

## 1.6. ПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГИС

### 1.6.1. ПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Пленочные резисторы представляют собой один из элементов ГИС и совмещенных схем. Тонкопленочные резисторы изготавливаются напылением резистивной пленки, толстопленочные – вжиганием резистивной пасты. В качестве функциональных частиц используются силициды хрома, никеля, железа. Содержание кремния от 15 до 95 % обеспечивает широкий диапазон удельных сопротивлений. Кроме того, могут использоваться двойные или тройные системы на их основе.

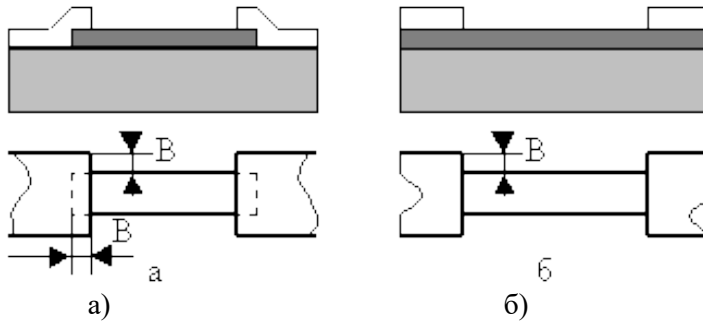
Характеристиками резистивных материалов являются:

- удельное поверхностное сопротивление  $R_{сл}$ , Ом;
- допустимая удельная мощность рассеивания  $P_0$ , Вт/см<sup>2</sup>;
- температурный коэффициент сопротивления (ТКС), 1/К;
- коэффициент старения (необратимые изменения за 1000 часов при 85 °С при нагрузке 1 Вт/см<sup>2</sup>)  $\gamma_{ст}$ .

Существует 3 варианта формирования пленочных резисторов:

- фотолитографический: напыление сплошной резистивной плёнки, напыление сплошной проводящей пленки, фотолитография по проводящей плёнке, фотолитография по резистивной плёнке;
- трафаретный: напыление резистивных элементов через трафарет, напыление проводящих элементов через трафарет;
- комбинированный: напыление сплошной резистивной плёнки, напыление проводящих элементов через трафарет, фотолитография по резистивной плёнке.

Структура и топология пленочных резисторов для разных данных вариантов приведена на рис. 1.6.1, а основные характеристики – в табл. 1.6.1. Трафаретный вариант является более производительным и дешёвым, фотолитографический заметно превосходит трафаретный по разрешающей способности ( $a_{min}$ ) и точности ( $\Delta_{п}$ ).



**Рис. 1.6.1.** Структура и топология пленочных резисторов:  
а – трафаретный вариант; б – фотолитографический и трафаретный варианты

Таблица 1.6.1.

Основные характеристики вариантов

Параметр	Фотолитографический вариант	Трафаретный вариант
$a_{\min}$ , мм	0,1	0,3
$\pm\Delta_{II}$ , мм	$\pm 0,005$	$\pm 0,02$
$B$ , мм	0,1	0,2
$(l/a)_{\max}$	Не ограничено	10

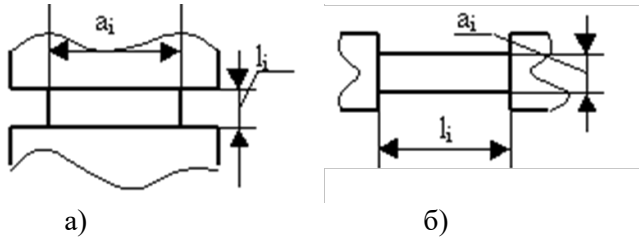
При проектировании группы интегральных резисторов возникает задача определения рабочих размеров  $l$  и  $a$  для каждого резистора с таким расчётом, чтобы суммарная площадь, занимаемая резисторами, была минимальна. Исходными данными при этом являются:

- номинальные значения сопротивлений резисторов  $R_i$ ;
- мощность рассеивания  $P_i$ ;
- предельные допустимые отклонения сопротивления  $\pm\gamma_{R_i}$ ;
- температурный диапазон эксплуатации  $t_{\min} \dots t_{\max}$ .

Для начала необходимо определить оптимальное значение удельного поверхностного сопротивления  $R_{\text{сл}} = R_0$ . Искомое значение лежит внутри ряда сопротивлений, выстроенного по возрастающей:  $R_1, R_2, R_m, (R_0), R_{m+1}, R_n$ . Расчет проводится по формуле:

$$R_0 \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}}$$

В результате все резисторы делятся на 2 группы (рис. 1.6.2), расчет которых будет отличаться.



