

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Утверждено научно-методическим советом физического факультета 3 апреля
2008 г., протокол № 4

Рецензент д-р физ-мат. наук В.А. Терехов

**РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ ПАССИВНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Учебно-методическое пособие

Составители:
Ю.И. Дикарев,
В.М. Рубинштейн

Методические материалы подготовлены на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов 3-го курса среднего профессионального образования.

Для специальности: 210104 – Микроэлектроника и твердотельная электроника (СПО)

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2008

СОДЕРЖАНИЕ

Конструирование и расчет пленочных пассивных элементов.....	
1. Пленочные резисторы	
1.1. Конструкции пленочных резисторов	
1.2. Основные параметры пленочных резисторов	
1.3. Расчет и проектирование топологии тонкопленочных резисторов	
1.4. Расчет и проектирование топологии толстопленочных резисторов	
2. Пленочные конденсаторы	
2.1. Конструкции пленочных конденсаторов	
2.2. Требования к материалам, их основные параметры.....	
2.3. Основные параметры конденсатора.....	
2.4. Порядок расчета тонкопленочного конденсатора	
2.5. Пример расчета тонкопленочного конденсатора.....	
3. Пленочные индуктивные элементы	
Контрольные вопросы	
Литература	

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. ПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Пленочные резисторы являются наиболее распространенными элементами гибридных интегральных микросхем (ГИМС) и микросборок (МСБ). В зависимости от толщины различают тонко- и толстопленочные резисторы. Толщина тонкопленочных резисторов не превышает 1 мкм, и они изготавливаются преимущественно методами вакуумного напыления и осаждения. Толстопленочные резисторы изготавливаются методами трафаретной печати. Их толщина составляет (10–100) мкм.

1.1. Конструкции пленочных резисторов

Пленочные резисторы представляют собой узкие резистивные пленки, нанесенные на диэлектрическую подложку, на концах которых имеются контактные площадки, обладающие высокой электропроводностью. На рис. 1 показаны наиболее распространенные конфигурации таких резисторов.

Наиболее распространенной является полосковая прямоугольная форма (рис. 1, *a*), как самая простая по технологическому исполнению, но совершенная с точки зрения ее воспроизводимости. Высокоомные резисторы, имеющие значительную длину, в целях рационального использования площади подложки, выполняются в форме змейки (рис. 1, *в*), меандра (рис. 1, *з*) или состоят из последовательно соединенных полосок, повторяющих форму меандра (рис. 1, *б*). Резисторы, выполненные из составных полосок, отличаются большей точностью воспроизведения, лучшей стабильностью характеристик и надежностью. Однако они занимают несколько большую площадь, чем меандр. Меандр уступает в отношении стабильности и надежности конфигурации типа «змейка» из-за перегрева на внутренних участках изгибов, но он предпочтительней с точки зрения проектирования и изготовления масок и фотошаблонов.

При проектировании формы пленочных резисторов контактные площадки следует располагать с противоположных сторон. Этот прием позволяет устранить погрешности совмещения проводящего и резистивного слоев, приводящие к изменению длины резистора.

При выборе конструкции для толстопленочных резисторов необходимо учитывать, что они изготавливаются, в основном, в форме прямоугольных полосок. Для низкоомных тонкопленочных резисторов иногда применяется конструкция с внутренней контактной площадкой (рис. 1, *e*).

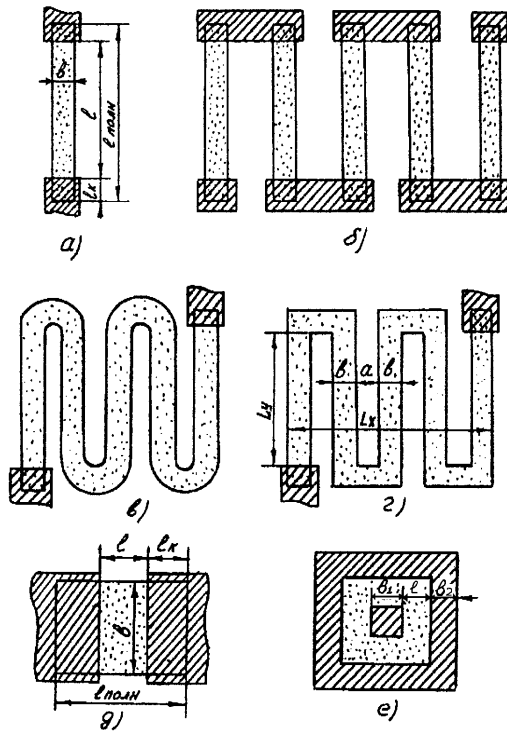


Рис. 1. Конструкции плёночных резисторов

1.2. Основные параметры плёночных резисторов

Основной характеристикой резистора является его номинальное сопротивление R_H

$$R_H = (\rho \cdot l) / S = (\rho \cdot l) / (\beta \cdot d) = (\rho / d) \cdot (l / b) = R_{\square} (l / b) = R_{\square} \cdot K_{\phi}, \quad (1)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление резистивного материала;
 l, b, d – длина, ширина и толщина резистивной пленки ($S = d \cdot b$);
 $R_{\square} = \rho / d$ – сопротивление квадрата резистивной пленки, не зависящее от его размеров и выражающееся в Ом / \square ;
 K_{ϕ} – коэффициент формы резистора ($K_{\phi} = l / b$).

Общее сопротивление плёночного резистора прямоугольной формы

$$R_H = R_{\square} \cdot K_{\phi} + 2R_K, \quad (2)$$

где R_K – переходное сопротивление контакта резистивной и проводящей пленок.

При расчете резистора, выполненного в форме меандра, следует учитывать, что в местах изгиба потенциальное поле становится неоднородным (рис. 2), и у внутреннего угла выделяется энергия, существенно большая, чем у внешнего. Потенциальное поле выравнивается на расстоянии b от угла перегиба. Сопротивление углового квадрата оказывается равным $0,55 R_{\square}$ ($K_{\phi} = 0,55$). Поэтому сопротивление трех квадратов, составляющих прямой угол, равно $2,55 R_{\square}$.

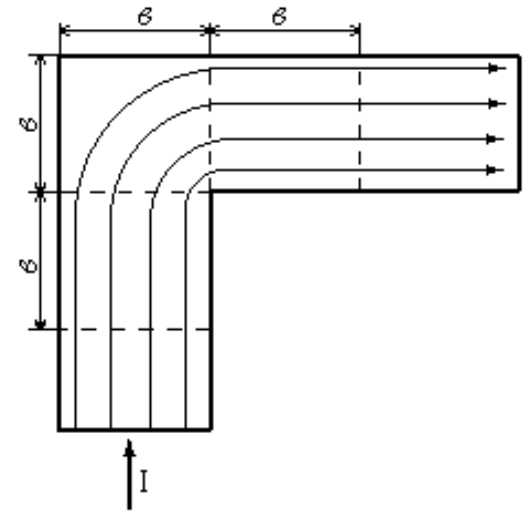


Рис. 2. Распределение плотности тока в резисторах типа «меандр»

Сопротивление изгиба закругленной формы (заштрихованный участок рис. 3)

$$R' = (1,57 / \ln (r_1 / r_2)) \cdot R_{\square}$$

В частном случае, когда ширина резистивной пленки $b = 2r_2$, сопротивление закругленной части «змейки»

$$2R' = 2,86 R_{\square}$$

Тогда выражение для общего сопротивления плёночного резистора, выполненного в форме меандра, запишется в виде:

$$R_M = R_{\square} \cdot n' + m \cdot 0,55 R_{\square} + 2R_K, \quad (3)$$

где n' – число квадратов с $K_{\phi} = 1$ (условно назовем их «чистыми»);

m – число угловых квадратов с $K_\phi = 0,55$.

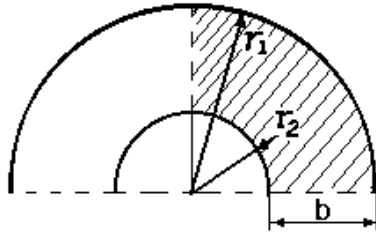


Рис. 3. Конструкция резистора типа «змейка»

Сопротивление «змейки» будет состоять из сопротивления прямолинейных и криволинейных участков резистора.

$$R_3 = R_{\square} \cdot n_{\Sigma} + [m^2 (1,57 / \ln (r_1 / r_2)) \cdot R_{\square}] + 2R_K, \quad (4)$$

где n_{Σ} – суммарное число квадратов прямолинейных участков;

m^2 – число изгибов конфигурации.

