

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА**

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ
ПАССИВНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
И МИКРОСБОРОК**

КУЙБЫШЕВ 1987

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

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

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАССИВНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
И МИКРОСБОРОК

У т в е р ж д е н о
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к курсовому проектированию
для студентов

Куйбышев 1987

УДК 621.382 (075)

В методических указаниях излагаются конструктивно-технологические особенности и основные способы расчета пассивных элементов гибридных интегральных микросхем (ГИМС) и микропроцессоров.

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

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

Рецензенты: В.В.Пахомов, С.М.Тоскин

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПАСИВНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И МИКРОСБОРОК

Редактор Е.Д.Антонова
Техн.редактор Н.М.Каленюк
Корректор А.П.Захардяева

Подписано в печать 11.12.87. Формат 60x84 1/16.

Бумага оберточная белая. Печать оперативная.

Усл.п.л. 2,3. Уч.-изд.л. 2,0. Т.500 экз.

Заказ 2198. Бесплатно.

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

Типография им. Мяги Куйбышевского полиграфического объединения, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Конструктивно-технологические особенности

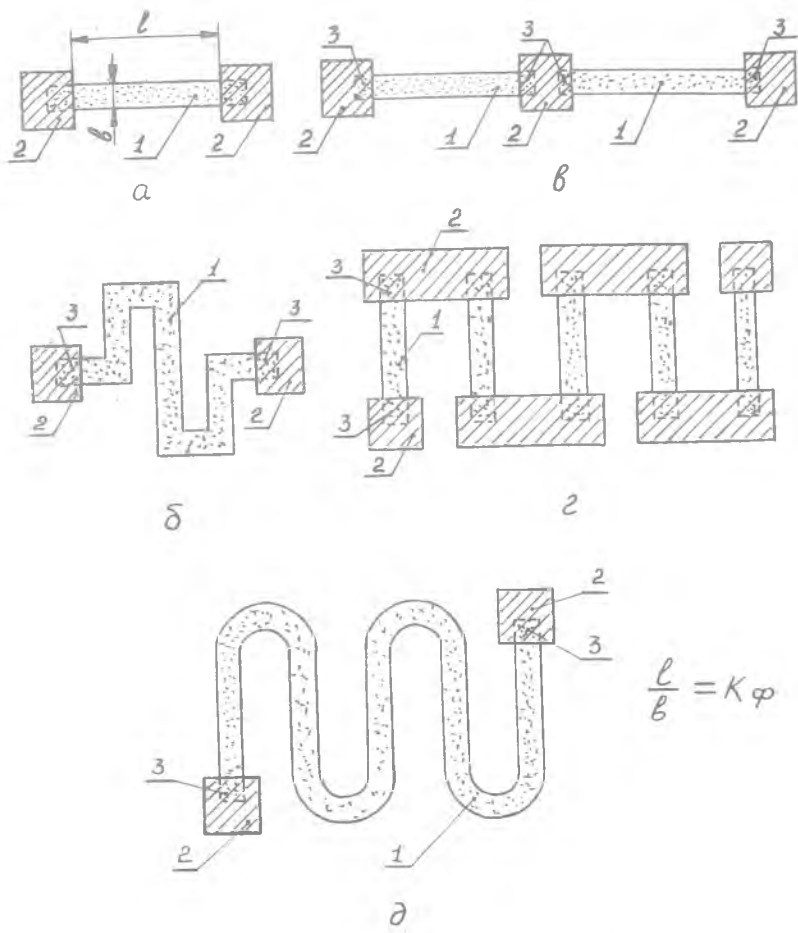
Резисторы являются наиболее распространенными элементами пленочных микросхем. Резистивные элементы гибридных микросхем получают напылением на диэлектрическое основание (подложку) узких резистивных пленочных полосок I (рис.1) различной конфигурации и контактных площадок 2, имеющих с ними некоторую зону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

Если длина резистора $l > 10$ мм, то резистор необходимо выполнять в виде "меандра" или "змейки". Нецелесообразно принимать значение $K_{\text{ф}} < 0,5$, так как при этом понижается точность изготовления резистора, увеличивается площадь контактных перекрытий.

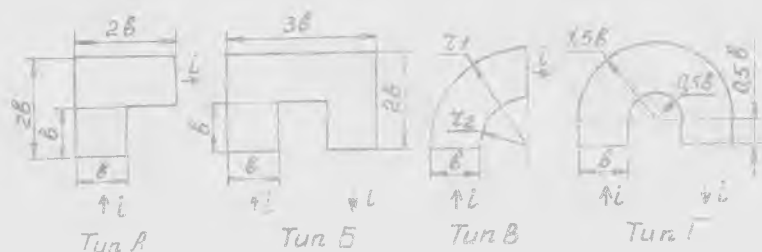
Наилучшими конфигурациями пленочных резисторов признаны прямоугольная и типа "меандр". В тех случаях, когда необходимо изготавливать высокоомные резисторы, предпочтительной является конструкция из нескольких последовательно соединенных резистивных полосок прямоугольной формы (рис.1, в, г). Такая конфигурация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

Установлено, что электрическое поле в резисторах сложной формы ("меандры", "змейки" 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. 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, б, д) резистивная полоска условно разбивается на элементы сопряжения типа изображенных на рис.2 и рассчитывается по следующим формулам /2/:



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



Р и с. 2. Элементы сопряжения

$$R = 2,55 R_D \text{ (тип А);} \quad (1)$$

$$R = 4 R_D \text{ (тип Б);} \quad (2)$$

$$R = \frac{4,57}{\pi} R_D \text{ (тип В);} \quad (3)$$

$$R = 3,86 R_D \text{ (тип Г).} \quad (4)$$

Общее сопротивление резистора определяется как сумма сопротивлений всех элементов сопряжения согласно выражениям (1)...(4) и сопротивлений участков прямоугольной формы.

Коэффициент формы K_Φ планчатого резистора является функцией геометрии резистивной планки и контактных площадок. Для прямоугольного резистора (рис. 1, а) коэффициент формы равен отношению длины l к ширине b :

$$K_\Phi = \frac{l}{b}, \quad (5)$$

или

$$K_\Phi = \frac{R}{R_D}. \quad (5')$$

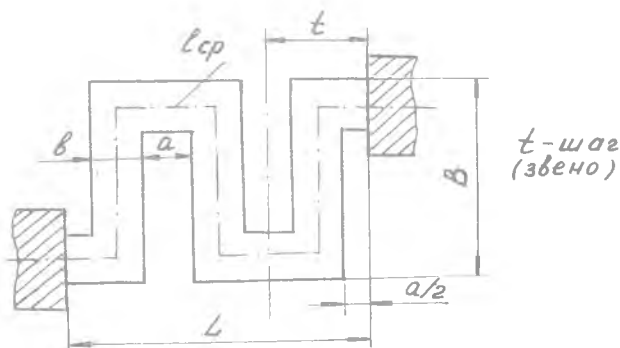
Для расчета резистора сложной формы удобно представить его как ряд последовательно соединенных резисторов простой формы, что возможно только в случае деления резистора сложной формы по эквипотенциальным линиям. Коэффициенты формы отдельных частей $K_{\Phi i}$ рассчитываются из условия расположения контактных площадок по линиям раз-

реза. Тогда общий коэффициент формы резистора рассчитывается как сумма коэффициентов формы отдельных частей:

$$K_{\phi} = \sum_{i=0}^n K_{\phi_i}, \quad (6)$$

где K_{ϕ_i} рассчитывается по формуле (5).

Конструкции типа "меандр" с прямоугольными (см.рис.1,б) и криволинейными (см.рис.1,д) звеньями имеют конструктивно-технологические ограничения на размеры $a_{\text{мин}}$ и $b_{\text{макс}}$ (рис.3). Например, при



Р и с. 3. Конструкция резистора типа "меандр"

нанесении резистивного слоя через биметаллическую маску (трафарет) размер $a_{\text{мин}}$ определяется минимально возможным расстоянием между двумя щелями в маске, которое равно примерно $2h_m$, где h_m - толщина маски. Размер $b_{\text{макс}}$ ограничен необходимой жесткостью маски. Обычно придерживаются соотношения $b_{\text{макс}}/a \approx 10$. Большое соотношение $b_{\text{макс}}/a$ 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 $b_{\text{макс}}/a \approx 50$, так как резистивные слои и перемычки формируются раздельно.

