

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана

О. Д. Парфенов

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗИСТОРОВ



Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
1994

ББК 32.85

П18

Рецензент *С.Р.Иванов*

П18 Парфенов О.Д. Расчет и конструирование интегральных резисторов: Методические указания по курсовому проектированию по курсу «Микроминиатюризация электронно-вычислительных средств». М.: Изд-во МГТУ, 1994. 28 с., ил.

Изложены методики конструкторского проектирования интегральных резисторов, входящих в состав полупроводниковых и гибридных пленочных интегральных микросхем и резистивных сборок. Методики проектирования охватывают полупроводниковые (диффузионные и имплантированные) и тонкопленочные резисторы. В приложениях даны примеры расчета резисторов по формулам, приведенным в данных методических указаниях.

Для выполнения домашних заданий и курсовых работ студентами 4-го курса специальности «Конструирование и технология электронно-вычислительных средств».

Табл. 4. Ил. 12. Библиогр. 4 назв.

ББК 32.85

Редакция заказной литературы

Олег Дмитриевич Парфенов

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Заведующая редакцией *Н.Г.Ковалевская*

Редактор *Е.Н.Ставицкая*

Корректор *О.В.Калашикова*

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994.

Подписано в печать 31.08.94. Формат 60×84/16. Бумага тип.

№ 2. Печ. л. 1,75. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,44.

Тираж 500 экз. Изд. № 20. Заказ № 487 С 488

Издательство МГТУ, типография МГТУ.

107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Введение

Понятие «интегральные резисторы» подразумевает группу резисторов с различными номинальными сопротивлениями, изготовленных на общем основании (пассивной подложке, полупроводниковом кристалле) одновременно, в общем технологическом процессе. Последнее становится возможным благодаря общему для всех резисторов резистивному слою, который может быть создан избирательно с помощью масок и трафаретов или нанесен в виде сплошной пленки с последующим избирательным травлением (фотолитографией).

Так, диффузионные полупроводниковые резисторы формируются в результате диффузии примеси через предварительно вытравленные в оксиде кремния окна (оксидная маска), расположенные на поверхности кремниевой групповой пластины. Требования интегральной технологии, в частности минимизация числа операций, предусматривают формирование резисторов одновременно с одной из областей транзисторов (обычно базовой). Этот слой и является общим резистивным слоем для всех резисторов. Удельное поверхностное сопротивление диффузионных резисторов, таким образом, жестко предопределено параметрами слоя транзистора, что не позволяет минимизировать площадь, занимаемую резисторами.

Более широкие возможности получает конструктор при проектировании имплантированных резисторов. Для формирования эмиттерных и базовых областей глубиной 1...3 мкм и более прибегают к ступенчатому изменению энергии ионов. Результирующее распределение примеси в области является, следовательно, суперпозицией профилей отдельных ступеней обработки. Для формирования резисторов одновременно с транзисторами могут быть использованы одна или несколько последовательных ступеней. Соответственно могут быть получены слои с различным поверхностным сопротивлением, а конструктор имеет возможность проектировать отдельные группы низкоомных и высокоомных резисторов, выигрывая при этом в площади.

Наибольшую свободу в выборе поверхностного сопротивления и возможность минимизации площади конструктор имеет в случае использования пленочных резисторов (тонкопленочных и толстопленочных), так как выбор резистивного материала и его толщины не связан с физической структурой транзисторов. Такое положение имеет место

в гибридных интегральных микросхемах (ИМС) и микросборках. В первом случае компонентами являются кристаллы транзисторов, диодов и диодных матриц. Резисторы, а при необходимости и конденсаторы выполняют на изолирующей подложке, несущей также и коммутационные проводники. Во втором случае в качестве компонентов выступают кристаллы ИМС различной степени интеграции. Согласующие резисторы, а при необходимости и развязывающие конденсаторы располагают на отдельных подложках (субплатах), которые затем монтируют как компоненты на общей коммутационной плате микросборки. При создании таких резистивных матриц предпочтение отдается тонкопленочной технологии, которая полнее удовлетворяет требованиям точности и миниатюризации, чем толстопленочная.