Следует учитывать, что величина контактного сопротивления в сильной степени зависит от выбора контактных материалов, а также технологических условий их получения. Поэтому в каждой лаборатории значения R_K определяют экспериментально. При расчете высокоомных резисторов обычно величиной R_K пренебрегают.

Допуск на номинальное сопротивление $\Delta R/R$ определяется относительным изменением сопротивления резистора, обусловленным техническими погрешностями изготовления и дестабилизирующими факторами, связанными с температурными изменениями и старением материалов.

Полная относительная погрешность резистора $\mathcal{N}_R = \Delta R/R$ определяется суммой всех погрешностей изготовления и погрешностей, возникающих при его эксплуатации

$$\mathcal{N}_R = \Delta R/R = \mathcal{N}_{R_{\square}} + \mathcal{N}_{K\phi} + \mathcal{N}_{R_K} + \mathcal{N}_{R_T} + \mathcal{N}_{R_{ct}}, \quad (5)$$

где $\mathcal{N}_{R_{\square}}$ – относительная погрешность воспроизведения R_{\square} ,

$$\mathcal{N}_{R_{\square}} = (\Delta\rho / \rho) + (\Delta d / d),$$

$$\mathcal{N}_{K\phi} – \text{относительная погрешность } K_\phi \mathcal{N}_{K\phi} = (\Delta l / l) + (\Delta b / b),$$

\mathcal{N}_{R_K} – погрешность переходных контактных сопротивлений,

\mathcal{N}_{R_T} – погрешность, связанная с температурной нестабильностью сопротивления,

$$\mathcal{N}_{R_T} = \alpha_R \cdot \Delta T,$$

$\mathcal{N}_{R_{ct}}$ – погрешность, связанная со старением материала.

Для характеристики температурной стабильности введено понятие о температурном коэффициенте сопротивления (ТКС) материала α_R

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

Температурная погрешность сопротивления определяется как

$$\mathcal{N}_{R_T} = \alpha_R \cdot \Delta T = \alpha_R (T_{\text{макс}} - T_{\text{комн.}}) = \alpha_R (T_{\text{макс}} - 20^\circ \text{C}).$$

Погрешность $\mathcal{N}_{R_{ct}}$, обусловленная старением пленки, определяет временную нестабильность сопротивления пленочного резистора. Она зависит от материала пленок, эффективности их защиты, а также от условий хранения и эксплуатации. Коэффициент старения пленочного резистора практически равен коэффициенту старения удельного поверхностного сопротивления, обусловленному изменением структуры пленки и ее окислением

$$\mathcal{N}_{R_{ct}} = (\Delta R / R)_{ct} = K_{ct} \cdot t,$$

где t – время эксплуатации, в течение которого сопротивление резистора изменилось на ΔR .

Для ГИМС обычно $\mathcal{N}_{R_{ct}}$ не превышает 3 %.

Погрешность \mathcal{N}_{R_K} зависит от технологических условий напыления металлических пленок, удельного сопротивления резистивных пленок и геометрических размеров перекрытия контактных площадок. При правильном выборе материалов и геометрии контактных площадок величиной \mathcal{N}_{R_K} можно пренебречь.

Допустимая мощность рассеяния $P_{\text{доп}}$ определяется удельной мощностью рассеяния P_0 материала пленки и площадью резистора

$$P_{\text{доп}} = P_0 \cdot S_R = P_0 \cdot l \cdot b. \quad (6)$$

Удельная мощность рассеяния P_0 определяет нагрузочную способность пленочных резисторов и является энергетической характеристикой данного материала (таблица 1).

Таблица 1

Свойства материалов для тонкопленочных резисторов

Материал	R_{\square} , Ом/□	$\alpha_R \cdot 10^4$, град ⁻¹	P_0 , Вт/см ²	$\mathcal{N}^* R_{CT}$, %
Хром	50–500	0,6–1,8	1	2
Тантал	25–100	– 12	3	1
TaN	50–500	1	3	0,2
Нихром	25–300	±1	2	1
МЛТГ-3М	50–500	0,6	2	±0,5
Кермет К-20С	$(1-3) \cdot 10^3$	0,5	2	±1
Кермет К-50С	$(3-10) \cdot 10^3$	– 5...+ 3	2	±1
Сплавы				
РС 4800	10^2-10^3	2	5	1
РС 3710	$50-3 \cdot 10^3$	– 1	5	0,5
РС 3001	$800-3 \cdot 10^3$	– 0,2	5	0,5
РС 4400	$(1-5) \cdot 10^3$	3	10	–
РС 2005	$(8-50) \cdot 10^4$	12	5	2
РС 5400	5–100	0,5	2	1

* после 1000 часов работы под нагрузкой 1 Вт/см² при 85 °С.

1.3. Расчет и проектирование топологии тонкопленочных резисторов

Конструктивный расчет тонкопленочных резисторов заключается в определении формы геометрических размеров и минимальной площади, занимаемой на подложке. При этом необходимо, чтобы резисторы обеспечивали рассеяние заданной мощности при удовлетворении требуемой точности изготовления в условиях существующих технологических возможностей.

Исходными данными для расчета являются:

номинальное сопротивление R_H , Ом;

допуск на номинал \mathcal{N}_R , %;

мощность рассеяния P_H , мВт;

допустимая мощность рассеяния $P_{доп}$, мВт;

относительные погрешности $\mathcal{N}_{R_{\square}}$, $\mathcal{N}_{K_{\phi}}$, \mathcal{N}_{R_K} , \mathcal{N}_{R_T} и $\mathcal{N}_{R_{CT}}$;

Δl , Δb – абсолютные погрешности изготовления l и b , мкм.

Порядок расчета пленочного резистора

1. По данным таблицы 1 выбирают материал резистивной пленки. Критериями выбора материала являются минимальные значения α_R , \mathcal{N}_R , K_{CT}

и оптимальные значения ρ , d , P_0 . При расчете группы резисторов определяют оптимальное с точки зрения минимума площади под резисторами сопротивление квадрата пленки R_{\square} по формуле:

$$R_{\square_{опт}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_{Hi}}{\sum_{i=1}^n 1/R_{Hi}}}, \quad (7)$$

где n – число резисторов, R_{Hi} – номинал i -го резистора.

Если в одной ГИМС содержатся высокоомные и низкоомные резисторы, т. е. $(R_{max}/R_{min}) \geq 200$, то возможно (хотя нежелательно) использование двух резистивных материалов.

2. Проводят проверку правильности выбора материала с точки зрения обеспечения заданной точности изготовления и стабильности резисторов. Для этого из выражения (5) определяют допустимую погрешность коэффициента формы $\mathcal{N}_{K_{\phi доп}}$.

$$\mathcal{N}_{K_{\phi доп}} = \mathcal{N}_R - \mathcal{N}_{R_{\square}} - \mathcal{N}_{R_T} - \mathcal{N}_{R_{CT}} - \mathcal{N}_{R_K}.$$

Если значение $\mathcal{N}_{K_{\phi доп}}$ получится отрицательным, то это означает, что изготовление резистора заданной точности из выбранного материала невозможно. В этом случае необходимо выбрать другой материал с другим $\mathcal{N}_{R_{\square}}$, $\mathcal{N}_{R_{CT}}$ и \mathcal{N}_{R_T} .

3. Используя соотношение (1), определяют коэффициент формы резистора K_{ϕ} . Если $1 \leq K_{\phi} \leq 10$, то рекомендуется конструировать полосковую конфигурацию резистора (рис.1, а); при значениях $K_{\phi} > 10$ резистор сложной формы (рис. 1, б, в, г); при $0,3 \leq K_{\phi} \leq 1$ резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины (рис. 1, д). Резистор с $K_{\phi} < 0,3$ конструировать не рекомендуется. В этом случае возможно использование конструкции резистора с внутренней контактной площадкой (рис. 1, е).

Если в одной схеме содержатся низкоомные и высокоомные резисторы, то возможно использование двух резистивных материалов, хотя это усложняет технологию изготовления ИМС.

4. Дальнейший расчет проводят в зависимости от формы резисторов.

