

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ**

**САМАРА 2010**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ  
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2010

Составитель *А.И. Меркулов*

Рецензент В. А. М е д н и к о в

**Исследование влияния электрических, технологических и эксплуатационных характеристик на конструктивные параметры тонкопленочных резисторов:** метод. указания / сост. *А.И. Меркулов*. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 28 с.

В методических указаниях рассмотрена методика расчета конструктивных параметров тонкопленочных резисторов, приведена блок-схема программы их расчета на ПЭВМ, методика работы с программой. Студентам предлагается рассчитать и сконструировать шесть типов тонкопленочных резисторов, исследовать зависимость их размеров и конструктивных форм от электрических, технологических и эксплуатационных характеристик.

Рекомендуются для студентов специальности 210201 – Проектирование и технология радиоэлектронных средств. Подготовлены на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств.

Цель работы: изучение конструкций тонкопленочных резисторов (ТПР), методов их расчета, исследование связей между конструктивными, технологическими, электрическими и эксплуатационными характеристиками.

### **Конструктивно-технологические особенности ТПР**

Резистивные элементы гибридных интегральных микросхем получают напылением на диэлектрические основания (подложки) узких резистивных пленочных полосок 1 (рис. 1) различной конфигурации и контактных площадок 2, имеющих с ними некоторую зону перекрытия 3. Конструкции пленочных резисторов должны учитывать особенности топологической структуры пленочного функционального узла (размеры подложки, количество и расположение выводов и т.д.), величину номинала, характеристики используемых материалов, технологию производства, требуемую точность воспроизведения номинала, уровень технологии и условия эксплуатации микросхем.

Наиболее распространёнными конфигурациями пленочных резисторов являются прямоугольная (рис. 1, а) и типа "меандр" (рис. 1, б). Для увеличения механической прочности масок и плотного прилегания их к подложкам предпочтительными являются конструкции из нескольких последовательно соединенных резистивных полосок прямоугольной формы (рис. 1, в, г) [1].

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

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

Отношение длины  $l$  к ширине  $b$  тонкопленочного резистора называют *коэффициентом формы*:  $K_{\phi} = l/b$ . В результате формулу (1) можно представить в виде:  $R = R_{\square} K_{\phi}$ .

Если длина резистора  $l > 8$  мм, его рекомендуется выполнять изогнутым в виде «меандра» или «змейки». Нецелесообразно



ных площадок, а также в большой степени – от технологии изготовления и условий эксплуатации. 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.

### Расчёт плёночных резисторов прямоугольной формы

Плёночный резистор прямоугольной формы изображён на рис. 2.

Расчет ТПР начинают с выбора материалов резистивных плёнок и определения оптимального значения  $R_{\square}$  для группы ТПР.

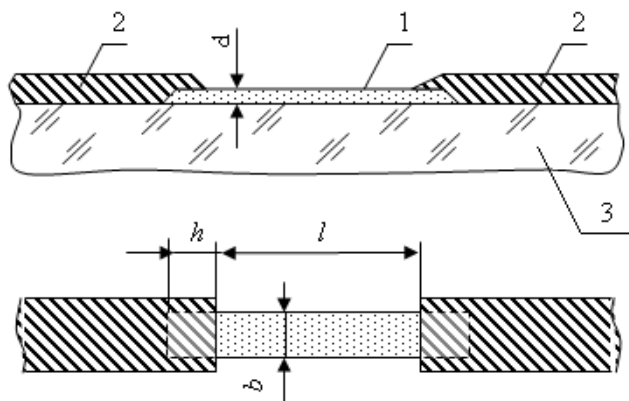


Рис. 2 Тонкопленочный резистор:

1 – резистивная пленка; 2 – проводящие пленки; 3 – подложка

С технологической точки зрения желательно, чтобы все ТПР были выполнены на основе одного резистивного слоя, т.е. из одного материала с одним значением  $R_{\square}$ . Однако если диапазон номиналов резисторов в схеме широк (отношение сопротивления наиболее высокоомного резистора к сопротивлению наиболее низкоомного превышает число 50), выполнять все резисторы с одним значением  $R_{\square}$  не рекомендуется: при малом значении  $R_{\square}$  высокоомные резисторы будут слишком длинными, при большом значении  $R_{\square}$  низкоомные резисторы будут слишком короткими,

погрешность при их изготовлении велика. В таких случаях целесообразно разделить резисторы на две группы: низкоомные и высокоомные и для каждой группы выбрать материал с соответствующим значением  $R_{\square}$ . Выбирать более двух значений  $R_{\square}$  не рекомендуется.

