}{n - 1},$$

где  $n$  (число "пальцев" ТПК) определяется из выражения

$$n = \frac{B_c + d}{2a + d}.$$

### Добротность ТПК

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

$$Q = \frac{1}{\text{tg}\delta}. \quad (39)$$

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  $R_{\text{д}}$  и эквивалентного сопротивления потерь в металлических элементах конденсатора  $R_{\text{э.м}}$  (рис.11).

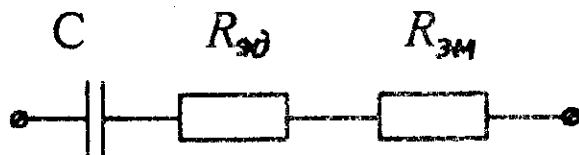


Рис. 11. Эквивалентная схема ТПК

Тангенс угла потерь можно представить в виде суммы:

$$\text{tg}\delta = \text{tg}\delta_{\text{д}} + \text{tg}\delta_{\text{м}},$$

где  $\text{tg}\delta_{\text{д}}$  - тангенс угла потерь в диэлектрических материалах;

$\text{tg}\delta_{\text{м}}$  - тангенс угла потерь в металлических элементах ТПК.

Значения  $\text{tg}\delta_{\text{д}}$  для некоторых диэлектрических материалов приведены в табл. 4. Величина  $\text{tg}\delta_{\text{м}}$  может быть вычислена по формуле

$$\text{tg}\delta_{\text{м}} = \omega C r_{\text{э.м}},$$

где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота;  $f$  - рабочая частота, Гц;  $C$  - емкость конденсатора, Ф;  $r_{\text{э.м}}$  - эквивалентное сопротивление потерь переменному току в обкладках и выводах,  $r_{\text{э.м}} = r_{\text{э.обкл}} + r_{\text{э.выв}}$ . Сопротивление выводов ТПК определяется выражением  $r_{\text{э.выв}} = R_{\square \text{выв}} K_{\text{ф.выв}}$ , а эквивалентное сопротивление обкладок ТПК переменному току можно определить как

$$r_{\text{э.обкл}} = \frac{2}{3} R,$$

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

$$R = R_{\square \text{обкл}} K_{\text{ф.обкл}}. \quad (40)$$

Формула (40) справедлива, если выполняется условие  $\omega RC \leq 0,04$ , при котором распределение тока в обкладках подчинено линейному закону.

После преобразования формула (39) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{1}{\text{tg}\delta_{\text{д}} + \omega C R_{\square \text{обкл}} \left( \frac{2}{3} K_{\text{ф.обкл}} + K_{\text{ф.выв}} \right)}.$$

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

$$R_{\square \text{обкл}} = R_{\square \text{выв}}.$$

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

## Конструктивно-технологические особенности

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. Наибольшее распространение в мегагерцевом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рис. 12). Ограниченные размеры подложек пленочных микросхем и конечная ширина проводящей полоски не позволяют изготовить 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  $\tau$ ;
- ширину витка  $b$ ;
- толщину витка  $a$ ;
- внутренний диаметр катушки  $D_1$ ;
- число витков  $N$ .

При проектировании пленочных катушек индуктивности нужно учитывать следующие положения.