Расчет прямоугольных полосковых резисторов

Для резисторов прямоугольной формы с $K_\phi \geq 1$ сначала определяют ширину, а затем длину резистора – Ширину резистора определяют из условия

$$b_{расч} \geq \max \{ b_{техн}, b_{точн}, b_p \}, \quad (8)$$

где $b_{техн}$, $b_{точн}$, b_p – минимальное значение ширины резистора, обусловленное технологическими возможностями изготовления, точностью воспроизведения и мощностью рассеяния соответственно:

а) значение $b_{техн}$ определяется возможностями технологического процесса.

б) ширина резистора, определяется точностными характеристиками

$$b_{точн} \geq (\Delta b + \Delta l / K_\phi) / \aleph_{K\phi доп.}, \quad (9)$$

где Δb и Δl – абсолютные погрешности изготовления ширины и длины резистора.

Если $\Delta b = \Delta l$, то

$$b_{точн} \geq \Delta b (K_\phi + 1) / (K_\phi \cdot \aleph_{K\phi доп.});$$

в) минимальное значение b_p определяют по формуле

$$b_p = \sqrt{\frac{P \cdot R_\square}{P_0 \cdot R_H}} = \sqrt{\frac{P}{P_0 \cdot K_\phi}}. \quad (10)$$

Для $b_{расч}$ выбирают наибольшее значение из полученных $b_{техн}$, $b_{точн}$, b_p . Затем находят топологическую ширину резистора $b_{топ}$ (ширину на чертеже топологии). За $b_{топ}$ принимают большее, чем $b_{расч}$ значение, кратное шагу координатной сетки, принятого для чертежа топологии. Шаг координатной сетки выбирают равным половине клетки координатной сетки. Например, если чертеж выполняют на миллиметровке, то за шаг координатной сетки принимают 0,5 мм. Тогда, если масштаб составляет 10 : 1, округление $b_{топ}$ проводят до величины, кратной 50 мкм.

Длину резистора $l_{расч}$ (без учета контактных площадок) определяют из выражения (2)

$$l_{расч} = b_{топ}(R_H - 2R_K) / R_\square = b_{топ} (R_H - 2k_1 \cdot R_\square) / R_\square, \quad (11)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий сопротивление контактов резистора. Этот коэффициент зависит от уровня технологии, материалов контактирующей пары и величины перекрытия контактных площадок l_K . В случаях, когда $l_K = b$, для упрощения расчета значение k_1 принимается равным 0,1.

За $l_{топ}$ принимают ближайшее к $l_{расч}$ число, кратное шагу координатной сетки.

Если $l_{топ} > 300$ мкм, то l_K можно выбирать из таблицы конструктивно-технологических ограничений, оставляя (для упрощения расчета) значения $k_1 = 0,1$. Для фотолитографических методов создания топологии $l_K \geq 100$ мкм, для масочных $l_K \geq 200$ мкм.

Полная длина резистора с учетом перекрытия контактных площадок

$$l_{полн} = l_{топ} + 2 \cdot l_K. \quad (12)$$

Площадь, занимаемая резистором на подложке,

$$S = l_{полн} \cdot b. \quad (13)$$

После расчета рисуют топологию резистора.

Для резисторов, имеющих $K_\phi < 1$, сначала определяют длину, а затем ширину. Расчетное значение длины резистора выбирают из условия

$$l_{расч} \geq \max \{ l_{техн}, l_{точн}, l_p \}, \quad (14)$$

где

$$l_{точн} \geq (\Delta l + \Delta b \cdot K_\phi) / \aleph_{K\phi доп.}, \quad (15)$$

$$l_p = \sqrt{P_H \cdot K_\phi / P_0}. \quad (16)$$

и они имеют тот же смысл, что в (8).

За $l_{топ}$ принимают **большее**, чем $l_{расч}$ значение, кратное шагу координатной сетки. Полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок определяют по формуле (12).

Ширину $b_{расч}$ определяют из формулы для R_H

$$b_{расч} = R_\square \cdot l_{топ} / (R_H - 2k_1 R_\square).$$

За $b_{топ}$ принимают ближайшее к $b_{расч}$ число, кратное шагу координатной сетки.

После расчета резистора рисуют его топологию.

Расчет тонкопленочных резисторов сложной формы

Наибольшее применение для высокоомных резисторов с $K_\phi > 10$ находит форма меандра. Расчет меандра проводят из условия минимальной габаритной площади, занимаемой резистором, в такой последовательности: сначала по формулам (8–10) определяют ширину резистивной полоски. За-

тем проводят оптимизацию формы и размеров резистора. Для этого определяют *число звеньев меандра* N из условия, чтобы площадь, занимаемая резистором, была *минимальной*. Очевидно, это будет в случае, когда меандр впишется в квадрат. Для резистора, показанного на рис. 1, 2, это условие будет выполняться при $L_x = L_y + 2b$. При конструировании резисторов в форме меандра обычно выбирают a и b *равными*. Для такого резистора

$$\begin{aligned} L_x &= (2N - 1) \cdot b, \\ L_y &= (n_0 \cdot b - (N - 1) \cdot 3b) / N, \end{aligned}$$

где n_0 – полное число квадратов (без учета контактных).

Тогда, если $L_x = L_y + 2b$,

$$[n_0 \cdot b - (N - 1) \cdot 3b] / N + 2b = (2N - 1)b. \quad (17)$$

Отсюда $N = \pm \sqrt{(n_0 + 3)/2}$.

Для определения N можно принять $n_0 \approx 1/b = K_\phi$, тогда

$$N \approx \sqrt{\frac{K_\phi + 3}{2}}. \quad (18)$$

Значение N округляют до ближайшего целого.

После этого по формуле (3) определяют число «чистых квадратов». В формуле (3) m – *число угловых квадратов* = $(2N - 1)$, а коэффициент k_1 , учитывающий контактное сопротивление, принимают равным 0,1.

Тогда

$$n' = [R_H - 2(N - 1) \cdot 0,55 R_\square - 2 \cdot 0,1 R_\square] / R_\square. \quad (19)$$

Полученные значения b , L_x , L_y , N , n' позволяют составить топологический чертеж.

Квадратная или близкая к ней форма резистора типа «меандр» часто оказывается неудобной при компоновке элементов на подложке микросхемы. В этих случаях, задавшись одним из размеров, например, L_x определяют другой размер и число звеньев меандра N' . Для случая, когда расстояние между звеньями резистора $a = b$,

$$N' = (L_x + b) / 2b.$$

Пример расчета группы тонкопленочных резисторов

Рассчитать группу тонкопленочных резисторов при следующих исходных данных:

<i>номиналы резисторов</i>	$R_1 = 10 \text{ кОм}; R_2 = 1 \text{ кОм}; R_3 = 100 \text{ кОм};$
<i>допуск на номинал</i>	$\delta_{R1} = 5 \%; \delta_{R2} = 15 \%; \delta_{R3} = 15 \%;$
<i>мощность рассеяния</i>	$P_{H1} = 8 \text{ мВт}; P_{H2} = 10 \text{ мВт}; P_{H3} = 15 \text{ мВт};$
<i>диапазон температур</i>	$(-50 - +100) \text{ }^\circ\text{C}; \delta_{R_\square} = 2,5 \%; \delta_{R_{ct}} = 0,3 \%.$

Масштаб чертежа – **20 : 1** на миллиметровке. Технология позволяет получить $\Delta l = \Delta b = 5 \text{ мкм}$, а $b_{\text{техн}} = 125 \text{ мкм}$.

1. По формуле (7) определяем значение

$$R_{\square \text{ опт}} = \sqrt{\frac{10 + 1 + 100}{0,1 + 0,01 + 1}} = 10 \text{ кОм}/\square.$$

Из табл. 1 выбираем материал резистивной пленки с ближайшим значением R_\square . Подходящим по этому параметру является кермет К-50С ($R_\square = 10 \text{ кОм}/\square$, $\alpha_R = -5 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/^\circ\text{C}$, $P_0 = 20 \text{ мВт}/\text{мм}^2$).

2. Проверяем правильность выбора материала для **R1**

$$\begin{aligned} \delta_{R1} &= 5 \cdot 10^{-4} (100 - 20) 100 \% = 4 \%, \\ \delta_{K\phi \text{ доп}} &= 5 - 4 - 2,5 - 0,3 < 0. \end{aligned}$$

Это означает, что изготовление **R1** с заданной точностью невозможно. Необходимо выбрать другой материал с меньшим δ_{R1} . Наименьшее значение α_R имеет сплав РС-3001 ($R_\square = 2 \text{ кОм}/\square$, $\alpha_R = -0,2 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/^\circ\text{C}$, $P_0 = 50 \text{ мВт}/\text{мм}^2$). Определяем для него

$$\begin{aligned} \delta_{R1} &= 0,2 \cdot 10^{-4} 80 \cdot 100 \% = 0,16 \%, \\ \delta_{K\phi \text{ доп}} &= 5 - 0,16 - 2,5 - 0,3 = 2,04 \%. \end{aligned}$$

Следовательно, сплав РС-3001 подходит для изготовления всех резисторов.