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

$$R_{\square \text{ опт}} = \frac{\sigma_b}{\sigma_l} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_b$  и  $\sigma_l$  - абсолютные среднеквадратические отклонения ширины и длины резисторов (см. табл. 2, с. 23).

Основные электрофизические характеристики наиболее распространенных резистивных материалов приведены в табл. 1.

При выборе толщины резистивной пленки (или значения  $R_{\square}$ ) следует помнить, что сопротивление и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) тонких (100...300 Å) пленок сильно зависят от толщины. Полученное из формулы (2) значение  $R_{\square \text{ опт}}$  является ориентировочным. Основным при выборе  $R_{\square}$  является условие:  $K_{\phi} \geq 0,5$ . Для группы резисторов это условие выполняется в том случае, если выбрать  $R_{\square} \leq 2R_{\text{мин}}$ . По этому значению выбирается материал резистивной плёнки и определяются его эксплуатационные характеристики:

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

$\alpha_R$  - температурный коэффициент сопротивления материала резистивной плёнки;

$\bar{\delta}_{R_{\text{ст}}}$  - относительное изменение сопротивления резистивной плёнки в результате старения, %.

Таблица 1

Электrofизические характеристики материалов для плёночных резисторов и проводников

Материал	$R_{\square}$ , Ом / □	$P_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\alpha_R \cdot 10^{-4}$ , 1/град		Интенсивность отказов $\gamma \cdot 10^{-6}$ , 1/ч	Старение $\overline{\delta R_{ст}}$ , % за 5000 ч в норм. усл.
			-60...+25° C	+25...+125° C		
Хром ХО, ГОСТ 5905-67	200...500	2,0	1,8	0,6	2,6...3,1	2,0
Нихром Х20Н80 ГОСТ12766-67	100...300	1,0	-0,4...+0,1	-0,9...+0,2	-	0,1...0,4
Сплав МЛТ-3М	300-500	2,0	±(1,2...1,8)	±(1,9...2,4)	1,8	±0,1
Кермет ЕТО.021.033. ТУ	(0,5...3)10 <sup>3</sup>	2,0	3...7	0,5...2,0	0,9	±0,3
Тантал, СУО.021.041 ТУ	300...500	2,0	-1,5	-2,6	-	2,6-3,2
Сплавы: РС-4800 РС-3710 РС-3001 РС-1004, ЕТО.021.048ТУ	(0,3...1)10 <sup>3</sup> (0,5...3)10 <sup>3</sup> (0,8...1,5)10 <sup>3</sup> (1...4)10 <sup>4</sup>	2,0	2,0 0,5...2 1,0 10,0	2,0	- - - -	2,0 2,0 1,0 2,0



## Определение технологического допуска

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

В результате получим значение технологического допуска (допуска на изготовление)  $\bar{\delta}_R$ :

$$\bar{\delta}_R = \bar{\delta}_{R_{\text{доп}}} - \bar{\delta}_{R_t} - \bar{\delta}_{R_{\text{ст}}} - \bar{\delta}_{R_K}, \quad (3)$$

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

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

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

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

## Определение геометрических размеров ТПР

Коэффициент формы ТПР определяется из соотношения

$$K_{\text{ф}} = R/R_{\square}. \quad (4)$$

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

Сначала определяется ширина резистора из соотношения

$$b = \max \{b', b'', b'''\}. \quad (5)$$

Здесь  $b'$  - минимальная допустимая ширина резистивной полосы (технологическое ограничение), выбирается из табл. 2;