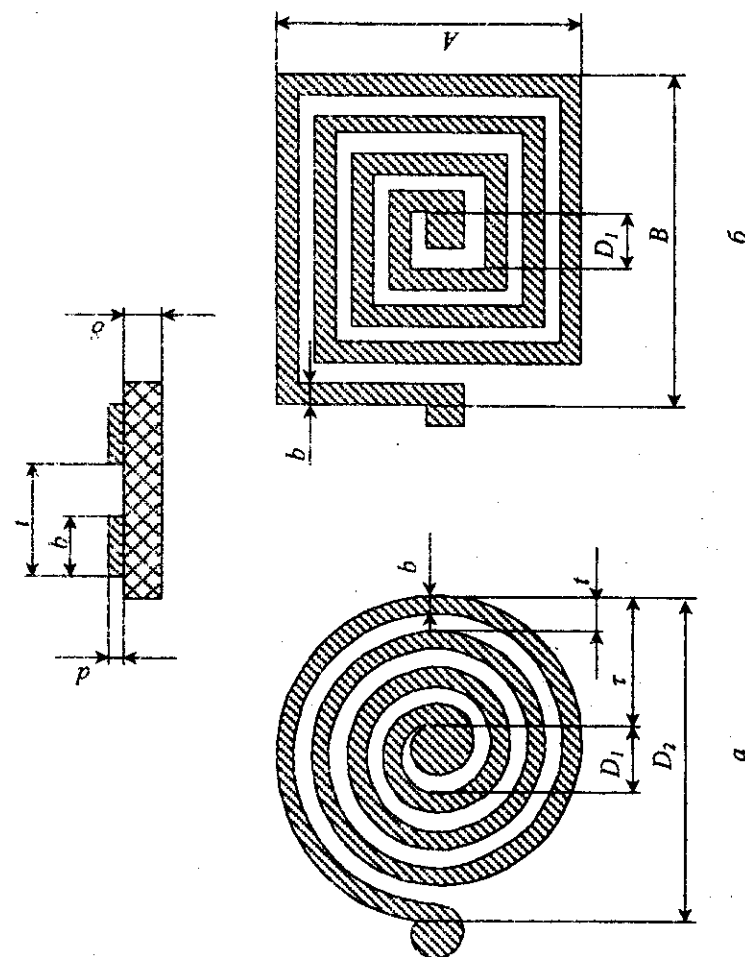


Рис. 12. Пленочные катушки индуктивности: а - круглая спираль; б - квадратная спираль

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 круглой, добротность ее на 10% ниже.

#### Порядок расчета пленочных катушек индуктивности

При конструировании и расчете 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 значений  $L$  и  $Q$ . Зависимость индуктивности и добротности плоских катушек, расположенных на расстоянии  $h$  от металлической поверхности, приведена на рис. 13, 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 значения  $L$  и  $Q$  должны быть перед конструктивным расчетом катушек индуктивности увеличены с учетом размагничивающего влияния металлических поверхностей в соответствии с экспериментальными данными (см. рис. 13).

Расчет ведется 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

$$t = k \frac{D_1 \sqrt{D_1}}{\sqrt{L}}, \quad (41)$$

где  $L$  - индуктивность катушки, мкГн;  $D_1$  - внутренний диаметр катушки, мм;  $k$  - коэффициент, зависящий от отношения  $D_2/D_1$ , определяется по графику рис. 14.