3. Определяем коэффициент формы резисторов: $K_{\phi 1} = 5$; $K_{\phi 2} = 0,5$; $K_{\phi 3} = 50$.

Для **R1** и **R2** выбираем полосковую форму, для **R3** – форму *меандра*.

4. Если метод изготовления резистора не задан, то из анализа точностных данных и площади подложки выбирают способ получения конфигурации резистора. В данном случае получение $\aleph_{R1} = 5\%$ и $\Delta l = \Delta b = 5$ мкм может обеспечить только фотолитография.

Далее проводим расчет для каждого резистора.

Расчет резистора R1

По формулам (8–10) определяем $b_{1\text{расч}}$.

$$b_{1\text{точн}} = \frac{5 \cdot (5 + 1)}{5 \cdot 0,0204} = 294,1 \text{ мкм};$$

$$b_{1p} = \sqrt{8 / (5 \cdot 10^{-5} \cdot 5)} = 178,8 \text{ мкм}.$$

Принимаем значение $b_{\text{топ}} = 300$ мкм.

Тогда длина резистора

$$l_{1\text{расч}} = \frac{300(10 - 2 \cdot 0,1 \cdot 2)}{2} = 1440 \text{ мкм};$$

$$l_{1\text{топ}} = 1450 \text{ мкм};$$

$$l_{\text{полн. топ}} = 1450 + 2 \cdot 300 = 2050 \text{ мкм}.$$

Площадь резистора $S_1 = 2050 \cdot 300 = 0,615 \text{ мм}^2$.

Расчет резистора R2

Находим значение $\aleph_{K\text{доп}}$ для этого резистора:

$$\aleph_{K\text{доп}} = 15 - 2,5 - 0,16 - 0,3 = 12,04\%.$$

По формулам (14–16) определяем

$$l_{2\text{точн}} = \frac{5 + 5 \cdot 0,5}{0,1204} = 62,5 \text{ мкм};$$

$$l_{2p} = \sqrt{\frac{10 \cdot 0,5}{5 \cdot 10^{-5}}} = 316,2 \text{ мкм}.$$

Принимаем $l_{2\text{топ}} = 325$ мкм.

Тогда

$$b_{2\text{расч}} = \frac{2 \cdot 325}{1 - 2 \cdot 0,1 \cdot 2} = 1083 \text{ мкм}, \quad b_{2\text{топ}} = 1075 \text{ мкм}.$$

Так как $b_{2\text{топ}}$ составляет значительную величину, то не имеет смысла выбирать $l_K = b_{2\text{топ}}$. Выберем из таблицы конструктивно-технологических ограничений $l_K = 200$ мкм.

Тогда с учетом перекрытия контактных площадок $b_{\text{полн}} = 325 + 2 \cdot 200 = 725$ мкм.

Площадь резистора $S_2 = 725 \cdot 1075 = 0,790 \text{ мм}^2$.

Расчет резистора R3

Находим ширину резистивной полоски резистора R3:

$$b_{3\text{точн}} = \frac{(5 + 5/50) \cdot 100}{(15 - 2,5 - 0,16 - 0,3) \cdot 0,12} = 52,5 \text{ мкм};$$

$$b_{3p} = \sqrt{\frac{15}{5 \cdot 10^{-5} \cdot 50}} = \sqrt{0,006 \text{ мм}^2} = 77,5 \text{ мкм}.$$

Принимаем $b_{3\text{топ}} = 125$ мкм, т. к. $b_{3\text{техн}} = 125$ мкм.

Примем расстояние между звеньями меандра $a = b = 125$ мкм.

Определим оптимальное число звеньев меандра по (18)

$$N \approx \sqrt{\frac{50 + 3}{2}} \approx 5.$$

По формуле (19) определяем число чистых квадратов.

$$n' = \frac{100 - 2 \cdot 4 \cdot 0,55 \cdot 2 - 2 \cdot 0,1 \cdot 2}{2} = 45,4.$$

Находим число чистых квадратов в одном звене

$$n_{Ly} = \frac{n' - (N - 1)}{N} = \frac{45,4 - 4}{5} = 8,28.$$

Тогда $L_{y\text{расч.}} = 8,28 \cdot 125 = 1034$ мкм. С учетом шага координатной сетки $L_{y\text{топ}} = 1025$ мкм; $L_y + 2b = 1250$ мкм; $L_x = (2N - 1) \cdot b = 9 \cdot 125 = 1125$ мкм.

$$S_M = 1275 \cdot 1125 \approx 1,43 \text{ мм}^2.$$

В этом примере $L_{y \text{ топ}}$ пришлось округлять до 1025 мкм. На округлении мы потеряли почти 1 % точности изготовления $\aleph_{\text{кф}}$. Эту потерю можно уменьшить, если добавить

$$L'_y = \Delta L_y \cdot N = 9 \cdot 5 = 45 \text{ мкм}.$$

С учетом шага координатной сетки $L'_y = 50$ мкм. Эту длину можно добавить к одному из выводов **R3** или по $1/2 L'_y \text{ топ}$, т. е. 25 мкм к каждому.

Улучшение точности проектирования можно получить и при округлении n_{Ly} до целого числа в меньшую сторону, а остаток добавить к одному или обоим выводам.

$$n_{Ly} = (n' - (N - 1)) / N = \frac{54,4 - 4}{5} = \frac{41,4}{5} = 8 \text{ (1,4 остаток)}.$$

Длина L_y тогда составит: $L_y = n_{Ly} b = 125 \cdot 8 = 1000$ мкм.

Остаток (1,4 чистых квадрата) необходимо присоединить к конечным квадратам. В зависимости от местоположения резистора в схеме этот остаток можно присоединить к обоим конечным квадратам, например, по 0,7 квадрата (рис. 4, в), или к одному из них (1,4 квадрата).

Длина перекрытия $l_k = 125$ мкм.

Площадь резистора:

$$S_3 = b^2 \cdot (2N - 1)(n_{Ly} + 2) = 125^2 \cdot 9 \cdot 10 = 1406250 \text{ мкм}^2 \approx 1,4 \text{ мм}^2.$$

Топологические чертежи резисторов **R1**, **R2** и **R3** приведены на рис. 4.

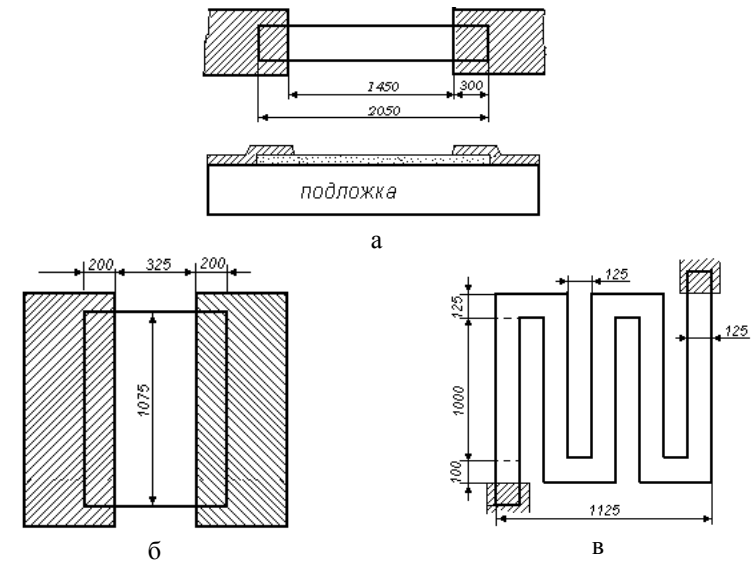


Рис. 4. Топологические чертежи резисторов: а – **R1**, б – **R2**, в – **R3**.