$b''$  - минимальная допустимая ширина резистора, обеспечивающая его нормальную работу при заданной рассеиваемой мощности,

$$b'' > \sqrt{\frac{P}{P_0 K_\Phi}}. \quad (6)$$

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

$$b''' = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sigma_l}{K_\Phi}\right)^2 + \sigma_b^2}{\frac{-2}{\sigma_{R_{\text{доп}}}} - \frac{-2}{\sigma_{R_\square}}}}. \quad (7)$$

Здесь  $\bar{\sigma}_{R_\square}$  - относительное среднеквадратическое отклонение  $R_\square$ , определяемое технологическим процессом;  $\sigma_l$  - абсолютное среднеквадратическое отклонение длины ТПР;  $\sigma_b$  - абсолютное среднеквадратическое отклонение ширины ТПР (см. табл. 2).

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

$$\bar{\sigma}_{R_{\text{доп}}} = \frac{\bar{\delta}_R}{Z\sqrt{2}}, \quad (8)$$

где  $\bar{\delta}_R$  технологический (суженный) допуск на номинал резистора (3);  $Z$  - аргумент интеграла вероятностей  $\Phi_R$ .

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

Величина  $Z$  определяется по заданному значению  $\Phi_R$  из таблиц.

Подставив значение выражения (7) в выражение (5), определим ширину резистора  $b$ , а из выражения  $l = bK_\Phi$  - его длину.

В знаменателе выражения (7) может получиться «ноль» или отрицательное число. Это значит, что при выбранных технологических параметрах обеспечить требуемую точность резистора за счет увеличения его размеров невозможно, необходима подгонка.

### Учет сопротивления контактных переходов

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

Величина переходного сопротивления контакта определяется как

$$R_k = \frac{\sqrt{R_{\square} \cdot R^*}}{b}. \quad (9)$$

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

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

$$\bar{\delta}_{R_k} = \frac{2R_k}{R}. \quad (10)$$

Если величина  $\bar{\delta}_{R_k}$ , полученная из формулы (10), больше выбранной ориентировочно при определении технологического допуска по формуле (3), расчет ТПР необходимо повторить, подставив в формулу (3) значение из формулы (10).

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

$$h \geq 1,53 \sqrt{\frac{R^*}{R_{\square}}}. \quad (11)$$

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

Суммарная длина резистивной пленки с учетом длины контактных переходов определяется выражением  $l_{\Sigma} = l + 2h$ .

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

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

Основной слой контактной площадки напыляется из материала с высокой проводимостью (алюминий, медь, золото) на подслой и имеет толщину в несколько тысяч ангстрем. Для предотвращения окисления поверхности основного слоя на него наносят третий слой из материала, обладающего устойчивостью к окислению и хорошей паяемостью и свариваемостью. Часто в качестве верхнего слоя используют никель, реже – золото.

## Оценка частотных свойств плёночных резисторов

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

Реальные конструкции плёночных резисторов имеют паразитную индуктивность до десятков наногенри и паразитную ёмкость до нескольких пикофард. Следовательно, есть смысл индуктивную составляющую учитывать для резисторов малых номиналов, когда шунтирующим действием паразитной ёмкости можно пренебречь (рис. 3, в). Для высокоомных резисторов можно пренебречь индуктивной составляющей сопротивления, но учитывать шунтирующее действие паразитной ёмкости (рис. 3, г). Следует отметить, что для большинства резисторов (особенно типа «меандр») комплексное сопротивление носит емкостной характер.