При $K_{\phi} \leq 10$ рекомендуется конструировать резистор прямоугольной формы, при $K_{\phi} > 10$ - резистор сложной формы.

Оптимальное число звеньев "меандра" (см. рис. 3) вычисляется по приближенной формуле

$$n_{opt} \approx \sqrt{\frac{\rho_{ср}}{a+b} \cdot \frac{B}{L}} \quad (7)$$

где $\rho_{ср}$ - длина средней линии "меандра".

При $L = B$ ("меандр" квадратной формы) и $a = b$ выражение (7) упрощается:

$$n_{opt} \approx \sqrt{\frac{K_{\phi}}{2}} \quad (8)$$

Значение n_{opt} округляют до ближайшего целого, при этом длину и ширину меандра вычисляют по выражениям

$$L = n(a+b), \quad (9)$$

$$B = \frac{\rho_{ср} \cdot a n}{n} \quad (10)$$

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.

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, приведены в табл. I.

При выборе толщины резистивной пленки (или значения R_{σ}) следует помнить, что сопротивление и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) тонких (100...300 Å) пленок сильно зависит от толщины. Каждый резистор, кроме резистивной пленки, содержит контактные площадки. Конструкции и технологический процесс 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 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 подслой 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 зоны. Размеры и форма контактных площадок выбираются с учетом используемого метода контактирования и плотности тока через резистор. Контактный переход любого типа обладает конечным сопротивлением. Контактный слой между резистивной и проводящей пленками представляет собой окисную пленку, толщина и качество которой зависят от степени вакуума, при котором изготавливалась микросхема, и от времени между процессами нанесения контактной пары. Переходное сопротивление, следовательно, зависит от геометрических размеров контакта, проводимости резистивной пленки и величины удельного переходного сопротивления. Минимальное значение переходного сопротивления определяется как

$$R_{пер} = \frac{\sqrt{R_0 R^*}}{b}, \quad (II)$$

где R_0 - сопротивление квадрата резистивной пленки; R^* - удельное сопротивление переходного слоя, его величина для различных технологических процессов может составлять 0,01...2,0 Ом·мм²; b - ширина резистивной пленки.

Если значение $R_{пер}$ таково, что величина $2R_{пер}$ соизмерима с допуском на номинал пленочного резистора, необходимо скорректировать рассчитанные ранее размеры последнего.

Минимальная длина перекрытия h резистивной и проводящей пленок определяется по формуле

$$h_{мин} \geq 1,53 \sqrt{\frac{R^*}{R_0}} \quad (I2)$$

Таблица I

Электрофизические характеристики материалы для пленочных резисторов

| Материал | R_0 , Ом/□ | ρ_0 , Вт/см ² | $\alpha_R \cdot 10^{-4}$, 1/град | ЭДС шумов, мкВ/В·кГц ^{1/2} , $\rho = 2$ Вт/см ² | Интенсивность откликов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч | Старение, % | |
|--|--|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---------------------------------|
| | | | | | | за 100 ч при $T = 20$ Вт/см ² , $T = 85^\circ\text{C}$ | за 5000 ч в нормальных условиях |
| Хром Х0 ГОСТ 5906-67 | 200... ...500 | 2,0 | 0,6 | (1...10) · 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 | 5 · 10 ⁻³ | - | 1,1...1,3 | 0,1...0,4 |
| Сплав МПТ-3М ВК0.028.006ТУ | 300... ...500 | 2,0 | ±(1,2...1,8 ±(1,9...2,4) | 5 · 10 ⁻³ | 1,8 | +0,5 | +0,1 |
| Керамет. ЕТО.021.013ТУ | (0,5... ...3)10 ³ | 2,0 | 3...7 | - | 0,9 | +1,0 | +0,3 |
| Тантал. СУ0.021.041ТУ | 300... ...500 | 2,0 | - 1,5 | - | - | - | 2,6...3,2 |
| Алюминий А-99 ГОСТ 61-32-63 | 0,1... ...0,2 | 1,0 | 0,24 | - | - | - | - |
| Сплавы: PC-4800; PC-3710; PC-3001; PC-1004, ЕТО.021.048ТУ | (0,3...1)10 ³ (0,5...3)10 ³ (0,8...1,5)10 ³ (1...4)10 ³ | 2,0 | 2,0 0,5...2,0 1,0 10,0 | - | - | - | 2,0 2,0 1,0 2,0 |

С другой стороны, исходя из технических ограничений, значение $R_{мин}$ должно быть не менее 0,2 мм (для съемной маски).

Определение оптимального значения R_0
для группы пленочных резисторов

Оптимальное значение R_0 для группы резисторов интегральной микросхемы, которое обеспечивает минимальную площадь, занимаемую резисторами, определяется как [3/

$$R_{0opt} = \frac{\bar{\sigma}_B}{\bar{\sigma}_L} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}, \quad (13)$$

где $\bar{\sigma}_B$ и $\bar{\sigma}_L$ - относительные среднеквадратические отклонения соответствующих величин;

$$\bar{\sigma}_L = \frac{\sigma_L}{L}, \quad \bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_B}{B}, \quad (14)$$

σ_L и σ_B - абсолютные среднеквадратические отклонения длины и ширины пленок (табл.2).

Т а б л и ц а 2

Погрешности воспроизведения геометрических размеров
пассивных элементов

| Виды технологии изготовления | $\sigma_L, \text{мм}$ | $\sigma_B, \text{мм}$ | $\bar{\sigma}_{R_0}$ | $\bar{\sigma}_{L_0}$ |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Метод свободной маски | 0,01...0,03 | 0,01...0,07 | 0,02...0,05 | 0,03...0,07 |
| Фотолитография | 0,003...0,007 | 0,002...0,005 | 0,02...0,05 | 0,03...0,07 |
| Танталовая технология | 0,003...0,007 | 0,002...0,005 | 0,02...0,05 | 0,02...0,05 |

Полученное из формулы (13) значение R_{0opt} округляется до рекомендованных значений R_0 . По этому значению выбирается материал резистивной пленки. В том случае, когда разброс номиналов группы резисторов в электрической схеме высок ($\frac{R_{макс}}{R_{мин}} > 50$), все

резисторы необходимо разделить на две группы. Для каждой группы вычисляются свои значения $K_{доп}$ и выбираются соответствующие материалы резистивных пленок.

Расчет конструкции пленочного резистора по точности и рассеиваемой мощности

При изготовлении пленочных резисторов возникают погрешности воспроизведения геометрии, т.е. коэффициента формы, и получения расчетного значения сопротивления квадрата R_0 . Как правило, все отклонения носят случайный характер и распределяются по нормальному закону [3]. Следовательно, отклонение номиналов резисторов случайно и имеет нормальный (гауссовский) закон распределения. Дисперсия номинала резистора связана с дисперсиями K_0 , длины резистора l и ширины b :

$$\bar{\sigma}_{R_0}^2 = \bar{\sigma}_{K_0}^2 + \bar{\sigma}_l^2 + \bar{\sigma}_b^2, \quad (15)$$

где $\bar{\sigma}_{R_0}$ - относительная среднеквадратическая погрешность, определяемая технологическим процессом.

Величину $\bar{\sigma}_R$, характеризующую разброс погрешностей, можно определить, если задаться вероятностью выхода годного резистора Φ_R и допуском на него δ_R /1/. Исходя из нормального распределения погрешности K и используя значения интеграла вероятностей

$$\Phi_R = \Phi(z) = \frac{z}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx,$$

определим

$$\bar{\sigma}_R = \frac{\delta_R}{z \sqrt{2}}, \quad (16)$$

где z - аргумент интеграла вероятностей /4/.