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Благодаря умеренному значению концентрации акцепторной примеси (на поверхности $10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и невысокой подвижности дырок ($100 \dots 200 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$) базовые области транзисторов имеют удельное поверхностное сопротивление $R_{\text{сл}}$ порядка сотен ом. В связи с этим на основе базовой области целесообразно формировать резисторы с сопротивлением от нескольких сотен ом и выше.

Начальный этап проектирования резисторов сводится к определению $R_{\text{сл}}$ базовой области.

Прежде всего определяют условную дозу легирования $Q_{\text{п}}$, т.е. количество примеси, приходящееся на 1 см^2 в пределах от 0 до $x_{\text{Б}}$, где $x_{\text{Б}}$ — толщина базовой области (рис. 1). На рисунке индексы Э, Б и К относятся соответственно к эмиттерной, базовой и коллекторной областям. Формула для вычисления $Q_{\text{п}}$ имеет вид

$$Q_{\text{п}} = \int_0^{x_{\text{Б}}} N(x) dx = \int_0^{x_{\text{Б}}} \frac{Q}{\sqrt{\pi D_p t_p}} e^{-x^2/(4 D_p t_p)} dx. \quad (1)$$

Здесь $N(x)$ — функция распределения примеси по глубине; Q — полная доза легирования; D_p и t_p — соответственно коэффициент диффузии и время в процессе разгонки примеси. После замены переменных $x/(2\sqrt{D_p t_p}) = v$ и $dx/(2\sqrt{D_p t_p}) = dv$ приходим к выражению

$$Q_{\text{п}} = Q \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v e^{-v^2} dv = Q \operatorname{erf} v = Q \operatorname{erf} \left[\frac{x_{\text{Б}}}{2\sqrt{D_p t_p}} \right], \quad (1')$$

где $\operatorname{erf} v$ — функция ошибок (находим из табл. 1 с учетом того, что $\operatorname{erf} v = 1 - \operatorname{erfc} v$).

Среднее значение концентрации примеси в пределах $0 \dots x_{\text{Б}}$ равно

$$N_{\text{ср}} = Q_{\text{п}}/x_{\text{Б}} = \frac{Q}{x_{\text{Б}}} \operatorname{erf} \left(\frac{x_{\text{Б}}}{2\sqrt{D_p t_p}} \right). \quad (2)$$

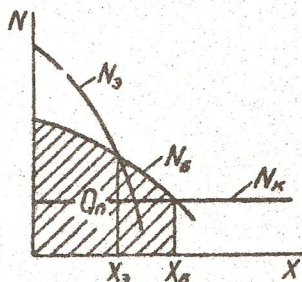


Рис. 1. Профиль распределения легирующей примеси в базе (N_B) и эмиттере (N_E) интегрального транзистора, сформированных термической диффузией

Таблица 1

v	$\operatorname{erfc} v$	v	$\operatorname{erfc} v$	v	$\operatorname{erfc} v$	v	$\operatorname{erfc} v$
0,0	1,00000	1,0	0,15730	2,0	0,00468	3,0	0,00002209
0,1	0,88754	1,1	0,11980	2,1	0,00298	3,1	0,00001165
0,2	0,77730	1,2	0,08969	2,2	0,00186	3,2	0,00000603
0,3	0,67137	1,3	0,06599	2,3	0,00114	3,3	0,00000306
0,4	0,57161	1,4	0,04772	2,4	0,00069	3,4	0,00000152
0,5	0,47950	1,5	0,03390	2,5	0,00041	3,5	0,000000743
0,6	0,39614	1,6	0,02365	2,6	0,00024	3,6	0,000000356
0,7	0,32220	1,7	0,01621	2,7	0,00013	3,7	0,000000167
0,8	0,25790	1,8	0,01091	2,8	0,00008	3,8	0,000000077
0,9	0,20309	1,9	0,00721	2,9	0,00004	3,9	0,000000035

Эффективная (избыточная) концентрация примеси, определяющая электропроводность области,

$$N_{\text{ср.эф}} = N_{\text{ср}} - N_{\text{к}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{к}}$ — концентрация примеси в коллекторе.