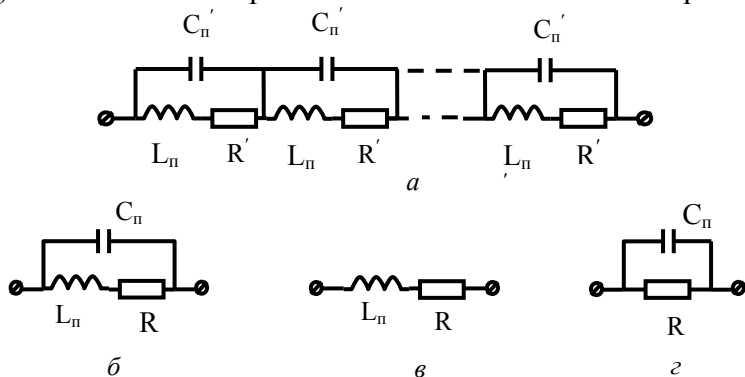


Рисунок 3 – Эквивалентная схема пленочного резистора: а – полная, б – упрощенная, в – для низкоомных резисторов, г – для высокоомных резисторов

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

$$f = \sqrt{\frac{\overline{\delta}_R}{2}} \frac{R}{\pi L_{\Pi}}. \quad (12)$$

Для высокоомных резисторов следует учитывать паразитную ёмкость, при этом верхняя граничная частота определяется как

$$f \leq \sqrt{\frac{\overline{\delta}_R}{2}} \frac{1}{\pi R C_{\Pi}}. \quad (13)$$

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

### Проектирование резисторов сложной формы

Установлено, что электрическое поле в резисторах сложной формы («меандр», «змейка» и т.д.) неравномерно. Наибольшего значения градиент плотности тока достигает в местах излома или изгиба резистивной пленки. Неравномерность электрического поля приводит к изменению сопротивления плёночного резистора.

В связи с этим расчет сопротивления резисторов сложной формы по длине геометрической средней линии является неточным.

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

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

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



Конструкция изогнутого пленочного резистора с прямоугольными (см. рис. 1, б) и криволинейными (см. рис. 1, д) перегибами имеет конструктивно-технологические ограничения на размеры  $a$  и  $B$  (рис. 5, а). Например, при нанесении резистивного слоя через биметаллическую маску (трафарет) размер  $a$  определяется как минимально возможное расстояние между двумя щелями в маске, равное примерно  $2h_m$ , где  $h_m$  - толщина маски. Размер  $B$  ограничен необходимой жесткостью маски. Обычно придерживаются соотношения  $B/a = 10$ . Большое соотношение  $B/a$  не допускается также потому, что при нагревании маски в процессе напыления наблюдаются изгибы «язычков» и соответственно изменяются геометрические размеры резистивной плёнки за счет подпыления наносимого материала под маску.

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

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

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

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

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{K_{\phi}}{2}}.$$

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

Длина прямоугольных участков определяется по формуле

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

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

$$L = n_{\text{опт}}a + (n_{\text{опт}} + 1)b; \quad B = l_{\text{пр}} + 4b.$$



## Конструирование и расчёт подгоняемых плёночных резисторов

При изготовлении плёночных резисторов возникают погрешности как в воспроизведении формы, так и поверхностного удельного сопротивления  $R_{\square}$ . Если необходимо изготовить резисторы, допуск на номинал которых составляет единицы или доли процента, обеспечить точность за счет увеличения их размеров не всегда удаётся. При вычислении  $b'''$  в знаменателе формулы (7) появляется "ноль" или отрицательное число. В таких случаях применяют резисторы, номинал которых можно изменять после изготовления (рис. 6). Подгонять резистор можно в сторону увеличения номинала изменением коэффициента формы (разрывом замыкающих перемычек или удалением части резистивной плёнки). Следовательно, расчетная величина сопротивления подгоняемого пленочного резистора должна быть меньше номинального значения. При нормальном законе распределения погрешностей подавляющее число резисторов имеет поле рассеяния номинала в пределах  $\pm 3\bar{\sigma}_R$ , следовательно, расчетное значение сопротивления нерегулируемой части резистора можно определить по формуле