Итак, левая часть выражения (15) согласно выражению (16), связана с допуском на номинал резистора и вероятностью выхода годного резистора. Выражение (15) запишем в следующем виде:

$$\bar{\sigma}_R^2 - \bar{\sigma}_{R_0}^2 = \frac{\sigma_l^2}{l^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^2}. \quad (17)$$

Правая часть выражения (I7) представляет собой дисперсию коэффициента формы $\bar{\sigma}_{K\Phi}^2$:

$$\frac{\sigma_L^2}{\rho^2} + \frac{\sigma_B^2}{\beta^2} = \bar{\sigma}_{K\Phi}^2,$$

а левая часть выражения определяется из формулы (I6) и известного значения $\bar{\sigma}_{R_0}$. Следовательно, для обеспечения заданного процента выхода годных резисторов φ_R в пределах $\pm \delta_R$ необходимо выполнение условия

$$\frac{\sigma_L^2}{\rho^2} + \frac{\sigma_B^2}{\beta^2} = \bar{\sigma}_{K\Phi}^2 \leq \bar{\sigma}_R^2 - \bar{\sigma}_{R_0}^2.$$

Так как $K\Phi = \frac{l}{B} = \frac{R}{R_0}$, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_R^2 - \bar{\sigma}_{R_0}^2 \geq \frac{\sigma_L^2}{\rho^2} + \frac{\sigma_B^2}{\beta^2}; \\ K\Phi = \frac{l}{B}, \end{cases}$$

решение которой дает результат

$$B \geq \sqrt{\frac{(\frac{\sigma_L}{\rho})^2 - \sigma_B^2}{\bar{\sigma}_R^2 - \bar{\sigma}_{R_0}^2}}, \quad (I8)$$

$$l = B K\Phi, \quad (I9)$$

или

$$l \geq \sqrt{\frac{\sigma_L^2 + (\sigma_B K\Phi)^2}{\bar{\sigma}_R^2 - \bar{\sigma}_{R_0}^2}}, \quad (I8')$$

$$B = \frac{l}{K\Phi}. \quad (I9')$$

Таким образом, полагая известными R и $\bar{\sigma}_R$ из расчета схемы, а R_0 , $\bar{\sigma}_{R_0}$, σ_L , σ_B , φ_R - из условий технологического процесса изготовления, можем определить размеры пленочного резистора, которые для данного технологического процесса обеспечат заданный процент выхода годного резистора φ_R в пределах допуска $\pm \delta_R$. Так как для резистивной пленки может быть выбран материал из множеств-

ва материалов, имеющих различные относительные отклонения в процессе старения, воздействия температуры и т.д., то заданное в электрической схеме значение допуска на номинал резистора необходимо скорректировать:

$$\bar{\delta}_R = \bar{\delta}_{R_{\text{доп}}} - \bar{\delta}_{R_t} - \bar{\delta}_{R_{\text{ст}}} - \bar{\delta}_{R_k}, \quad (20)$$

где $\bar{\delta}_{R_{\text{доп}}}$ - допуск на номинал резистора в относительных единицах (он оговаривается в технических требованиях на резистор интегральной микросхемы); $\bar{\delta}_{R_t}$ - относительная погрешность, обусловленная температурными изменениями; $\bar{\delta}_{R_{\text{ст}}}$ - погрешность, обусловленная старением резистивной пленки; $\bar{\delta}_{R_k}$ - погрешность переходных сопротивлений контактов, $\bar{\delta}_{R_k} = 2 \frac{V_{\text{пер}}}{R}$, обычно она составляет 1...2 %.

Температурная погрешность зависит от температурного коэффициента сопротивления материала пленок:

$$\bar{\delta}_{R_t} = \alpha_R (t_{\text{макс}} - 20^\circ\text{C}), \quad (21)$$

где α_R - температурный коэффициент сопротивления материала пленки, $1/^\circ\text{C}$ (см. табл. I); $t_{\text{макс}}$ - максимальная рабочая температура.

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. Обычно для ГИМС $\bar{\delta}_{R_{\text{ст}}}$ не превышает 3 %.

Размеры тонкопленочных резисторов зависят также от рассеиваемой ими в процессе работы мощности. Минимальные допустимые геометрические размеры пленочного резистора, исходя из рассеиваемой мощности, определяют по формулам

$$b_{\text{мин}} \geq \sqrt{\frac{P_R}{P_0 K_{\Phi}}}; \quad l = b K_{\Phi} \quad (22)$$

или

$$l_{\text{мин}} \geq \sqrt{\frac{P_R K_{\Phi}}{P_0}}; \quad b = \frac{l}{K_{\Phi}} \quad (22')$$

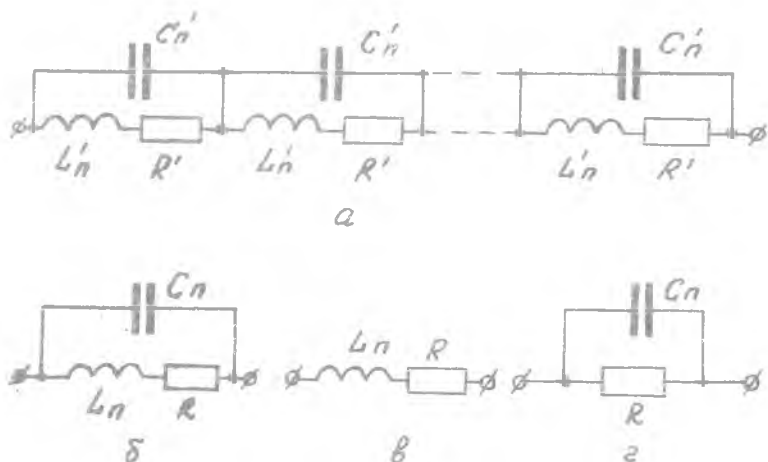
где P_R - мощность, рассеиваемая резистором; P_0 - максимально допустимая удельная мощность рассеяния резистивной пленки.

Если коэффициент формы резистора $K_{\Phi} \geq \bar{b}_e / \bar{b}_b$, то следует пользоваться выражениями (18) и (22), при $K_{\Phi} < \bar{b}_e / \bar{b}_b$ - выражениями (18)

и (22'). Кроме того, минимально допустимые размеры тонкопленочных резисторов ограничены выбранной технологией получения пленок (см. табл.2).

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.4,а. Анализ такой схемы громоздок. Достаточно точно поведение пленочного резистора можно описать по приближенной эквивалентной схеме (рис.4,б), где R - сопротивление резис-



Р и с. 4. Эквивалентная схема пленочного резистора:
а - полная; б - упрощенная; в - для низкоомных резисторов; г - для высокоомных резисторов

тора постоянному току; C_n - собственная емкость с учетом емкости контактных площадок; L_n - собственная индуктивность резистора. Реальные конструкции пленочных резисторов имеют паразитные индуктив-

ности до десятков нГн и паразитные емкости до единиц пикофарад (пФ). Следовательно, есть смысл индуктивную составляющую учитывать для резисторов малых номиналов, когда шунтирующим действием паразитной емкости можно пренебречь (рис.4,в). Для высокоомных резисторов можно пренебречь индуктивной составляющей сопротивления, а учитывать шунтирующее действие паразитной емкости (рис.4,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

$$\omega \leq \sqrt{2\delta_R} \frac{R}{L_n} \quad (23)$$

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

$$\omega \leq \frac{\sqrt{2\delta_R}}{R C_n} \quad (24)$$

Величины собственных значений паразитной емкости резистора C_n и индуктивности L_n зависят от конструкции резистора и контактных площадок и точно могут быть определены после выбора конструкции.

Порядок расчета геометрических размеров пленочных резисторов прямоугольной формы

Пленочный резистор прямоугольной формы изображен на рис.5.

Исходными данными для расчета геометрических размеров резисторов являются:

э л е к т р и ч е с к и е:

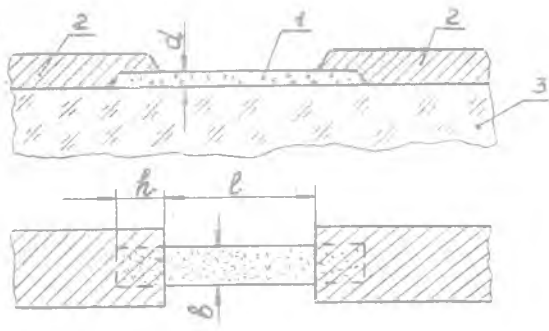
R_i - номиналы резисторов, Ом;

P_i - расчетные значения мощностей рассеяния, Вт;

т е х н о л о г и ч е с к и е:

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

$\bar{\sigma}_e$ - среднеквадратическое отклонение размеров проводящего слоя, мм;



Р и с. 5. Конструкция пленочного резистора:
 1 - резистивная пленка; 2 - проводящие пленки;
 3 - подложка

σ_B - среднеквадратическое отклонение ширины резистивных пленок, мм;

P - вероятность выхода годных резисторов.