Удельное объемное сопротивление базовой области (в ом-сантиметрах)

$$\rho_{\text{Б}} = 1/(q\mu_{\text{p}}N_{\text{ср.эф}}), \quad (4)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; $\mu_{\text{p}} = f(N_{\Sigma})$ — подвижность основных носителей (дырок), $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $N_{\Sigma} = N_{\text{ср}} + N_{\text{к}}$ — суммарная концентрация примеси в базовой области.

Для кремния при $T = 300$ К подвижность электронов и дырок определяем соответственно по формулам

$$\mu_{\text{n}} = 65 + 1265/[1 + (N_{\Sigma}/8,5 \cdot 10^{16})^{0,72}], \quad (5)$$

$$\mu_{\text{p}} = 47,7 + 447,3/[1 + (N_{\Sigma}/6,3 \cdot 10^{16})^{0,76}]. \quad (6)$$

Удельное и поверхностное сопротивление (в омах)

$$R_{\text{сл}} = \rho_{\text{Б}} / x_{\text{Б}}. \quad (7)$$

Конфигурация (топология) полупроводникового резистора (р. с. Δ) включает в себя линейную часть, сопротивление которой $R = (R_{\text{сл}} l) / a$ (где l и a — соответственно длина и ширина линейной части резистора), и контактные области, сопротивление которых определяют с помощью эмпирического коэффициента K .

Исходя из требования минимальных размеров резистора, прежде всего устанавливают размеры контактных областей. Контактное окно должно быть квадратной формы с минимальной стороной L_1 , соответствующей действующей конструкторской норме. Минимальная ширина металлического проводника $l_{\text{п}}$ над контактным окном, гарантирующая полное заполнение контактного окна металлом

$$l_{\text{п}} = L_1 + 2 \Delta_{\text{пл}} + 2 \Delta_{\text{с}}. \quad (8)$$

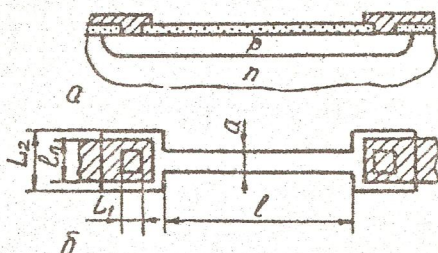


Рис. 2. Структура (а) и топология (б) диффузионного резистора

Минимальный размер контактной области L_2 , гарантирующий расположение металлического проводника в пределах контактной области, равен

$$L_2 = l_{\text{п}} + 2 \Delta_{\text{пл}} + 6 \Delta_{\text{с}}. \quad (9)$$

Здесь $\Delta_{\text{пл}}$ — абсолютная предельная погрешность размеров элементов топологического рисунка на кремниевой пластине; $\Delta_{\text{с}}$ — абсолютная предельная погрешность совмещения двух смежных топологических слоев.

Ширина линейной части резистора при минимальной ширине окна под диффузию и с учетом боковой диффузии под оксид равна

$$a = L_1 + 2 x_{\text{Б}}. \quad (10)$$

Это выражение определяет минимально возможную ширину резистора, ограниченную технологическими возможностями.

Однако такой резистор характеризуется большой погрешностью сопротивления вследствие методической погрешности расчета. Природа методической погрешности обусловлена тем, что функция распределения примеси по глубине, используемая при расчете $N_{\text{ср}}$, справедлива лишь для центральной части резистора, расположенной под диффузионным окном. Очевидно, что методическая погрешность будет тем меньше, чем больше ширина резистора по сравнению с шириной боковых зон или, что то же самое, с толщиной слоя. В связи с этим для резисторов с требуемой точностью сопротивления не хуже $\pm 20\%$ выбирают $a \geq 5 \text{ мкм}$ а при точности не хуже $\pm 10\%$ — $a \geq 10 \text{ мкм}$.