1.4. Расчет и проектирование топологии толстопленочных резисторов

Если в одной ГИМС или МСБ, изготавливаемой по толстопленочной технологии, отношение номиналов $R_{\text{min}}/R_{\text{max}} > 5$, то для получения пленочных резисторов на одной плате рекомендуется использование нескольких резистивных паст. При этом все резисторы должны иметь *прямоугольную полосковую форму* с $0,2 \leq K_{\phi} \leq 0,6$. Поскольку в процессе производства толстопленочных резисторов чрезвычайно трудно обеспечить приемлемую точность сопротивления, применяется лазерная подгонка номиналов. В связи с этим расчет резисторов на точность не производят. В остальном расчет толстопленочных резисторов проводят по той же схеме, что и для тонкопленочных.

2. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Конструктивно пленочные конденсаторы выполняются в виде трехслойных структур металл–диэлектрик–металл или металл–диэлектрик–полупроводник и состоят из проводящих верхней и нижней обкладок, разделенных слоем диэлектрического материала. Принципиально возможно конструировать конденсаторы и в виде многослойной структуры, однако при этом возрастает вероятность брака и их стоимость.

2.1. Конструкции пленочных конденсаторов

В зависимости от толщины пленок, применяемых при изготовлении, различают *тонкопленочные* и *толстопленочные* конденсаторы. На рис. 5 приведены наиболее распространенные конструкции пленочных конденсаторов. Конструкции, изображенные на рис. 5, (а–в) используются для конденсаторов с большой емкостью. В этих конструкциях неточность совмещения обкладок мало сказывается на изменении емкости, так как контур диэлектрика заходит за пределы обеих обкладок. Небольшое изменение емкости в первых двух конструкциях возможно за счет изменения вклада емкости вывода верхней обкладки при ее смещении относительно нижней. Для устранения этой погрешности с противоположной стороны вывода верхней обкладки делают *компенсатор* (рис. 5, в). Современная технология позволяет получить тонкопленочные конденсаторы с емкостью до 10^5 пФ. Такие конденсаторы могут иметь сложную фигурную конструкцию. Это позволяет конструктору при разработке топологии ИМС полностью использовать свободные участки площади подложки.

Толстопленочные конденсаторы, как правило, изготавливают прямоугольной (квадратной) формы без компенсаторов с емкостью 50–2500 пФ и допуском $\pm 15\%$.

При выборе конструкции пленочного конденсатора необходимо учитывать, что на высоких частотах (> 10 МГц) его емкость падает. Причем при двустороннем расположении выводов (рис. 5, а) этот спад меньше, чем при одностороннем (рис. 5, б). Конструкция, изображенная на рис. 5, г, используется для пленочных конденсаторов небольшой емкости (десятки пФ). Обычно для ее получения достаточна площадь взаимного перекрытия пересекающихся коммутационных проводников, разделенных пленкой диэлектрика.

При активной площади конденсатора менее 5 мм^2 начинает сказываться *краевой эффект*, поэтому при площади верхней обкладки менее 1 мм^2 рекомендуется использовать конструкцию, выполненную в виде последовательно соединенных конденсаторов (рис. 5, д). При малых емкостях (доли и единицы пФ) используют гребенчатую (рис. 5, е) или *полосковую* формы.

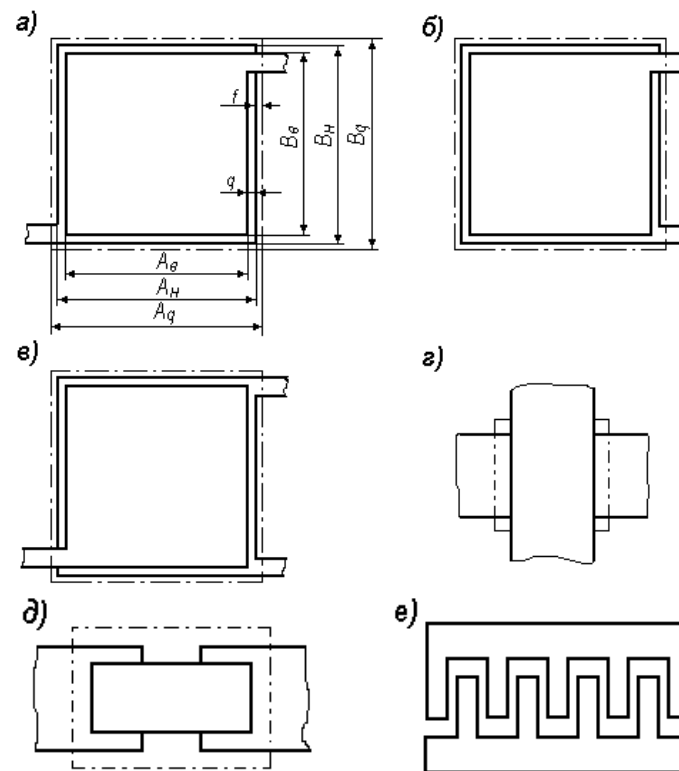


Рис. 5. Конструкция плёночных конденсаторов

2.2. Требования к материалам, их основные характеристики

Требования к материалам пленочного конденсатора определяются требованиями, предъявляемыми к самому изделию. Конденсаторы ИМС должны:

- занимать минимальную площадь;
- обладать хорошей добротностью;
- иметь высокую надежность;
- обладать высокой температурной и временной стабильностью.

Выполнение этих требований в большей степени зависит от материала диэлектрика. Поэтому он должен иметь хорошую адгезию к подложке и материалу обкладок, обладать высокой электрической прочностью и малыми потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость и минимальную гигроскопичность, не разрушаться в процессе формирования пленок и быть

совместимым с технологическими процессами изготовления других элементов микросхем.

Диэлектрик тонкопленочных конденсаторов формируется методами *термического напыления, анодного окисления, ионно-плазменного и реактивного распыления*. Диэлектрические пасты для толстопленочных конденсаторов изготавливаются на основе смеси керамических материалов и флюсов. Толщина пленки после термической обработки составляет 40–60 мкм. В таблице 2 приведены основные характеристики диэлектрических материалов, применяемых для изготовления пленочных конденсаторов.

Таблица 2

Свойства диэлектрических материалов для пленочных конденсаторов

Материал	$\epsilon, f = 1$ КГц	$E_{ПР} \cdot 10^{-6}$, В/см	$\text{tg} \delta \cdot 10^{-3}$, пФ/см ²	$C_0 \cdot 10^{-3}$, пФ/см ²	$TKE \cdot 10^4$, 1/град $T = -60 \div + 85 \text{ } ^\circ\text{C}$
SiO ₂	4	10		20	2
SiO	6–8	1–2	1–2	5–10	1–2
GeO	10–12	0,5–0,8	5–7	5–20	3–5
Al ₂ O ₃	10	9	0,3–1,5	30–80	1,5–5
Ta ₂ O ₅	21–27	5	10	100	2–3
TiO ₂	30–100	0,24	26	10–100	3
Sb ₂ S ₃	18–21	0,3–0,5	4–10	1–1,5	5
АСС	5,2–5,5	3–5	3	30	1,5
БСС	3,9–4,2	3–5	1	15	0,2
ИБС	10–12	2–3	7	60	5
Паста					
ПК-12	—	$U_{ПР} \geq 150 \text{ В}$	30–40	10	± 10
Паста					
ПК 1000-30	—	$U_{ПР} \geq 150 \text{ В}$	36	3,7	± 10

АСС – алюмосиликатное стекло;

БСС – боросиликатное стекло, в состав которого входит 15 % В₂О₃ и 85 % SiO₂;

ИБС – иттрий-боритное стекло.

Диэлектрическая проницаемость ϵ является одной из важнейших характеристик диэлектрика и показывает, во сколько раз уменьшается кулоновское взаимодействие между зарядами при переносе их из вакуума в данную среду. Величина ϵ отражает увеличение емкости конденсатора при замене в нем вакуума диэлектриком.

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (20)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см – электрическая постоянная, S – площадь перекрытия пластин конденсатора, d – расстояние между ними.

Диэлектрическая проницаемость зависит от материала, температуры, частоты и напряженности поля.

Электрическая прочность $E_{ПР}$ диэлектрических пленок характеризуется напряженностью электрического поля, при которой происходит локальное разрушение диэлектрика с образованием проводящего канала: $E_{ПР} = U_{ПР} / d$, где $U_{ПР}$ – пробивное напряжение, d – толщина диэлектрика. Пробой диэлектрических пленок вызывается, как тепловыми, так и электрическими процессами. Тепловой пробой обусловлен экспоненциальным ростом электропроводности диэлектрика при повышении его температуры.

