

Н. О. Дёшина

Проектирование печатных плат в САПР OrCAD

Методические рекомендации для практических занятий

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

Н. О. Дёшина

Конструирование и расчёт плёночных пассивных элементов

Методические рекомендации для практических занятий

СПб ГУТ)))

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*).

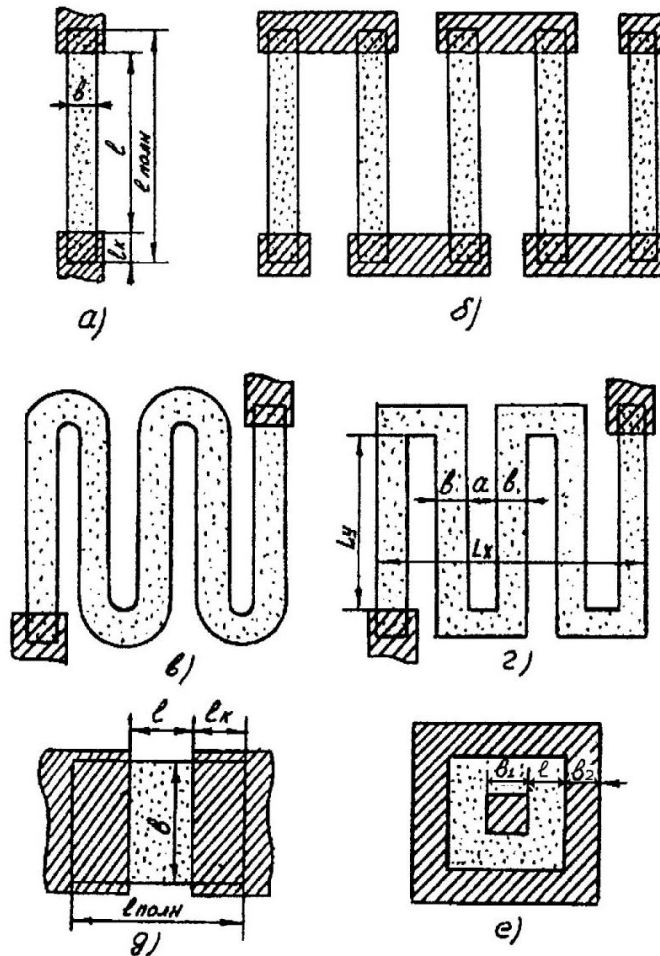


Рис. 1. Конструкции плёночных резисторов

1.2. Основные параметры пленочных резисторов

Основной характеристикой резистора является его номинальное сопротивление R_H

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

где ρ – удельное объемное сопротивление резистивного материала;

l, b, d – длина, ширина и толщина резистивной пленки ($S = d b$);

$R_{\square} = \rho / d$ – 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 пленочного 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 $2,55 R_{\square}$.

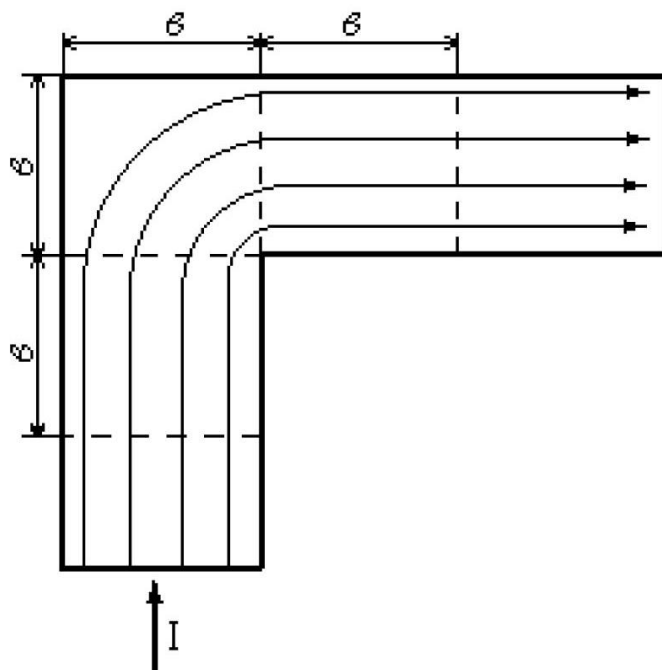


Рис. 2. Распределение плотности тока в резисторах типа «меандр»

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 пленочного 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 $K_\phi = 0,55$.