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

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

Ширина резистора  $b$  при подгонке выбирается из соотношения

$$b = \max \{b', b''\}; \quad (20)$$

длина определяется как

$$l = bK_{\phi}, \quad \text{где } K_{\phi} = R/R_{\square}.$$

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

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

$$R = (R_{н.р} + R^*) (1 - 3\bar{\sigma}_R). \quad (21)$$

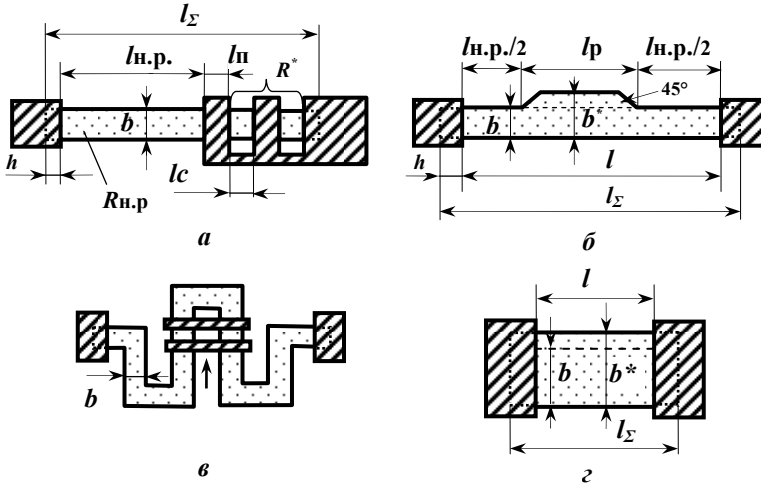


Рисунок 6 – Конструкции подгоняемых тонкопленочных резисторов

Используя выражения (19) и (21), получаем

$$R^* = R \frac{6\bar{\sigma}_R}{1 - 9\bar{\sigma}_R^2}. \quad (22)$$

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

$$n = \frac{R^* (1 + 3\bar{\sigma}_R)}{\delta_R} = \frac{6\bar{\sigma}_R}{\bar{\delta}_R (1 - 3\bar{\sigma}_R)}, \quad (23)$$

где  $\delta_R$  - абсолютная допустимая погрешность сопротивления резистора, Ом;  $\delta_R = \bar{\delta}_R R$ ,  $\bar{\delta}_R$  - технологический допуск. Значения  $l_{н.р}$  и  $l_c$  определяются по формулам:

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

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

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

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

*Плавная подгонка.* Плавная подгонка применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить узкий допуск на сопротивление резистора. Точность плавной подгонки составляет доли процента. Наиболее приемлемая конструкция резистора с плавной подгонкой изображена на рис. 6,б.

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

Исходными данными для расчета точных подгоняемых резисторов являются:

- номинальное значение сопротивления  $R$ , Ом и допуск  $\bar{\delta}_R$  %;
- сопротивление квадрата плёнки  $R_{\square}$ , Ом;

- среднеквадратическое отклонение сопротивления квадрата плёнки  $\bar{\sigma}_R$  ;

- ширина резистора  $b$ , мм, определяемая из соотношения (20);

- среднеквадратическое отклонение ширины  $\sigma_b$ , мм.

Длина резистора определяется по формуле  $l = l_{\min} + 3\sigma_b$ , где

$$l_{\min} = \frac{R(1 - \bar{\delta}_R)(b + 3\sigma_b)}{R_{\square}(1 - 3\bar{\sigma}_{R_{\square}})}. \quad (24)$$

Расчет ширины регулируемой секции производится по специальным графикам.

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

Если  $K_{\phi} < 10$ , использование графиков затруднительно. В таких случаях целесообразно применить конструкцию резистора с плавной подгонкой, изображенную на рис. 6, г. Ширина  $b$  и длина  $l$  находятся из соотношений (20) и (24) соответственно, а величина  $b^*$  определяется по формуле

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

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

### Краткое описание программы расчета ТПР

Блок-схема программы расчета ТПР приведена на рис.7.

В зависимости от номинала резистора, допуска на сопротивление, размеров ТПР ЭВМ рассчитывает и представляет на экране один из шести возможных типов ТПР (рис. 8).