**Рис. 1.6.2.** Формы резисторов в зависимости от соотношения:  
 а – первая группа:  $R_i < R_0$ ; б – вторая группа:  $R_i > R_0$

По найденному значению  $R_0$  выбирают марку резистивного сплава так, чтобы  $R_0$  удовлетворяло рекомендованному диапазону значений  $R_{сл}$ . При наличии двух и более вариантов марок сплавов следует ориентироваться на большее значение  $P_0$ , меньшие значения  $a$  и  $\gamma_{ст}$ . При окончательном выборе марки сплава становятся известными конкретные значения  $P_0$ ,  $a$  и  $\gamma_{ст}$ .

Дальше проводится определение критических размеров резисторов с учетом мощности рассеивания. Для резисторов первой группы:

$$l_i = \sqrt{\frac{P_i R_i}{P_0 R_0}},$$

для резисторов второй группы:

$$a_i = \sqrt{\frac{P_i R_0}{P_0 R_i}}.$$

Кроме того, проводится корректировка размеров с учетом заданной точности. Для первой группы:

$$l_i = \frac{\Delta_a \frac{R_i}{R_0} + \Delta_l}{\gamma_{техн} - \gamma_{R0}},$$

для второй группы:

$$a_i = \frac{\Delta_l \frac{R_0}{R_i} + \Delta_a}{\gamma_{\text{техн}} - \gamma_{R0}},$$

где  $\Delta_l$  и  $\Delta_a$  — абсолютные предельные погрешности длины и ширины (берутся из сравнительной таблицы вариантов технологии);  $\gamma_{R0}$  составляет 2% для трафаретного варианта и 1% для фотолитографического.

Для приближения выводов высокоомного резистора друг к другу и сокращения длины связей в микросхеме конструктор может отступить от прямолинейной конфигурации резистора и спроектировать элемент в форме меандра, введя в него два или более изгибов под прямым углом (рис. 1.6.3). При любой конфигурации резистора входной и выходной токи должны быть ориентированы в одну сторону. В противном случае предусмотренные уширения выводов не будут выполнять своих функций и погрешность совмещения проводящего и резистивного слоёв вызовут дополнительную погрешность сопротивления.

Участок изгиба имеет пониженное сопротивление в сравнении с линейным участком той же длины (по средней линии), что требует корректировки длины резистора в сторону её увеличения. Так Г-образный участок, включающий три квадрата вместо  $3R_{\text{сд}}$  имеет сопротивление  $2,55R_{\text{сд}}$ , а П-образный, включающий пять квадратов, вместо  $5R_{\text{сд}}$  имеет сопротивление  $4R_{\text{сд}}$ . Это явление объясняется тем, что плотность тока на изгибах оказывается более высокой у внутреннего контура резистора, в результате чего электрическая длина резистора (по средней плотности тока) уменьшается.

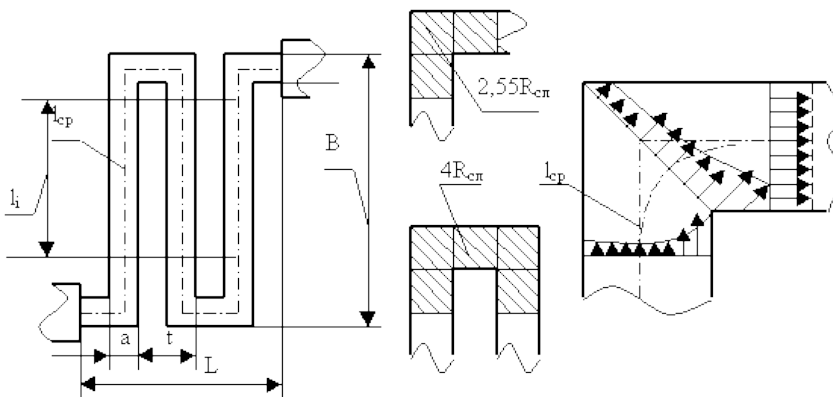
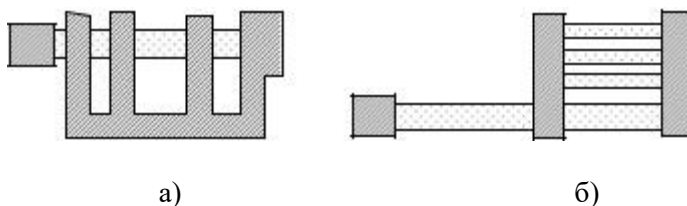


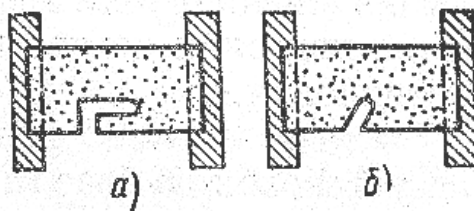
Рис. 1.6.3. Проектирование резистора в форме меандра

После получения резистора может оказаться, что его сопротивление отличается от заданного. Чтобы иметь возможность скорректировать

сопротивление, существует специальная конструкция резисторов – подгоняемые резисторы (рис. 1.6.4).