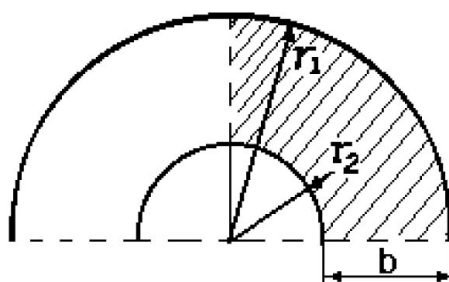


Рис. 3. Конструкция резистора типа «змейка»

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

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

где n_Σ – суммарное число квадратов прямолинейных участков;

m' – 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 $\mathfrak{N}_R = \Delta R/R$ определяется суммой всех погрешностей изготовления и погрешностей, возникающих при его эксплуатации

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

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

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

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

$$\mathfrak{N}_{R_K} – \text{погрешность переходных контактных сопротивлений,}$$

\aleph_{RT} – погрешность, связанная с температурной нестабильностью сопротивления,

$$\aleph_{RT} = \alpha_R \cdot \Delta T,$$

\aleph_{RCT} – 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

$$\aleph_{RT} = \alpha_R \cdot \Delta T = \alpha_R (T_{\text{макс}} - T_{\text{комн.}}) = \alpha_R (T_{\text{макс}} - 20 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Погрешность \aleph_{RCT} , 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

$$\aleph_{RCT} = (\Delta R / R)_{CT} = K_{CT} \cdot t,$$

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

Для ГИМС обычно \aleph_{RCT} не превышает 3 %.

Погрешность \aleph_{RK} 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 \aleph_{RK} 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/ \square	$\alpha_R \cdot 10^4$, град $^{-1}$	P_0 , Вт / см 2	$\delta^* R_{ст}$, %
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
МЛТ-3М	50–500	0,6	2	$\pm 0,5$
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/см 2 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 δ_R , %;

мощность рассеяния P_H , мВт;

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

относительные погрешности $\delta_{R_{\square}}$, $\delta_{K\Phi}$, δ_{R_K} , δ_{R_T} и $\delta_{R_{CT}}$;

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 , δ_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:

$$R_{\square\text{опт.}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n R_{Hi}}{\sum_1^n 1/R_{Hi}}}, \quad (7)$$

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 $\mathfrak{N}_{K\Phi\text{доп}}$.

$$\mathfrak{N}_{K\Phi\text{доп}} = \mathfrak{N}_R - \mathfrak{N}_{R_{\square}} - \mathfrak{N}_{RT} - \mathfrak{N}_{RCT} - \mathfrak{N}_{RK}.$$

Если значение $\mathfrak{N}_{K\Phi\text{доп}}$ получится отрицательным, то это означает, что изготовление резистора заданной точности из выбранного материала невозможно. В этом случае необходимо выбрать другой материал с другим $\mathfrak{N}_{R_{\square}}$, \mathfrak{N}_{RCT} и \mathfrak{N}_{RT} .

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, *a*); 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

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

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

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

б) ширина резистора, определяется точностными характеристиками

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

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

Если $\Delta b = \Delta l$, то

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

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 $b_{\text{расч}}$ выбирают наибольшее значение из полученных $b_{\text{техн}}, b_{\text{точн}}, b_p$. Затем находят топологическую ширину резистора $b_{\text{топ}}$ (ширину на чертеже топологии). За $b_{\text{топ}}$ принимают большее, чем $b_{\text{расч}}$ 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 $b_{\text{топ}}$ проводят до величины, кратной 50 мкм.

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

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

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

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

Полная длина резистора с учетом перекрытия контактных площадок

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

Площадь, занимаемая резистором на подложке,

$$S = l_{\text{полн}} \cdot b. \quad (13)$$

После расчета рисуют топологию резистора.

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

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

где

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

$$l_{\text{р}} = \sqrt{P_{\text{н}} \cdot K_{\phi} / P_0}. \quad (16)$$

и они имеют тот же смысл, что в (8).

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

Ширину $b_{\text{расч}}$ определяют из формулы для $R_{\text{н}}$

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

За $b_{\text{топ}}$ принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ 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 $a = b$,

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