Электрический пробой обусловлен туннельным переходом электронов в зону проводимости из валентной зоны, с примесных уровней или металлических электродов, а также лавинным размножением электронов за счет ударной ионизации в высоких электрических полях.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ является количественной мерой потерь в данном диэлектрике. Эти потери обусловлены свойствами материала диэлектрика и определяются суммой миграционных и дипольно-релаксационных потерь. Миграционные потери связаны со сквозной электропроводностью в диэлектрике, уменьшаются с увеличением частоты по гиперболическому закону и увеличиваются по экспоненциальному закону с ростом температуры. Дипольно-релаксационные потери обусловлены процессами ориентации диполей в электрическом поле при их хаотических, обусловленных тепловым движением, колебаниях около среднего положения равновесия.

Материал обкладок тонкопленочного конденсатора должен обладать высокой электропроводностью, малой миграционной подвижностью атомов для предотвращения диффузии в диэлектрик, хорошей адгезией как к подложке, так и ранее сформированным пленкам, невысокой температурой нанесения и достаточной химической стойкостью. Материал нижней обкладки конденсатора должен иметь минимальное количество микронеровностей высотой не более 0,025 мкм.

Из всех металлов с высокой проводимостью (Au, Ag, Cu, Al) только последний наиболее полно удовлетворяет перечисленным требованиям. Другие из названных металлов не нашли применения в основном из-за высокой миграционной подвижности атомов. Часто, при изготовлении обкладок конденсатора из алюминия, применяют подслои из титана или ванадия.

Толстопленочные проводниковые пленки, кроме выполнения общих требований, должны быть совместимыми с диэлектрическими пастами. Проводниковые пасты изготавливаются на основе золота, золота-платины, золота-палладия, палладия-серебра, индия, рения. Пасты на основе золота обеспечивают наиболее низкое поверхностное сопротивление ($R_{\square} = 0,001 - 0,003 \text{ Ом} / \square$).

2.3. Основные параметры конденсатора

1. Номинальная емкость C_H – задается условиями схемы и определяется по известной формуле

$$C_H = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} = C_0 \cdot S = C_0 \cdot A_B B_B,$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 0,0885$ пФ/см);

C_0 – удельная емкость ($C_0 = 0,0885(\varepsilon/d)$ пФ/см²);

ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь взаимного перекрытия обкладок.

При определении C_H пленочных конденсаторов малой площади необходимо учитывать увеличение емкости, обусловленное влиянием краевого эффекта. В общем случае

$$C_H = K \cdot C_0 \cdot S, \quad (21)$$

где K – коэффициент, учитывающий влияние краевого эффекта

$$K = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{C_H}{C_0} > 5 \text{ мм}^2; \\ 1,3 - 0,06 \frac{C_H}{C_0}, & \text{если } 1 \leq \frac{C_H}{C_0} \leq 5 \text{ мм}^2. \end{cases}$$

Емкость гребенчатого конденсатора определяется по формуле

$$C = \beta \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \cdot l; \quad (22)$$

где β – коэффициент, определяемый из графика (рис. 6);

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрическая проницаемость материала подложки и среды;

l – длина совместной границы 2-х проводников гребенки.

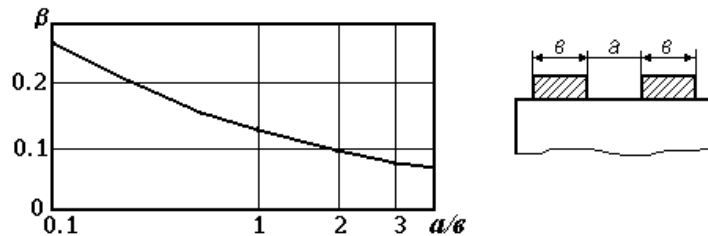


Рис. 6. Коэффициент β

2. Рабочее напряжение U_p обеспечивается подбором материала диэлектрической пленки с необходимыми значениями $E_{ПР}$ и толщины пленки d . Толщина пленки d , выбираемая из условия обеспечения заданного U_p , определяется из выражения

$$d = \eta \cdot U_p / E_{ПР}, \quad (23)$$

где η – коэффициент запаса, обеспечивающий надежные характеристики. Для пленочных конденсаторов коэффициент запаса выбирается равным 2÷10. Коэффициент запаса $\eta = 5÷10$ выбирается для расчета конденсаторов повышенной надежности.

3. Добротность пленочного конденсатора Q зависит от его конструкции используемых материалов. Она определяется потерями в диэлектрике и в обкладках конденсатора

$$Q = (\text{tg } \delta)^{-1} = (\text{tg } \delta_g + \text{tg } \delta_{\text{обкл}})^{-1}, \quad (24)$$

где $\text{tg } \delta_{\text{обкл}}$ – тангенс угла потерь в обкладках и выводах конденсатора;

$$\text{tg } \delta_{\text{обкл}} = 2\pi \cdot f_{\text{раб}}(r_{\text{обкл}} + r_B) \cdot C, \quad (25)$$

$r_{\text{обкл}}$ – последовательное сопротивление обкладок;

r_B – сопротивление выводов.

Сопротивление $r_{\text{обкл}}$ зависит от конструкции конденсатора, проводимости материалов обкладок, их геометрических размеров, а также картины распределения линий тока в обкладках. Для конденсаторов с 2-сторонним расположением выводов

$$r_{\text{обкл}} \approx (r_{\text{он}} + r_{\text{ов}})/3,$$

где $r_{\text{он}}$ и $r_{\text{ов}}$ – сопротивление нижней и верхней обкладок. Добротность пленочного конденсатора $Q = 10÷100$. В практических расчетах $\text{tg } \delta$ – справочная величина.

Тангенс угла диэлектрических потерь существенно зависит от частоты сигнала и температуры окружающей среды.

Относительная погрешность емкости \mathcal{N}_C

$$\mathcal{N}_C = \mathcal{N}_{C0} + \mathcal{N}_{CT} + \mathcal{N}_S + \mathcal{N}_{Ccm}, \quad (26)$$

где \mathcal{N}_{C0} – относительная погрешность C_0 , характеризующая воспроизводимость этой величины в условиях данного производства.

\mathcal{N}_S – относительная погрешность активной площади

$$\aleph_S = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta A \cdot B + \Delta B \cdot A}{A \cdot B}, \quad (27)$$

где ΔS , ΔA , ΔB – соответственно абсолютные погрешности S , A и B верхней обкладки пленочного конденсатора \aleph_S минимальна, если обкладки пленочного конденсатора имеют квадратную форму. Отклонение контура верхней обкладки от квадрата увеличивает \aleph_S для учета этих отклонений используют коэффициент формы $K_\phi = A/B$.

Тогда при $\Delta A = \Delta B$

$$\aleph_S = \Delta A \frac{1 + K_\phi}{\sqrt{K_\phi \cdot S}}. \quad (28)$$

\aleph_{CT} – относительная температурная погрешность

$$\aleph_{CT} = (1/C_H) \cdot (dC/dT) \cdot (T_{\max} - T_{\text{комн}}) = \alpha_C (T_{\max} - 20 \text{ }^\circ\text{C}), \quad (29)$$

где $\alpha_C = (1/C) \cdot (dC/dT)$ – ТКЕ, выбираемый из табличных данных.

Коэффициент старения \aleph_{Cst} определяет изменение емкости пленочного конденсатора, которое происходит вследствие деградиционных явлений в пленке диэлектрика за время Δt :

$$\aleph_{Cst} = (\Delta C/C)/\Delta t \approx \aleph_{CT}\epsilon, \quad (30)$$

где $\aleph_{CT}\epsilon$ – коэффициент старения диэлектрической проницаемости.

Для обеспечения заданной точности емкости при изготовлении пленочного конденсатора необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\aleph_S \leq \aleph_{S \text{ доп}}, \quad (31)$$

где $\aleph_{S \text{ доп}}$ – максимально допустимая относительная погрешность активной площади, которая может быть определена, как

$$\aleph_{S \text{ доп}} = \aleph_C - \aleph_{C0} - \aleph_{CT} - \aleph_{Cst}. \quad (32)$$

Подставляя значение

$$\aleph_S = \Delta A \frac{1 + K_\phi}{\sqrt{K_\phi \cdot S}}$$

в условие (31), получим

$$S \geq \left(\frac{\Delta A}{\aleph_{S \text{ доп}}} \right) \cdot \frac{(1 + K_\phi)^2}{K_\phi}. \quad (33)$$

После этого можно определить минимальную удельную емкость, обеспечивающую заданную точность

$$C_{0 \text{ точн}} = \frac{C}{S} = C \left(\frac{\aleph_{S \text{ доп}}}{\Delta A} \right) \cdot \frac{K_\phi}{(1 + K_\phi)^2}. \quad (34)$$

В частном случае когда $K_\phi = 1$

$$C_{0 \text{ точн}} = C \left(\frac{\aleph_{S \text{ доп}}}{2\Delta A} \right)^2. \quad (35)$$

2.4. Порядок расчета тонкопленочного конденсатора

Расчет тонкопленочных конденсаторов производится в следующей последовательности:

1. Из табличных данных (например, табл. 2) выбирают диэлектрик с определенными значениями ϵ и E_{IP} малыми значениями ТКЕ, $tg \delta$ и K_{ct} (если они не заданы).