- эксплуатационные:
- диапазон рабочих частот, Гц;
 - диапазон рабочих температур, °С;
 - продолжительность эксплуатации, ч;
 - влажность среды, %;
 - механические воздействия (удары, ускорение, вибрация).

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. Определение оптимального значения сопротивления квадрата для группы резисторов; выбор материалов.
2. Определение коэффициента формы K_{ϕ} и выбор конструкции резисторов.
3. Определение минимально допустимых геометрических размеров пленочных резисторов с точки зрения рассматриваемой мощности и точности изготовления.
4. Определение оптимального числа звеньев меандра (для резисторов сложной формы).
5. Определение сопротивления $R_{пер}$ и длины перекрытия резистивной пленки с проводящей пленкой. В случае необходимости - корректировка длины резистора.
6. Определение площади, занимаемой резисторами (без учета выводов или контактных площадок).

7. Проверка условия частотной независимости.

Конструирование и расчет подгоняемых пленочных резисторов

При изготовлении пленочных резисторов возникают погрешности как в воспроизведении формы, так и поверхностного удельного сопротивления R_c . При необходимости изготовления резисторов с точностью единиц и долей процента приведенные методы конструирования результатов не дадут, т.е. возникает необходимость разработки резистора, подстраиваемого после изготовления (рис.6). Подгонять резистор можно в сторону увеличения номинала изменением коэффициента формы (удалением части резистивной пленки или разрывом замыкающих перемычек). Следовательно, расчетная величина подгоняемого пленочного резистора должна быть меньше номинального значения. При нормальном законе распределения погрешностей, учитывая, что подавляющее большинство резисторов укладывается в допуск $\pm 3 \bar{\sigma}_R$, расчетное значение подстраиваемого резистора определяется по формуле

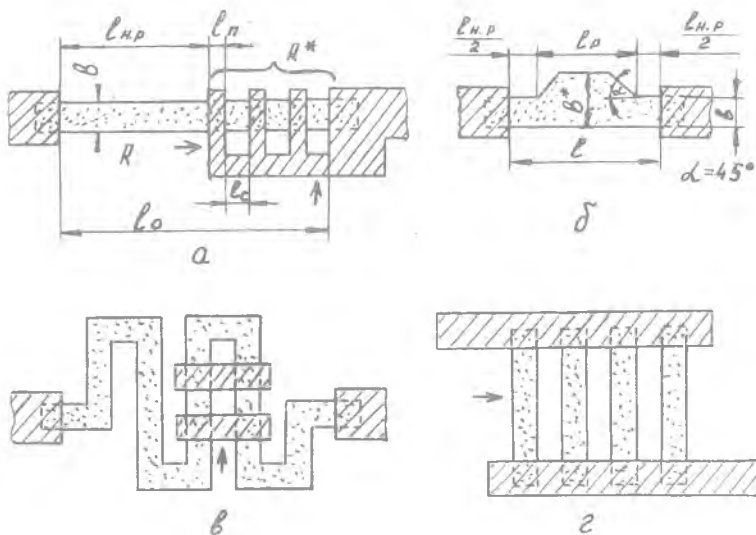
$$R = \frac{R_0}{1 + 3 \bar{\sigma}_R}, \quad (25)$$

где R_0 - номинальное значение сопротивления резистора, к которому нужно подгонять; $\bar{\sigma}_R$ - относительное среднеквадратическое отклонение сопротивления резистора.

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

С т у п е н ч а т а я п о д г о н к а. При конструировании резистора, подстраиваемого разрывом замыкающих перемычек, кроме R (нерегулируемая часть), рассчитанного по формуле (25), необходимо иметь дополнительно замкнутый перемычками резистор (регулируемая часть) R^* (рис.6,а). Расчетное значение R^* выбирается из условия

$$R_0 = (R + R^*) / (1 - 3 \bar{\sigma}_R). \quad (26)$$



Р и с. 6. Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

Используя выражения (25) и (26), получаем

$$R^* = R_0 \frac{6 \bar{\sigma}_R}{1 - 9 \bar{\sigma}_R^2} \quad (27)$$

Количество секций n , из которых состоит R^* , выбирается так, чтобы сопротивление каждого элемента было не более абсолютного значения погрешности резистора при подгонке:

$$n = \frac{R^* (1 + 3 \bar{\sigma}_R)}{\bar{\sigma}_R} = R_0 \frac{6 \bar{\sigma}_R}{\bar{\sigma}_R (1 - 3 \bar{\sigma}_R)} \quad (28)$$

где $\bar{\sigma}_R$ - абсолютная допустимая погрешность резистора при подгонке, Ом; $\bar{\sigma}_R = \bar{\sigma}_R \cdot R$. Значения $l_{н.р.}$ и l_c определяются по формулам

$$l_{н.р.} = \frac{R B}{R_0} ; \quad l_c = \frac{R^* B}{R_0 n} ,$$

где b - ширина резистора, определяется рассеиваемой мощностью согласно формуле (22); из технологических соображений ширина резистора выбирается не меньше, чем $0,1 \dots 0,2$ мм. Величина перемычек l_2 выбирается равной $0,2 \dots 0,5$ мм.

В случае высокой точности резистора и плохой технологии число секций n в R^* может достигать десятков, что делает конструкцию резистора громоздкой. В этом случае резистор лучше выполнить с плавной подгонкой. Если l_c окажется меньше $0,1$ мм, ее увеличивают до $0,1$ мм; во столько же раз должна быть увеличена и ширина резистора на подгоняемом участке.

П л а в н а я п о д г о н к а. 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 $40 \dots 50^\circ$. 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 значение сопротивления R_0 , Ом, и допуск $\bar{\delta}_R$, %;

сопротивление квадрата пленки R_q , Ом;

среднеквадратическое отклонение сопротивления квадрата пленки

$\bar{\sigma}_{R_q}$, %;

ширина резистора b , мм;

среднеквадратическое отклонение ширины $\bar{\sigma}_b$, 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

$$l = \frac{R_0(1 - \bar{\delta}_R)(b + 3\bar{\sigma}_b)}{R_0(1 - 3\bar{\sigma}_{R_q})}$$

откуда видно, что даже при сочетании \bar{b}_{\max} , $R_{D \min}$ путем подгонки можно достичь нижней границы допуска.

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

$$R_{\max. \text{возм}} = \frac{R_D(1 + 3\bar{b}_{R_D})\ell}{b - 3\bar{b}}$$

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

Следует заметить, что при изготовлении точных резисторов необходимо выбирать материал и режимы техпроцесса изготовления такими, чтобы выполнялось неравенство $\delta_{R_L} + \delta_{R_{CT}} \leq \delta_R$, в противном случае никакая подгонка не поможет. Номинал резистора будет уходить за пределы допуска под действием температуры окружающей среды и старения.