**Рис. 1.6.4.** Подгоняемые резисторы: а – путем добавления секций перерезанием перемычек; б – уменьшением числа параллельно подключенных резистивных дорожек



**Рис. 1.6.5.** Лазерная подгонка сопротивления резисторов: а – с участками грубой и точной подгонки; б – с подгонкой под углом

Перерезание перемычек приводит или к увеличению сопротивления (рис. 1.6.4 а), или к уменьшению сопротивления (рис. 1.6.4 б). Кроме того, возможна лазерная подгонка параметров резисторов (рис. 1.6.5).

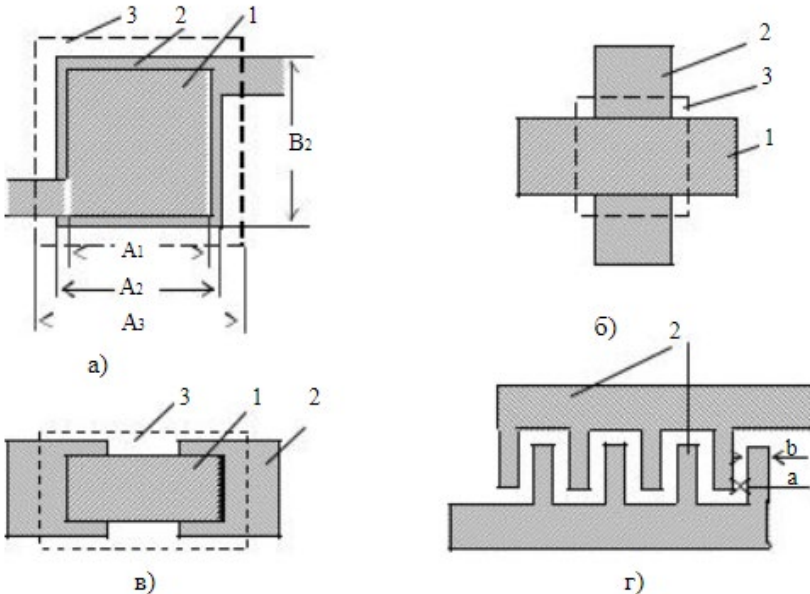
## 1.6.2. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Наиболее часто используемые конструкции пленочных конденсаторов приведены на рис. 1.6.6. В качестве обкладок используются металлические проводники. Чаще всего используются плоские конденсаторы, в которых диэлектрик помещается между верхней и нижней обкладкой, причем верхняя обкладка полностью вписывается в нижнюю (рис. 1.6.6 а). Такая конструкция позволяет создавать конденсаторы повышенной емкости (от сотни до нескольких тысяч пФ); кроме того, точность совмещения в ней никак не сказывается на емкости. Если же не нужна большая емкость, можно использовать конструкцию, изображенную на рис. 1.6.6 б.

При активной площади менее  $5 \text{ мм}^2$  начинает сказываться краевой эффект, который тем сильнее влияет на емкость конденсатора, чем меньше площадь. Если расчетная площадь менее  $1 \text{ мм}^2$ , конденсатор лучше выполнять в виде двух последовательно включенных конденсаторов (рис. 1.6.6 в).

В высокочастотных микросхемах используют гребенчатые конденсаторы (рис. 1.6.6 г), в которых роль обкладок выполняют 2 проводника, выполненных в виде гребенки. В ней используется составной диэлектрик: подложка-воздух или подложка-диэлектрическое покрытие.

В качестве материала диэлектрика может использоваться монооксид или двуоксид кремния, монооксид германия, оксид алюминия, оксид тантала, а также алюмосиликатное, боросиликатное или иттрий-борийное стекла.



**Рис. 1.6.6.** Конструкции пленочных конденсаторов:

а, б, в – плоский с тонкопленочным диэлектриком; г – гребенчатый конденсатор  
1 - верхняя обкладка; 2 – нижняя обкладка; 3 – диэлектрик

Емкость пленочного конденсатора определяется по формуле:

$$c = \frac{0,885 \varepsilon_r S}{d} = c_0 S,$$

где  $S$  – площадь взаимного перекрытия обкладок,  $\text{см}^2$ ;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;  $d$  – толщина диэлектрика,  $\text{см}$ ;  $c_0$  – удельная емкость,  $\text{пФ}/\text{см}^2$ .