2. Из условия $d_{\min} \geq (\eta \cdot U_p)/E_{IP}$ определяют минимальную толщину диэлектрика, обеспечивающего необходимое значение U_p .

Обычно выбирается η равным 2–3.

3. Определяют удельную емкость конденсатора исходя из условия электрической прочности:

$$C_{0U} = 0,0885 \cdot (\epsilon / d).$$

4. Оценивают относительную температурную погрешность \aleph_{CT} исходя из условия (29) и допустимую погрешность активной площади конденсатора $\aleph_{S \text{ доп}}$ (из условия 32). Если получится, что $\aleph_{S \text{ доп}} \leq 0$, то изготовление конденсатора с заданной точностью невозможно. Нужно выбрать другой диэлектрик с меньшим ТКЕ и \aleph_{Cst} .

5. Используя выражение (34) или (35), определяют удельную емкость $C_{0 \text{ точн}}$ с учетом точности его изготовления.

6. Выбирают минимальное значение удельной емкости из условия

$$C_0 \leq \min \{C_{0и}, C_{0 \text{ точн}}\}, \quad (36)$$

которое обеспечивает заданное U_P и требуемое \aleph_C .

7. По заданному значению C_H и полученному из (36) значению C_0 определяют коэффициент K , учитывающий краевой эффект.

8. С учетом коэффициента K по (21) определяют площадь перекрытия обкладок конденсатора. При этом, если окажется $S < 1 \text{ мм}^2$, то выбирают диэлектрик с меньшим ϵ или большей толщиной. Если это не дает желаемых результатов, то изменяют конструкцию конденсатора.

9. Определяют толщину d , соответствующую выбранному значению C_0 .

10. Рассчитывают размеры обкладок и диэлектрика конденсатора. Для этого выбирают форму и определяют коэффициент K_ϕ . Если выбрана прямоугольная форма, то геометрические размеры верхней обкладки

$$A_B = \sqrt{S \cdot K_\phi}; \quad B_B = \frac{A_B}{K_\phi};$$

Если $K_\phi = 1$, то $A_B = B_B = \sqrt{S}$. Полученные размеры A_B и B_B округляют до значений, кратных шагу координатной сетки с учетом масштаба топологического чертежа. После этого, с учетом допусков на перекрытие, определяют размеры нижней обкладки:

$$A_H = A_B + 2(q + \beta); \quad B_H = B_B + 2(q + \beta), \quad (37)$$

где q – коэффициент перекрытия, β – погрешность совмещения обкладок.

Размеры диэлектрика.

$$A_d = A_H + 2(f + \beta); \quad B_d = B_H + 2(f + \beta), \quad (38)$$

где f – коэффициент перекрытия нижней обкладки и диэлектрика.

11. Определяют занимаемую площадь $S = A_d \cdot B_d$.

12. Если заданы $\text{tg } \delta$ и Q , то по (24) и (25) определяют их значения для рассчитанного конденсатора. Полученные диэлектрические потери не должны превышать заданных значений.

13. Вычерчивают топологический чертеж.

При проектировании группы конденсаторов расчет начинают, как правило, с конденсатора, имеющего наименьшее значение C_H .

2.5. Пример расчета тонкопленочного конденсатора

Дано: $C_H = 1000 \text{ пФ}$; $\aleph_C = 15 \%$; $U_P = 20 \text{ В}$; $T = (-40 \div +80) \text{ }^\circ\text{C}$; длительность эксплуатации ИМС 1000 часов.

Технологические погрешности $\aleph_{C_0} = \pm 8 \%$; $\Delta A = \Delta B = \beta = 20 \text{ мкм}$; $q = f = 100 \text{ мкм}$.

Принимаем $\eta = 3$. Масштаб чертежа топологии 20 : 1. Координатная сетка – миллиметровка.

1. Для диэлектрического слоя выбираем монооксид германия ($\epsilon = 10$, $\text{tg } \delta = 0,001$; $E_{\text{пр}} = 100 \text{ В/мкм}$; $\alpha_C = 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$; $\aleph_{C_{\text{см}}} = -1 \%$).

2. Толщина диэлектрика $d_{\text{min}} = 3 \cdot 20 / 10 = 0,6 \text{ мкм}$.

3. Находим удельную емкость

$$C_{0u} = 0,0885 \cdot \frac{\epsilon}{d} = 0,0885 \cdot \frac{10}{0,6 \cdot 10^{-4}} = 1,475 \cdot 10^4 \text{ пФ/см}^2 = 147,5 \text{ пФ/мм}^2.$$

4. Температурная погрешность емкости

$$\aleph_{C_T} = 5 \cdot 10^{-4} (80 - 20) \cdot 100 = 3 \%,$$

а допустимая погрешность активной площади конденсатора

$$\aleph_{C_{\text{доп}}} = 15 - 8 - 3 - 1 = 3 \%.$$

5. Определяем удельную емкость конденсатора, исходя из заданной погрешности

$$C_{0\text{точн}} = 1000 \left[\frac{0,03}{2 \cdot 0,02} \right]^2 = 562,5 \text{ пФ/мм}^2.$$

6. Выбираем величину C_0 с учетом обоих условий: $C_0 = 140 \text{ пФ/мм}^2$

7. Так как $\frac{C_H}{C_0} > 5 \text{ мм}^2$, то коэффициент $K = 1$.

8. Площадь перекрытия обкладок $S = 1000 / 1 \cdot 140 = 7,14 \text{ мм}^2$.

9. Толщина диэлектрика, соответствующая выбранному значению C_0 .

$$d = 0,0885 \cdot \frac{10}{140 \cdot 100} = 0,63 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 0,63 \text{ мкм}.$$

10. Определяем геометрические размеры обкладок и диэлектрика конденсатора:

$$A_{\text{врасч}} = B_{\text{врасч}} = \sqrt{7,14} = 2,67 \text{ мм}.$$

С учетом шага координатной сетки

$$A_{B_{\text{топ}}} = B_{B_{\text{топ}}} = 2,675 \text{ мм},$$

$$A_{H_{\text{расч}}} = B_{H_{\text{расч}}} = 2,675 + 2 \cdot (0,1 + 0,02) = 2,915 \text{ мм},$$

$$A_{H_{\text{топ}}} = B_{H_{\text{топ}}} = 2,925 \text{ мм},$$

$$A_{д \text{ расч}} = B_{д \text{ расч}} = 2,925 + 2(0,1 + 0,02) = 3,165 \text{ мм},$$

$$A_{д \text{ топ}} = B_{д \text{ топ}} = 3,175 \text{ мм}.$$

11. Площадь, занимаемая конденсатором $S = 3,175^2 \approx 10 \text{ мм}^2$.
 12. Составляем топологию рассчитанного конденсатора (рис. 7).

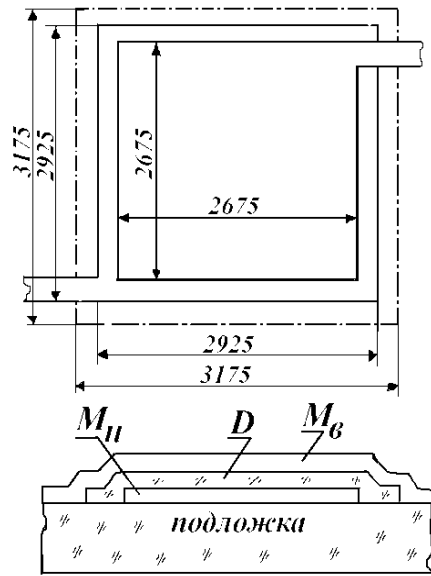


Рис. 7. Топологический чертёж конденсатора (масштаб не соблюдался)

3. ПЛЕНОЧНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Индуктивные элементы широко распространены в аналоговых ГИМС. Они входят в состав колебательных контуров автогенераторов, полосовых фильтров, цепей коррекции частотных характеристик и т. п.