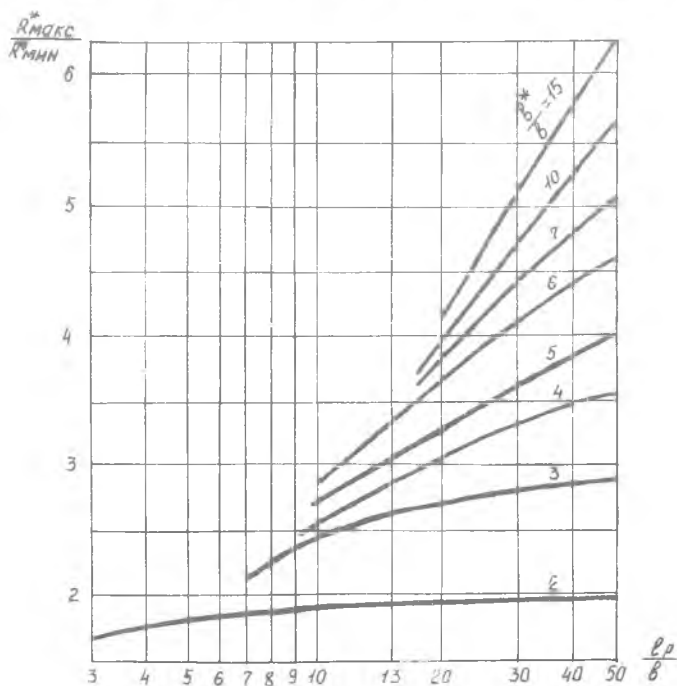
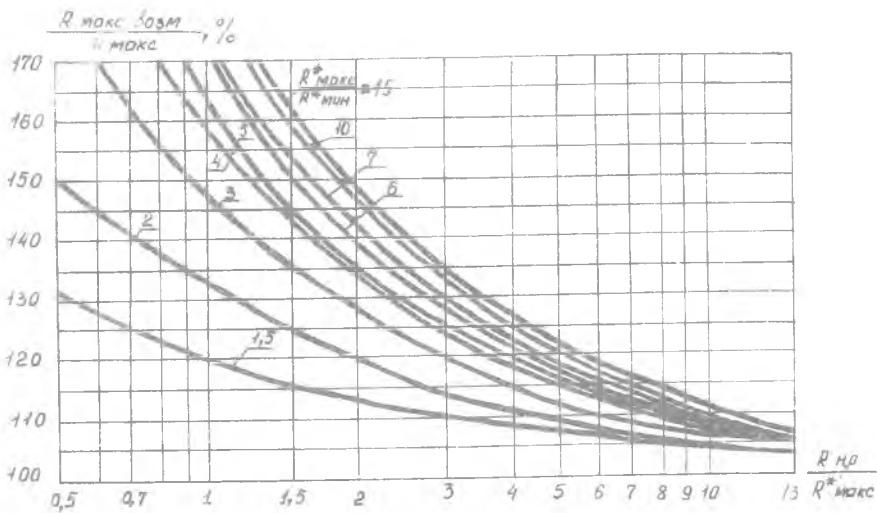
Расчет размеров регулируемой секции производится следующим образом.

1. Вычисляется отношение $\frac{R_{\max. \text{возм}}}{R_{\max}}$ и по графикам, представленным на рис. 7, выбираются (из конструктивно-технологических соображений) отношения $\frac{R^*_{\max}}{R^*_{\min}}$ и $\frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}}$, 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

$$\frac{R_{н.р}}{R^*_{\max}} = \frac{\ell_{н.р}}{\ell_p},$$

откуда, учитывая, что $\ell_{н.р} + \ell_p = \ell$, получаем

$$\ell_p = \frac{\ell}{1 + R_{н.р}/R^*_{\max}} \quad (29)$$



Р и с. 7. Графики для расчета точных подгоняемых тонкопленочных резисторов

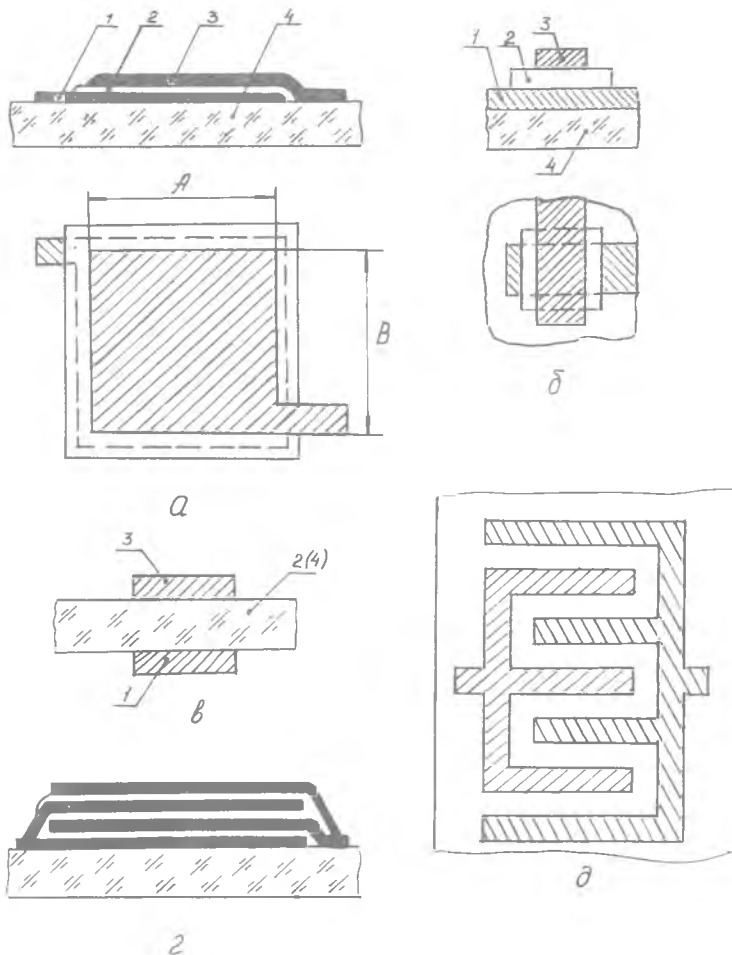
2. В зависимости от выбранного отношения $\frac{R_{\text{МАКС}}^*}{R_{\text{МИН}}^*}$ и отношения $\frac{\ell_p}{\delta}$, которое можно получить, определив из выражения (29) величину ℓ_p , по графикам рис.7 находится отношение δ^*/δ и вычисляется δ^* - ширина резистора на подстраиваемом участке.

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. 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. 3. 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.



Р и с. 8. Конструкции ТКК: а - однослойный; б - малой емкости; в - двухсторонняя конструкция; 1 - нижняя обкладка; 2 - диэлектрик; 3 - верхняя обкладка; 4 - подложка; г - многослойный; д - гребенчатый

Т а б л и ц а 3

Основные характеристики диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов

| Материал диэлектрика | Материал обкладок | ρ_a , Ом/□ | S_0 , пФ/см ² | $U_{роб}$, В | ϵ , при $f=1 \times 10^4$ | $t_{уд}$ при $i=1 \mu A$ | $E_{пр}$, В/см | α_c , 1/°C (-60...+125°C) | $\bar{J}_{сст}$, % $\frac{30}{10000}$ $\pm(1,5...6)$ |
|---|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|---|
| Монокись кремния ЕГО.028.004ТУ | Алюминий А-99,ГОСТ И1069-64 | 0,2 | 5000 10000 | 60 30 | 5,0... ...6,0 | 0,1... ...0,02 | (2...3)·10 ⁴ | 2·10 ⁻⁴ | |
| Монокись германия, ЕГО.021.014 ТУ | Алюминий А-99,ГОСТ И1069-64 | 0,2 | 5000 10000 15000 | 10 7 5 | 11... ...12 | 0,005... ...0,007 | 1·10 ⁶ | 3·10 ⁻⁴ | - 1,0 |
| Боросиликатное стекло, ЕГО.035.015 ТУ | Алюминий А-99,ГОСТ И1069-64 | 0,2 | 2500 5000 10000 15000 | 24 15 10 8 | 4 | 0,001... ...0,001E | (3...4)·10 ⁶ | 0,35·10 ⁻⁴ +25...+125°C) | + 1,0 |
| Стекло электровакуумное, С41-1, НГО.027.600 | Алюминий А-99,ГОСТ И1069-64 | 0,2 | 15000 20000 30000 40000 | 12,6 10...12,5 6,3...10 6,3 | 5,2 | 0,002... ...0,003 | (3...4)·10 ⁶ | (0,5...1,0)10 ⁻⁴ при -60...+25°C; (1,5...1,8)·10 ⁻⁴ при +25...+125°C | + 1,0 |

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, изображенной на рис. 8, а. Если же полезная площадь конденсатора получается меньше, необходимо выбрать меньшее значение удельной емкости C_0 . Конденсаторы с малой величиной емкости рекомендуются проектировать в виде двух пересекающихся проводящих пленок, 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.