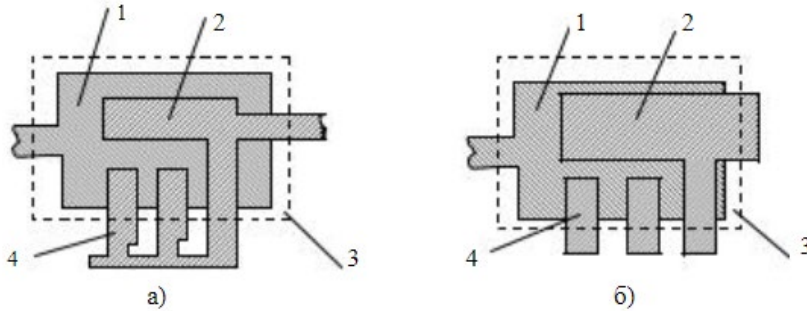
Толщина диэлектрика выбирается исходя из условия обеспечения заданного рабочего напряжения  $U_p$ :

$$d = \frac{k_3 U_p}{E_{\text{пр}}},$$

где  $k_3 = 3 \dots 10$  – коэффициент запаса,  $E_{\text{пр}}$  – напряжение пробоя. Для

большинства диэлектрических материалов  $E_{пр} = (1 \dots 9)10^6$  В/см.

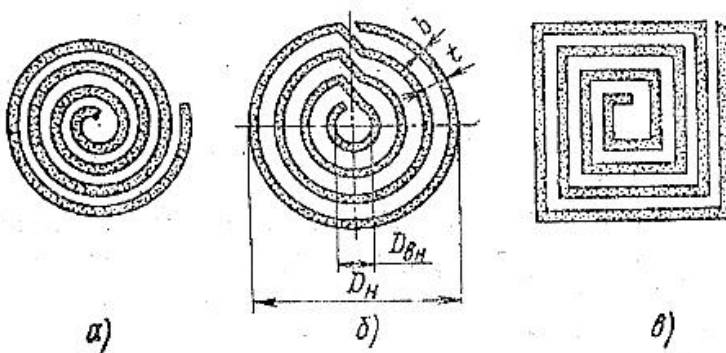
При необходимости можно использовать в микросхемах подгоняемые конденсаторы (рис. 1.6.7).



**Рис. 1.6.7.** Конструкции подгоняемых пленочных конденсаторов: 1 – нижняя обкладка; 2 – верхняя обкладка; 3 – диэлектрик; 4 – подгоняющие секции

### 1.6.3. ПЛЕНОЧНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Пленочные индуктивности выполняют в виде круглых или прямоугольных одновитковых петель или многовитковых спиралей (рис. 1.6.8). Индуктивность подобных пленочных спиралей на низких частотах ограничена значением примерно  $2 \dots 3$  мкГн. При одинаковых габаритных размерах и числе витков индуктивность квадратной спирали в 1,27 раза больше индуктивности круглой спирали.



**Рис. 1.6.8.** Конструкции пленочных индуктивностей:  
а, б – круглая форма спирали; в – квадратная форма спирали

Индуктивность круглой спирали определяется по формуле:

$$L = \frac{25D_{\text{cp}}n^2}{1 + \frac{3h}{D_{\text{cp}}}},$$

где  $D_{\text{cp}} = 0,5 (D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})$  – средний диаметр витка, см<sup>2</sup>,  $h = nt + b$  – ширина спирали, см;  $t$  – шаг спирали, см;  $b$  – ширина проводника, см;  $n$  – число витков спирали. Значение  $L$  получается в нГн.

В ГИС площадь, занимаемая одной спиралью, обычно не превышает 1 см<sup>2</sup>. Максимальное число витков, которые можно разместить на этой площади, определяется разрешающей способностью технологического процесса создания спирали, в частности значением  $b_{\text{min}}$ . При  $b_{\text{min}} \approx 50$  мкм индуктивность пленочных спиралей составляет примерно 10 мкГн, а добротность при оптимальном соотношении внутреннего и наружного диаметров спирали  $D_{\text{ен}}/D_{\text{н}} \approx 0,4$  равна 80—120.

Для изготовления пленочных спиралей применяют материалы с высокой электропроводностью. Толщина спирали зависит от рабочей частоты и зависит от глубины проникновения электромагнитной волны в материал проводника (скин-эффект).

### ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 6

Вопрос 1	Какой из вариантов изготовления пленочных элементов точнее?
Ответы:	
1	Фотолитографический
2	Графаретный
3	У них одинаковая точность
Вопрос 2	
Ответы:	Какой из вариантов изготовления пленочных элементов дешевле?
1	Графаретный
2	Фотолитографический
3	У них одинаковая стоимость