Пленочные индуктивности выполняют в форме *круглых* или *прямоугольных* одновитковых петель (рис. 8, б, в) или *многовитковых спиралей* (рис. 8, г, д). Индуктивность подобных пленочных спиралей ограничена

значением 5 мкГн. Более высокие значения индуктивностей требуют выделения значительной площади.

Индуктивность пленочной спирали можно значительно увеличить нанесением на ее поверхность ферритовой пленки или закреплением ферритовой пластинки. *Индуктивность тонкопленочной полоски* (рис. 8, а) определяется по формуле

$$L = 0,002 \cdot l \cdot \left(\ln \left[2 \cdot \frac{l}{b} \right] + 0,5 + 0,224 \cdot \frac{b}{l} \right). \quad (39)$$

Полоска длиной 1 мм и шириной 0,1 мм имеет индуктивность 0,7 нГн.

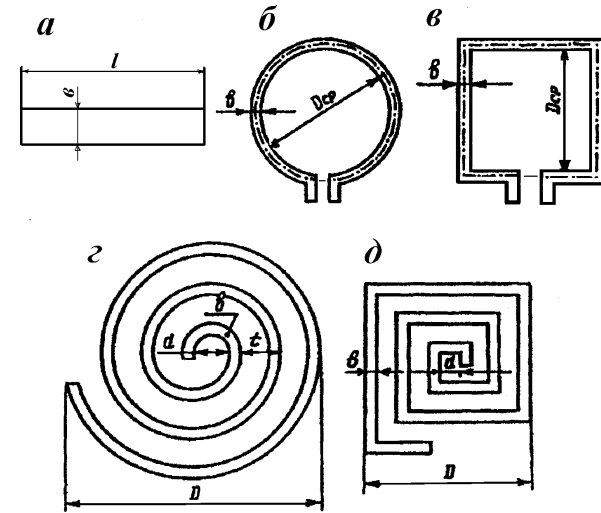


Рис. 8. Конструкции плёночных индуктивностей

Для *круглой одновитковой петли* (рис. 8, б) индуктивность может быть рассчитана по формуле

$$L = 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot D_{CP} \cdot \left[\ln \left(\frac{2\pi \cdot D_{CP}}{b+h} \right) - 2,45 \right], \quad (40)$$

где L – *индуктивность*, мкГн; D_{CP} – *диаметр петли* по средней линии, см; b – *ширина пленки*, см; h – *толщина пленки*, см.

Индуктивность квадратной петли (рис. 8, в)

$$L = 8 \cdot 10^{-3} \cdot D_{CP} \cdot \left[\ln \left(\frac{8 \cdot D_{CP}}{b+h} \right) - 2,85 \right]. \quad (41)$$

Плоская круговая многовитковая спираль (рис. 8, з) рассчитывается по формуле

$$L = 0,05 \cdot N^2 (D + d) \cdot \left[\frac{D + d}{D - d} \left(4 \cdot \frac{D + d}{D - d} + 11 \right)^{-1} \right]. \quad (42)$$

где N – число витков спирали ($N \geq 2$).

Индуктивность квадратной многовитковой спирали (рис. 8, д)

$$L = 0,064 \cdot (D + d) \cdot N^{\frac{5}{3}} \cdot \ln \left(8 \cdot \frac{D + d}{D - d} \right). \quad (43)$$

Шаг спирали t можно определить следующим образом

$$t = \frac{(D - d)}{2N}. \quad (44)$$

Ширина пленки b_0 , при которой можно обеспечить заданную добротность Q без учета скин-эффекта, определяется по формуле

$$b_0 = \frac{\rho \cdot t \cdot \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) \cdot 10^4 \cdot Q}{16 \cdot f_{\text{раб}} \cdot d \cdot h \cdot K^2}, \quad (45)$$

где b_0 – ширина пленки, мм; ρ – удельное сопротивление материала проводящей пленки, Ом · см; $f_{\text{раб}}$ – рабочая частота, МГц; K – коэффициент, зависящий от отношения $\frac{D}{d}$.

С учетом скин-эффекта ширина проводящей пленки уточняется по формуле

$$b = (1,5 \div 2) b_0, \text{ мм}. \quad (46)$$

Добротность пленочных индуктивностей определяется выражением

$$Q = \frac{4 \cdot f_{\text{раб}} \cdot L \cdot b \cdot h \cdot t}{\rho \cdot d^2 \cdot \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right)}, \quad (47)$$

где $f_{\text{раб}}$ – рабочая частота, Гц; L – индуктивность, Гн; ρ – удельное сопротивление, Ом·см ; все линейные размеры даны в сантиметрах.

Для повышения добротности катушки образующие проводники должны быть достаточно толстыми (30–100 мкм). С этой целью поводят электрохимическое осаждение меди или золота (в ответственных изделиях) на тонкий под-слой титана или ванадия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие резисторы применяются в ИМС?
2. Почему для всех номиналов тонкопленочных резисторов, располагаемых на одной подложке, рекомендуется применять пленки с одинаковым R_{\square} , а для толстопленочных – пасты с различным R_{\square} ?
3. Чем определяется сопротивление пленочного резистора?
4. Какие условия учитываются при выборе минимальной ширины пленочного резистора?
5. Почему при выборе формы сложных резисторов предпочтение отдают конструкции типа «меандр»?
6. Какие резистивные материалы чаще применяются при изготовлении пленочных резисторов? Почему?
7. Какие металлы получили наибольшее применение для получения контактных переходов к пленочным резисторам?
8. Какие факторы определяют удельное сопротивление пленочных резистивных материалов?
9. Какое влияние на величину и знак ТКС оказывает толщина резистивного материала?
10. Из чего складывается полная относительная погрешность пленочного резистора?
11. Каковы особенности расчета толстопленочных резисторов?
12. Почему при конструировании толстопленочных резисторов применяется, как правило, прямоугольная полосковая структура?
13. Какие требования предъявляются к материалам контактных площадок толстопленочных резисторов?
14. Какие типы конденсаторов применяются в ИМС?
15. Какие существуют конструкции тонкопленочных конденсаторов, и в каких случаях они применяются?

16. Какие требования предъявляются к материалам тонкопленочных конденсаторов?
17. Чем обусловлен пробой диэлектрика тонкопленочных конденсаторов?
18. Может ли диэлектрик тонкопленочного конденсатора обладать одновременно низким удельным сопротивлением и низким $\text{tg } \delta$?
19. Чем определяется добротность тонкопленочных конденсаторов?
20. Из чего складывается полная относительная погрешность емкости тонкопленочных конденсаторов?
21. От чего зависит площадь, занимаемая пленочным конденсатором?
22. Каковы особенности проектирования и расчета толстопленочных конденсаторов?
23. Как можно увеличить индуктивность пленочной спирали?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов И.Е. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника / И.Е. Ефимов, К.Н. Козырь, Ю.И. Горбунов. – М. : Высшая школа, 1987. – 416 с.
2. Матсон Э.А. Конструкции и технология микросхем. – Минск : Высшейшая школа, 1985. – 207 с.
3. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование. / под ред. Л.А. Коледова. – М.: Высшая школа, 1984. – 231 с.
4. Пономарев М.Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. – М.: Радио и связь, 1982. – 288 с.
5. Николаев И.М. Интегральные микросхемы и основы их проектирования / И.М. Николаев, Н.А. Филинук. – М. : Радио и связь, 1992. – 424 с.
6. Березин А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С. Березин, О.Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1983. – 232 с.
7. Матсон Э.А. Справочное пособие по конструированию микросхем / Э.А. Матсон, Д.В. Крыжановский. – Минск: Высшая школа, 1982. – 224 с.
8. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем и микросборок. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.
9. Романычева Э.Т. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов и др. – М. : Радио и связь, 1989. – 436 с.

Учебное пособие

РАСЧЕТ ПЛЕНОЧНЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Учебно-методическое пособие

Составители:

Дикарев Юрий Иванович
Рубинштейн Владимир Михайлович

Редактор И.Г. Валькинина

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Усл. печ. л. .
Тираж 50 экз. Заказ 1300.

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, пл. им. Ленина, 10. Тел. 208-298, 598-026 (факс)
<http://www.ppc.vsu.ru>; e-mail: ppc_center@ppc.vsu.ru

Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического центра
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3. Тел. 204-133.