Исходные данные и основные расчетные соотношения

Для расчета ТПК исходными данными являются следующие:

номинальная величина емкости ТПК C , пФ;

диэлектрическая проницаемость диэлектрика ϵ ;

рабочее напряжение на ТПК U , В;

допустимая относительная погрешность емкости $\bar{\delta}_C$, %;

относительное среднеквадратическое отклонение удельной емкости $\bar{\delta}_{C_0}$, %;

вероятность изготовления годного ТПК, φ_C ;

абсолютные среднеквадратические погрешности изготовления размеров верхней обкладки σ_A и σ_B , мм;

коэффициент корреляции γ ;

максимальная температура окружающей среды t , °С;

предполагаемая длительность работы микросхемы T , ч.

В общем случае емкость C ТПК можно вычислить по формуле

$$C = 0,0885 \frac{\epsilon S (n-1)}{d} = C_0 S, \quad (30)$$

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

Формула (30) 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 пикофарды).

Проектирование однослойных ТПК следует начинать с выбора материала диэлектрической пленки (см. табл. 3). При этом необходимо учитывать номинальное значение емкости, требования к стабильности, условия эксплуатации и технологичность изготовления ТПК. Затем по формуле

$$d \geq \frac{K_3 U_0}{E_{np}}$$

определяется толщина диэлектрической пленки в микрометрах. Здесь K_3 - коэффициент запаса электрической прочности конденсатора (для ТПК $K_3 = 2 \dots 4$); E_{np} - электрическая прочность материала диэлектрика, В/мм.

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 (30), оказывается меньше 3000 Å, за расчетное значение толщины пленки диэлектрика принимается величина $d \geq 3000 \text{ Å}$ (0,3 мкм).

Далее по формуле

$$C_0 = 0,0885 \frac{\epsilon}{d} \quad (31)$$

определяется значение удельной емкости.

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

$$S = C/C_0,$$

$$A = B = \sqrt{S}.$$

Расчет ТПК с учетом точностных характеристик

Расчет ТПК без подстроечных секций. Приведенная методика расчета ТПК очень проста и удобна для ориентировочных расчетов на стадии эскизного проектирования при разработке топологии микросхем. 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 предъявленным 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. 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 $\delta_{c_{доп}}$, расчетное значение допуска δ_c (технологический допуск) должно быть меньше, т.е.

$$\bar{\delta}_c = \bar{\delta}_{c_{доп}} - \bar{\delta}_{c_t} - \bar{\delta}_{c_{ст}}, \quad (32)$$

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

$$\bar{\delta}_{c_t} = \alpha_c (t - 20^\circ\text{C}),$$

здесь α_c - температурный коэффициент емкости ТПК, определяется из табл.3; $t, ^\circ\text{C}$ - рабочая температура ТПК; $\bar{\delta}_{c_{ст}}$ - относительное изменение емкости во времени, определяется из табл.3.

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

$$\bar{\delta}_{c_{расч}} = \frac{\bar{\delta}_c}{\sqrt{2} Z}, \quad (33)$$

где Z - значение аргумента интеграла вероятностей, соответствующее заданному значению φ_c (определяется по таблицам /4/), а $\bar{\delta}_c$ определяется из выражения (32).

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

$$\bar{\sigma}_c^2 = \bar{\sigma}_{c_0}^2 + \bar{\sigma}_s^2,$$

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 значений площади ТПК, зависящая от точности выполнения размеров ТПК.

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

$$\bar{\sigma}_s^2 = \bar{\sigma}_A^2 + \bar{\sigma}_B^2 + 2r_{AB} \bar{\sigma}_A \bar{\sigma}_B, \quad (34)$$

где $\bar{\sigma}_A$ и $\bar{\sigma}_B$ - относительные среднеквадратические отклонения размеров A и B , получаемые при изготовлении ТПК; r_{AB} - коэффициент корреляции между отклонениями размеров A и B . Следует помнить, что $\bar{\sigma}_A = \frac{\sigma_A}{A}$ и $\bar{\sigma}_B = \frac{\sigma_B}{B}$, где σ_A и σ_B - абсолютные среднеквадратические отклонения размеров A и B . Так как эти отклонения обычно одинаковы (получаются в процессе одной технологической операции), обозначим

$$\sigma_A = \sigma_B = \sigma_e. \quad (35)$$

Раскрывая выражение (34) с учетом (35), получим

$$\bar{\sigma}_s^2 = \sigma_e^2 \left(\frac{1}{A^2} + \frac{1}{B^2} + \frac{2r_{AB}}{AB} \right) \quad (36)$$

Выражение (36) не позволяет однозначно определить размеры A и B . Однако, полагая $A=B$, что часто встречается в реальных конструкциях, выражение (36) можно упростить:

$$\bar{\sigma}_s^2 = \frac{2\sigma_e^2(1+r_{AB})}{A^2} \quad (37)$$

Для обеспечения попадания емкости ТПК в допуск должно выполняться условие

$$\bar{\sigma}_s^2 \leq \sigma_{\text{расч}}^2 - \bar{\sigma}_{c_0}^2. \quad (38)$$

С учетом выражений (37) и (38) можно определить размеры верхней обкладки ТПК:

$$A \geq \frac{\epsilon_e \sqrt{2(1 + \gamma_{AB})}}{\sqrt{\bar{\epsilon}_{\text{расч}}^2 - \bar{\epsilon}_c^2}} \quad (39)$$

Значение удельной емкости при условии обеспечения заданной точности ТПК определяется из выражения

$$C_0 \leq \frac{C}{A^2} \quad (40)$$

Расчет ведется в следующей последовательности.

1. По табл.3 на основе анализа величины емкости, рабочего напряжения и условий эксплуатации выбирается материал диэлектрика ТПК.

2. По табл.3 выбираются значения α_c и $\bar{\delta}_{c_{\text{ст}}}$ и определяется $\bar{\delta}_{c_{\pm}}$.

3. На основании выражения (32) определяется технологический допуск δ_c .

4. По выражению (33) рассчитывается значение $\bar{\epsilon}_{\text{расч}}$.

5. Определяется (назначается) величина коэффициента корреляции γ_{AB} и по формуле (39) определяются размеры верхней обкладки ТПК.

6. По выражению (40) определяется значение удельной емкости, при котором обеспечивается заданная точность изготовления ТПК.

7. Из значений C_0 , полученных по формулам (31) и (40), выбирается наименьшее и округляется в меньшую сторону.

8. Если рассчитывается несколько ТПК, которые будут изготавливаться на одной подложке и иметь одинаковый слой диэлектрика, то из значений C_0 , полученных в п.7, выбирается наименьшее.

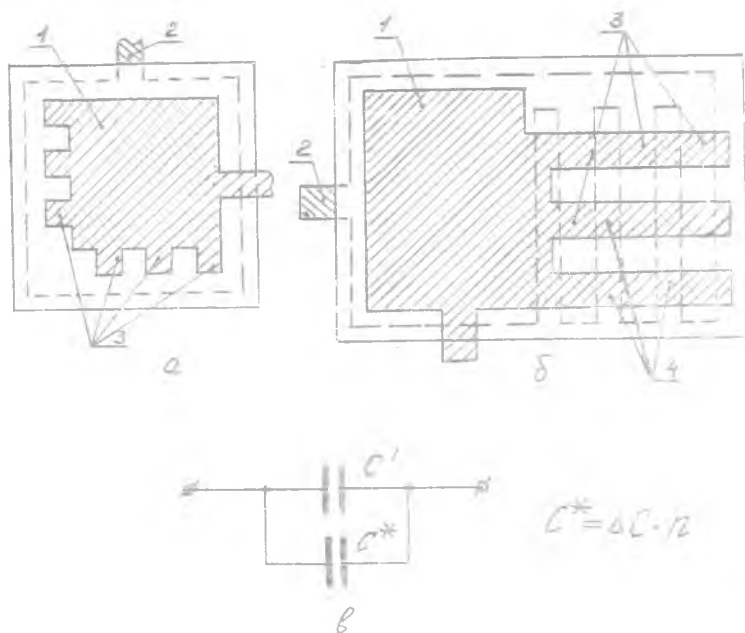
9. Рассчитываются размеры верхних обкладок ТПК по формуле

$$A = \sqrt{\frac{C_i}{C_0}},$$

где C_0 - значение удельной емкости, полученное в п.8; $i = \overline{1, n}$; n - число рассчитываемых ТПК.