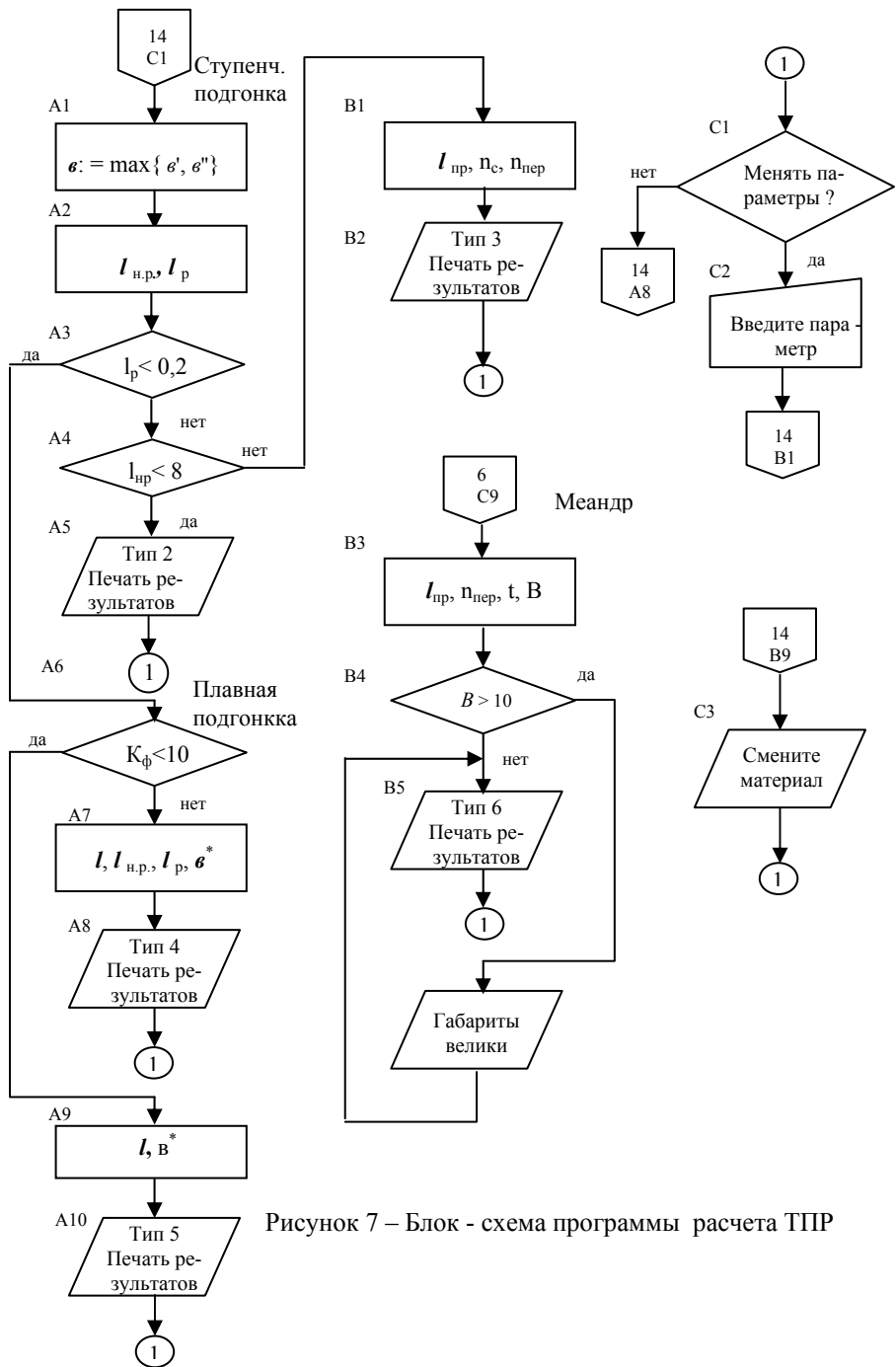
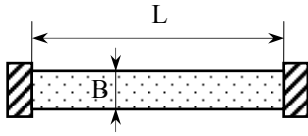
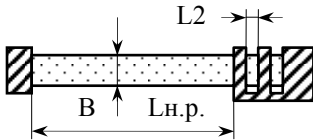


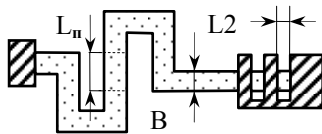
Рисунок 7 – Блок - схема программы расчета ТТР



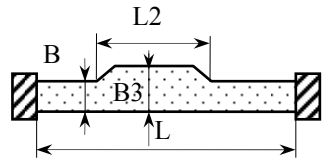
**ТИП – 1** В – ширина ТПР,  
L – длина ТПР.