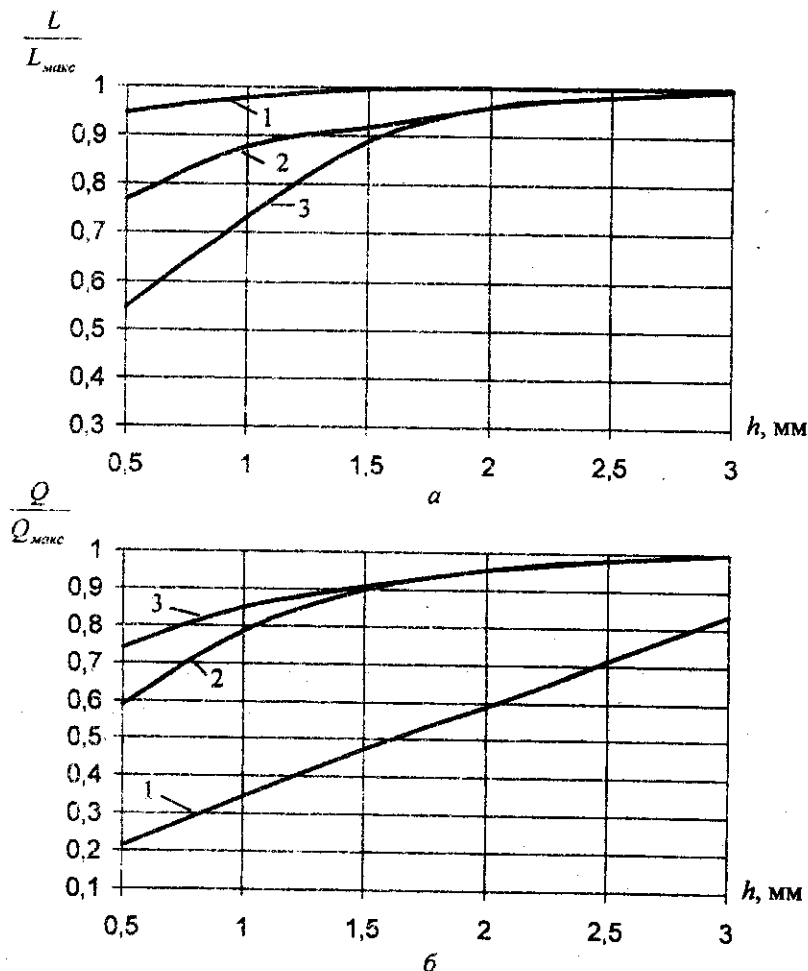


Рис. 13. Влияние плоских металлических поверхностей на индуктивность (а) и добротность (б): 1 - алюминиевая пленка на частотах 20...100 МГц; 2, 3 - латунный лист на частотах 20 и 100 МГц

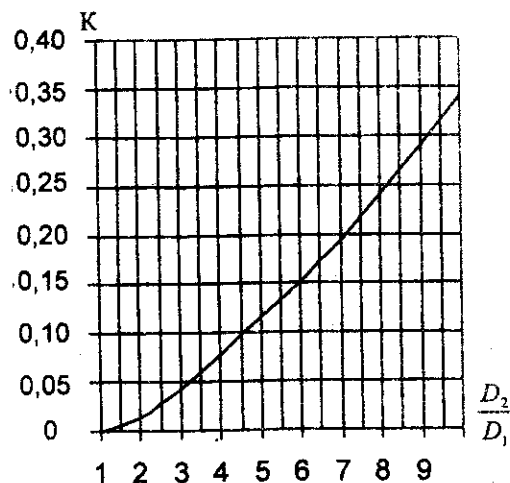


Рис. 14. Зависимость коэффициента  $K$  от размеров пленочной катушки

3. Из условия  $d > (2...4)d_c$  определяется толщина проводника катушки  $d$ , здесь  $d_c$  - толщина слоя скин-эффекта, 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  $k_1 = 0,51$ ;  $\lambda$  - длина волны, см,  $\lambda = c/f$ .

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

$$b = \frac{\rho t \left[ \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right] Q \cdot 10^4}{16 f D_1 k^2 d}, \quad (42)$$

где  $b$  - ширина витка, мм;  $\rho$  - 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. 14;  $d$  - толщина проводника катушки, мкм.

Так как формула (42) выведена без учета влияния скин-эффекта, то ширину витка, рассчитанную по этой формуле, следует увеличить и выбрать равной (1,5...2)  $b$  для  $d = (2...4)d_c$ . Если новое значение ширины витка  $b'$  получится больше значения  $t$ , следует, оставляя прежним внутренний размер спирали  $D_1$  и задавая шаг спирали  $t > b'$ , из формулы (41) определить внешний размер спирали  $D_2$ , при котором можно получить заданную индуктивность, а затем по формуле (42) определить ширину витков  $b$ .

5. Определяется число витков по формуле

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

где  $t$  - шаг спирали.

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.

### Библиографический список

1. Дачко И.Е., Попов А.Г., Кожевникова Т.Я. Высшая математика в упражнениях и задачах: Учеб. пособие для студентов вузов. В 2-х ч. Ч.П. 4-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 1986.
2. Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технологии микросхем. М.: Сов. радио, 1980. 256 с.
3. Коледов Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1989.
4. Пьянков Б.А. Конструирование микросхем частного применения. Казань: КАИ, 1979. 48 с.

Учебное издание

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ  
ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Составители: *Меркулов Анатолий Игнатьевич*  
*Дмитриев Василий Дмитриевич*

Редактор Н. С. К у р и я н о в а

Компьютерный набор и верстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 28.05.2002 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,56. Усл. кр.-отт. 2,68. Уч.-изд. л. 2,75.

Тираж 150 экз. Заказ **48** . Арт. С-17(Д1)/2002.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет им. академика С. П. Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

РИО Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.