10. Определяются размеры нижних обкладок и диэлектрика ТПК. Размеры нижних обкладок должны быть больше размеров верхних обкладок на 0,2 мм с каждой стороны, размеры диэлектрика - на 0,2 мм больше размеров нижних обкладок.

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).



Р и с. 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; ΔC - емкость одной подстроечной секции; n - число подстроечных секций

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

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

где C - номинальное значение емкости ТПК; $\bar{\sigma}_c$ - относительное среднеквадратическое отклонение емкости ТПК после изготовления (статистическая величина).

При конструировании ТПК со ступенчатой подгонкой (рис.9,б) не-настраиваемую часть C' определяют по формуле

$$C' = \frac{C}{1 + 3 \bar{\sigma}_c}$$

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

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

а необходимое число секций

$$n = \frac{6 C \bar{\sigma}_c}{\delta_c (1 - 3 \bar{\sigma}_c)},$$

где δ_c - абсолютное значение допуска на емкость ТПК, пФ; $\delta_c = \bar{\sigma}_c C$.

Емкость одной построечной секции при условии, что $\Delta C \leq \delta_c$, определяется из выражения

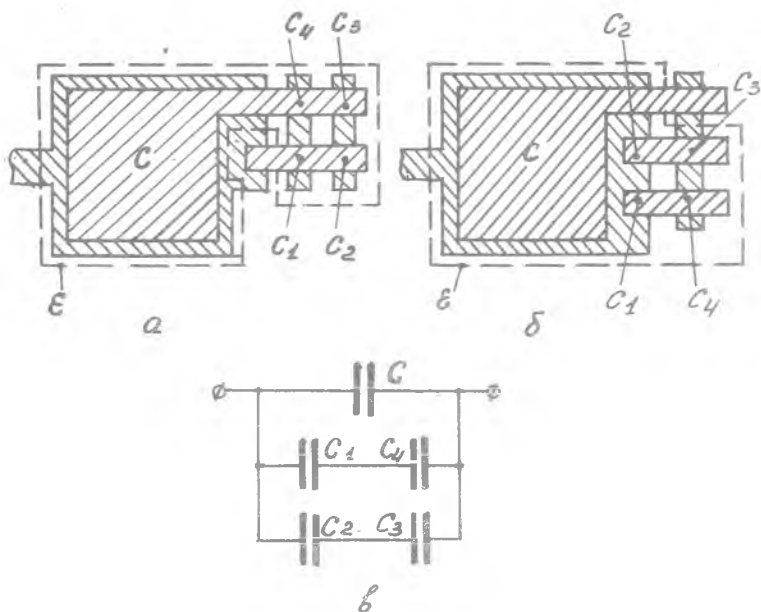
$$\Delta C = \frac{\delta_c}{1 + 3 \bar{\sigma}_c}$$

Если количество секций n подстраиваемой части окажется большим, секции можно выполнить неодинаковыми. Емкость первой секции нужно брать равной ΔC , а остальные увеличивать в 2, 4, 8 и т.д. раз. Число неравномерных секций n' определяется из выражения

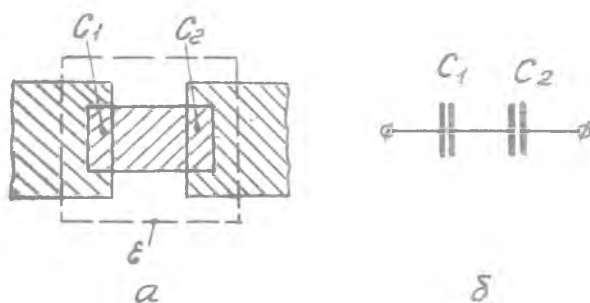
$$n' \geq 3,322 \lg(1+n)$$

В тех случаях, когда требуется малая величина емкости секции подгонки ΔC , а минимальная площадь ограничена технологическими возможностями, подгоночные секции следует выполнять по схеме последовательного включения (рис.10).

При площади ТПК от 1 до 5 мм² его обкладки можно выполнить в виде двух взаимно пересекающихся полосок. Если расчетная площадь ТПК меньше 1 мм², его можно выполнить в виде последовательно соединенных ТПК (рис.11).



Р и с. 10. Разновидности конструкций ТПК с подгоночными секциями и их эквивалентная схема: а - с пятью подгоночными секциями; б - с четырьмя подгоночными секциями; в - эквивалентная схема конструкции варианта б



Р и с. 11. Конструкция (а) и эквивалентная схема (б) конденсатора

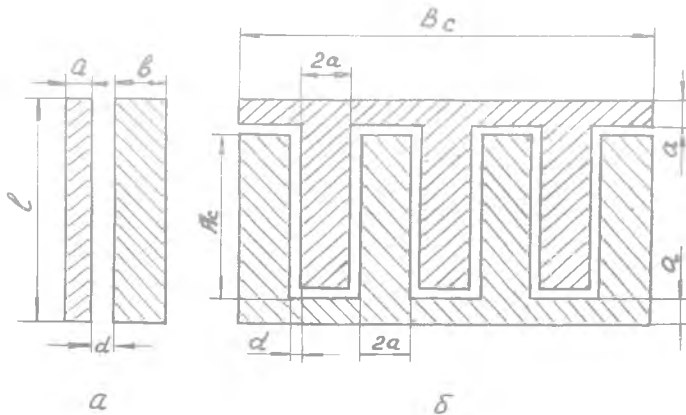
Расчет конструкции компланарного конденсатора

Компланарные конденсаторы (рис. 12) используются в колебательных LC -контурх 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.

Емкость компланарного конденсатора рассчитывается по формуле [1/

$$C = \beta \epsilon_p \ell,$$

где ϵ_p - расчетное значение диэлектрической проницаемости, $\epsilon_p = 0,5(\epsilon_n + \epsilon_z)$; ϵ_n, ϵ_z - диэлектрическая проницаемость подложки и защитного слоя соответственно; β - коэффициент, зависящий от соотношения размеров a, b и d ; ℓ - длина совместной границы обкладок.



Р и с. 12. Конструкции компланарного конденсатора:
а - в виде параллельных полосок; б - в виде гребенки

Коэффициент β 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 β и ϵ_p составляет погонную емкость конденсатора, показанного на рис.12,а:

$$C_p = \beta \epsilon_p .$$

Полная емкость

$$C = C_p \ell .$$

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 β , ϵ_p , C_p и длина совместной границы обкладок ℓ .

Удельная емкость компланарных конденсаторов составляет 1-3 пФ/см². Если длина ℓ окажется значительной, компланарный конденсатор выполняется в виде конструкции, показанной на рис.12,б. Размер B_c определяется из конструктивных соображений, размер A_c по формуле

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

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 $\operatorname{tg} \delta$ или обратной ей величине, называемой добротностью Q :

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} . \quad (41)$$

Потери энергии в ТПК складываются из следующих составляющих:
 потерь энергии в диэлектрических слоях: в основном диэлектрическом слое ТПК, в подложке, в защитном слое;

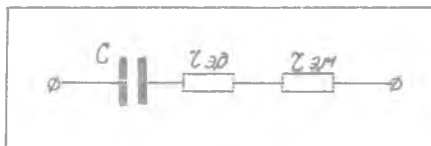
потерь энергии в металлических элементах ТПК: обкладках, выводах конденсатора.

В связи с этим эквивалентную схему ТПК можно представить в виде последовательного соединения емкости без потерь C , эквивалентного сопротивления диэлектрических потерь $Z_{дп}$ и эквивалентного сопротивления потерь в металлических элементах конденсатора $Z_{эп}$ (рис.13).

Тангенс угла потерь можно представить в виде суммы:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_d + \operatorname{tg} \delta_m,$$

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. 13. Эквивалентная схема ТПК

Значения $\operatorname{tg} \delta_d$ для некоторых диэлектрических материалов приведены в табл.3. Величина $\operatorname{tg} \delta_m$ может быть вычислена по формуле $\operatorname{tg} \delta_m = \omega C Z_{э.м}$, где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота; f - рабочая частота, Гц; C - емкость конденсатора, Ф; $Z_{э.м}$ - эквивалентное сопротивление потерь переменному току в обкладках и выводах, $Z_{э.м} = Z_{э.од} + Z_{э.выв}$.