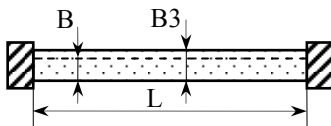
**ТИП – 2** В – ширина ТПР,  
L2 – длина рег. секции,  
N – число рег. секций.



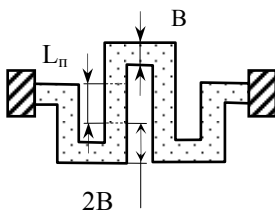
**ТИП – 3** В – ширина ТПР,  
L – длина прямолинейного участка,  
L2 – длина рег. секции,  
N – число рег. секций,  
N5 – число П – образных Перегибов.



**ТИП – 4** В – ширина ТПР,  
L – длина ТПР,  
B3 – ширина рег. участка,  
L2 – длина рег. участка.



**ТИП – 5** В – ширина ТПР без рег. участка,  
L – длина ТПР,  
B3 – общая ширина ТПР.



**ТИП – 6** В – ширина ТПР,  
L – длина прямолинейного участка,  
N – число П-образных перегибов.

Рисунок 8 - Конструкции рассчитываемых резисторов

В программе проектирования ТПР реализованы следующие условия:

1. Минимальная допустимая ширина ТПР  $b'$  из технологических соображений принята равной 0,1 мм для метода фотолитографии и 0,2 мм – для метода свободной маски.

2. Если длина ТПР  $l > 8$  мм, резистор выполняется изогнутым в виде «меандра».

3. Если при определении суженного (технологического) допуска по формуле (3) получится число меньше нуля или нуль, на экран ПЭВМ поступит сообщение «смените материал».

4. Если при определении ширины ТПР из условия обеспечения заданной точности по формуле (7) в знаменателе подкоренного выражения получится «нуль» или отрицательное число, программа переходит к расчету ТПР со ступенчатой подгонкой, при этом ширина ТПР определяется из соотношения  $b = \max \{b', b''\}$ .

5. Если при проектировании ТПР со ступенчатой подгонкой расчетная длина регулируемой секции  $l_p < 0,2$  мм, программа переходит к проектированию ТПР с плавной подгонкой (тип 4).

6. Если при проектировании ТПР с плавной подгонкой получится соотношение  $K_\Phi < 10$ , программа переходит к проектированию ТПР с подгонкой типа 5.

7. Кроме рассчитанных конструктивных параметров резисторов студент имеет возможность посмотреть результаты промежуточных вычислений.

Таблица 2

**Погрешности воспроизведения технологических параметров плёночных резисторов**

Виды технологии изготовления	$\sigma_l, \text{мм}$	$\sigma_b, \text{мм}$	$\overline{\sigma_{R_\square}}$	$b'$
Метод свободной маски	0,01...0,03	0,007...0,01	0,02...0,05	0,2
Фотолитография	0,003...0,007	0,002...0,005	0,02...0,05	0,1
Танталовая технология	0,003...0,007	0,002...0,005	0,02...0,05	0,1



Исходными данными, вводимыми студентами для расчета ТПР, являются:

а) *электрические*:

$R$  – сопротивление ТПР;

$P$  – мощность, рассеиваемая ТПР;

$\bar{\delta}_{R_{\text{доп}}}$  – допуск на сопротивление ТПР;

б) *технологические*:

$\Phi_R(z)$  – вероятность изготовления годного ТПР;

$\sigma_b$  – среднеквадратическое отклонение ширины ТПР;

$\sigma_l$  – среднеквадратическое отклонение длины ТПР;

$R_{\square}$  – удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

$\bar{\sigma}_{R_{\square}}$  – относительное среднеквадратическое отклонение величины  $R_{\square}$  в процессе изготовления;