Сопротивление выводов ТПК определяется выражением $Z_{э.выв} = R_{э.выв} \cdot K_{ф.выв}$, а эквивалентное сопротивление обкладок ТПК переменному току можно определить как $Z_{э.од} = \frac{2}{3} R$, где R - сопротивление одной обкладки конденсатора постоянному току, Ом, вычисляемое по формуле

$$R = R_{од} \cdot K_{ф.од}. \quad (42)$$

Формула (42) справедлива, если выполняется условие $\omega RC \leq 0,04$, при котором распределение тока в обкладках подчинено линейному закону.

После преобразований формула (41) может быть представлена в виде

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_d + \omega C R_{од} \left(\frac{2}{3} K_{ф.од} + K_{ф.выв} \right)}$$

При выводе формулы предполагалось, что обкладки и выводы ТПК изготовлены из одного материала, по одной технологии и имеют одинаковую толщину, т.е. выполняется условие $R_{од} = R_{выв}$.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Конструктивно-технологические особенности

Изготовление катушек индуктивности для гибридных пленочных микросхем представляет большие трудности. Наибольшее распространение в

мегагерцовом диапазоне частот получили плоские спиральные катушки (рис. 14). Ограниченные размеры подложек 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:

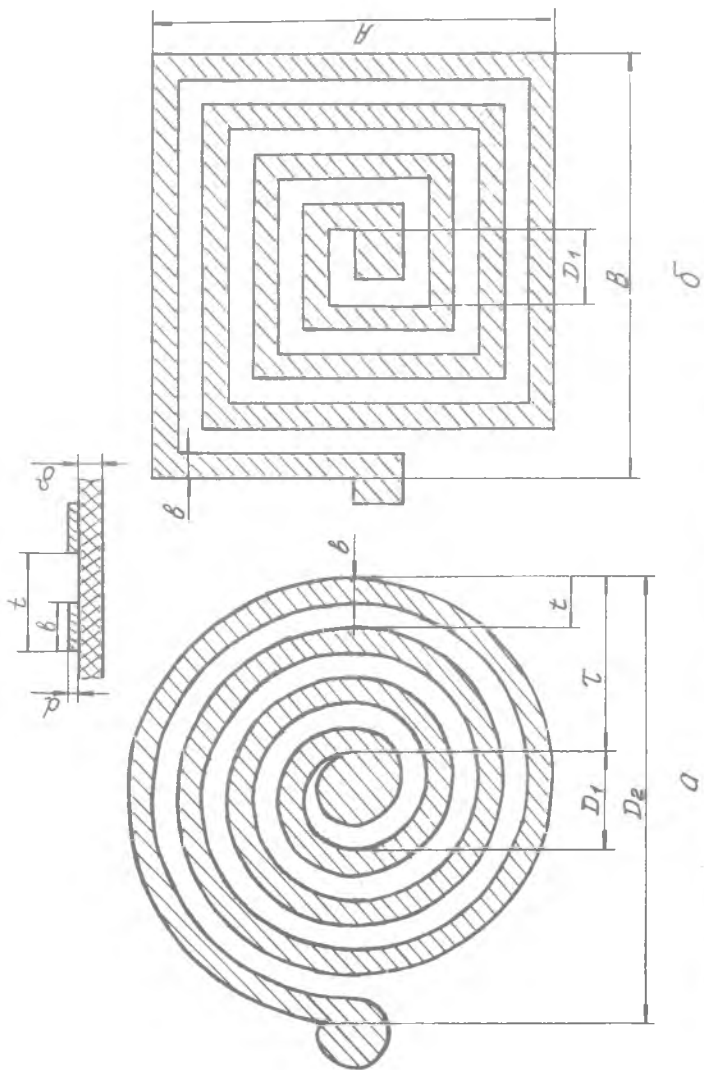
- шаг спирали t ;
- ширину витка b ;
- толщину витка d ;
- внутренний диаметр катушки D_1 ;
- число витков N .

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.



Р и с. 14. Пленочные катушки индуктивности: а - круглая спираль;
 б - квадратная спираль

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

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

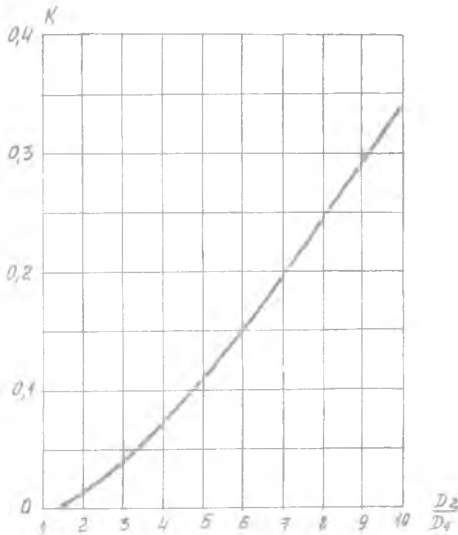
2. Определяется шаг спирали по формуле

$$t = K \frac{D_1 \sqrt{D_1}}{\sqrt{L}}, \quad (43)$$

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.15.



Р и с. 15. Зависимость коэффициента K от размеров пленочной катушки

3. Из условия $d \geq (2...4)d_c$ 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

$K_1 = 0,51$; λ - длина волны, см, $\lambda = \frac{c}{f}$.

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

$$b = \frac{pt \left[\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1 \right] Q 10^4}{16 f D_1 K_2 d}, \quad (44)$$

где B - 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.15;
 d - толщина проводника катушки, мкм.

Так как формула (44) выведена без учета влияния скин-эффекта, то ширину витка, рассчитанную по этой формуле, следует увеличить и выбрать равной $(1,5 \dots 2)B$ для $d = (2 \dots 4)d'_c$. Если новое значение ширины B' получится больше t , следует, оставляя прежним внутренний размер спирали D_1 и задаваясь шагом спирали $t > B'$, из формулы (43) определить внешний размер спирали D_2 , при котором можно получить заданную индуктивность, а затем по формуле (44) определить ширину витков B .

5. Определяется число витков по формуле

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

где t - шаг намотки.

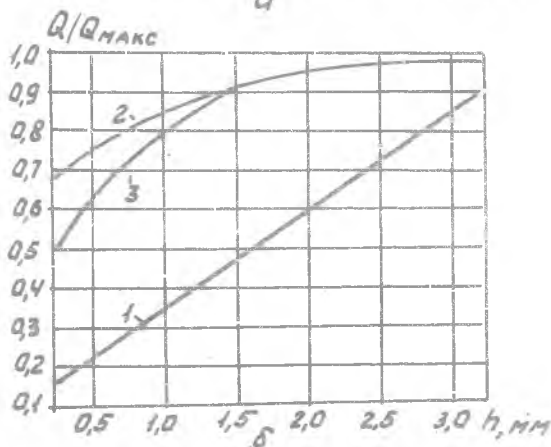
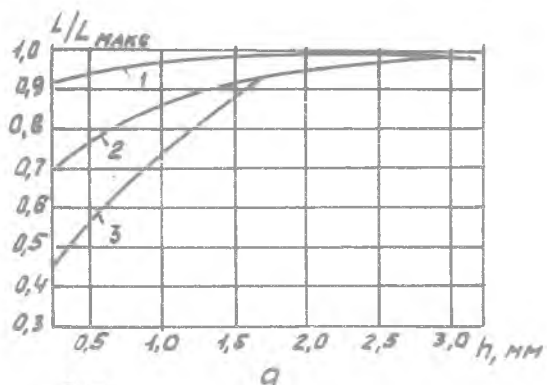
Расчет плоской прямоугольной спиральной катушки сводится к расчету круглой с эквивалентным наружным диаметром:

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

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.16, 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 (см.рис.16).



Р и с. 16. 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

Библиографический список

1. Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технология микросхем.-М.:Сов.радио, 1980.- 256 с.
2. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА.-Радио и связь, 1982.- 288 с.
3. Пьянков Б.А. Конструирование микросхем частного применения.- Казань:КАИ, 1979.- 48 с.
4. Корн Г, Корн Т. Справочник по математике (для научных работников).-М.:Наука, 1973.