$\bar{\delta}_{Rk}$  – относительная погрешность сопротивления ТПР, обусловленная образованием переходных сопротивлений контактов;

в) *эксплуатационные*:

$t_{\text{max}}$  – температура окружающей ТПР среды;

$T$  – время эксплуатации ТПР;

г) *характеристики используемых материалов*:

$P_0$  – допустимая удельная мощность рассеяния резистивной плёнки;

$\alpha_{Rt}$  – температурный коэффициент сопротивления ТПР;

$\bar{\delta}_{R_{\text{ст}}}$  – относительное изменение сопротивления ТПР в процессе старения.

Среднеквадратические значения отклонений технологических параметров пленочных резисторов для различных видов технологии приведены в табл. 2.

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

## Порядок выполнения работы

1. Изучить правила техники безопасности в лаборатории и при работе с ЭВМ.
2. Изучить методику расчета ТПР вероятностным методом [1, 2] (домашняя подготовка).
3. Изучить блок-схему расчета ТПР (рис. 7).
4. Изучить методику работы с программой расчета ТПР.
5. Целенаправленно изменяя исходные данные, получить все конструкции ТПР, приведенные на рис. 8.
6. Исследовать зависимость конструктивных форм и размеров ТПР от технологических параметров процесса их изготовления, электрических и эксплуатационных характеристик, а также характеристик используемых материалов. Рассчитать конструктивные параметры ТПР для различных значений  $\Phi_R(z)$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_l$ ,  $\bar{\sigma}_{R_{\square}}$ ,  $R_{\square}$  и др. ( по заданию преподавателя).
7. Поработать с программой в режиме изменения данных. Построить зависимости конструктивных параметров ТПР от величин  $\sigma_b$ ,  $\sigma_l$ ,  $\bar{\sigma}_{R_{\square}}$ ,  $R_{\square}$ ,  $\Phi_R(z)$ .
9. Вычертить эскизы всех ТПР, определить их габаритные размеры, суммарную площадь.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткая характеристика типов рассчитываемых ТПР.
3. Блок-схема программы расчета ТПР.
4. Расчетные данные (таблицы и графики).
5. Эскизы спроектированных ТПР.
6. Анализ полученных данных.
7. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить назначение различных видов ТПР.
2. Объяснить методику расчета различных типов ТПР.
3. Назвать преимущества и недостатки различных типов ТПР.
4. Объяснить работу программы расчета ТПР по блок-схеме.
5. Перечислить и объяснить условия и ограничения, реализованные в программе расчета ТПР.
6. Рассказать правила работы с ЭВМ по программе ТПР.
7. Объяснить, как влияют на конструктивные параметры ТПР величины  $\sigma_b$ ,  $\sigma_l$ ,  $\bar{\sigma}_{R_{\square}}$ ,  $R_{\square}$ ,  $R$ ,  $P$  и другие.
8. Назвать основные правила техники безопасности при работе на ЭВМ.

## Библиографический список

1. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники [Текст]: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб и доп. / И. П. Степаненко. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003.
2. Расчет и проектирование элементов гибридных интегральных микросхем / сост. А.И. Меркулов, В.Д. Дмитриев; СГАУ, 2002.
3. Ермолаев, Ю.П. Конструкции и технология микросхем (ГИС и БГИС) : учебник для вузов / Ю.П. Ермолаев, М.Ф. Пономарев, Ю.Г. Крюков; под ред. Ю.П. Ермолаева: – М.: Сов. радио, 1980.
4. Коледов, В.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учебник для вузов / В.А. Коледов. – М.: Радио и связь, 1989.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ,  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК НА КОНСТРУКТИВНЫЕ  
ПАРАМЕТРЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ**

Составитель *Меркулов Анатолий Игнатьевич*

Редактор Н. С. Купринова  
Компьютерная верстка Т. Е. Половнева

Подписано в печать 20.06.2010 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,75.

Тираж 100 экз. Заказ Арт.С-29/2010

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

---

Издательство Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443001 Самара, Московское шоссе, 34