Из сопоставления размера контактной области L_2 и окончательно принятой ширины резистора a выбирают конфигурацию резистора согласно рис. 3а или 3б. В случае, если $L_2 < a$, целесообразно принять конфигурацию резистора по рис. 3в, так как при этом увеличивается площадь контакта «металл — кремний» без увеличения габаритов резистора. Конфигурацию, приведенную на рис. 3г, применяют в случае необходимости более плотной компоновки группы резисторов или облегчения трассировки межсоединений.

Таким образом, сопротивление резистора

$$R = (R_{\text{сд}}l) / a + 2KR_{\text{сд}}, \quad (11)$$

где K — коэффициент контактной области, определяемый из графиков, представленных на рис. 3, в зависимости от принятой конфигурации резистора и соотношения его размеров. Из выражения (11) можно найти длину линейной части резистора l .

Низкоомные резисторы (несколько десятков ом) целесообразно формировать на основе эмиттерной области, которая создается, как правило, в одностадийном процессе и имеет высокую концентрацию донорной примеси (порядка 10^{21} см^{-3} на поверхности). Расчет и конструирование таких резисторов выполняют по вышеприведенной методике с той лишь разницей, что для высоколегированной эмиттерной области можно принять $Q_{\text{п}} \approx Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt}$, где N_0 , D и t — соответственно поверхностная концентрация, коэффициент диффузии и время одностадийного процесса.

В случае большой длины резистора могут возникнуть трудности с компактным размещением элементов ИМС или могут образоваться межсоединения большой протяженности. Во избежание этого резистору можно придать форму меандра. Связанные с этим расчеты будут приведены в п. 4.

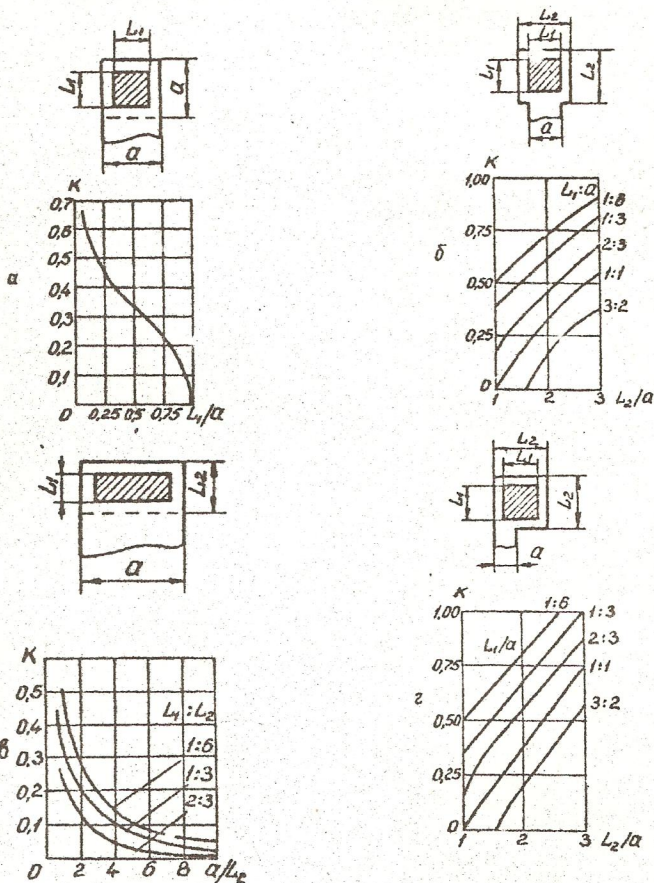


Рис. 3. Ном. граммы для определения коэффициента K контактной области полупроводниковых резисторов

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИМПЛАТИРОВАННЫЕ РЕЗИСТОРЫ

В качестве примера на рис. 4. приведены профили распределения примеси в эмиттерной и базовой областях, полученные соответственно в двух- и трехступенчатом процессах ионной имплантации. Для формирования резисторов могут быть использованы первая, совместно первая и вторая ступени эмиттерного профиля, третья, совместно вторая и третья или совместно первая, вторая и третья ступени базового профиля. В данном. примере конструктор получает в свое распоряже-

ние пять различных значений удельного поверхностного сопротивления, не нарушая при этом принципы и требования интегральной технологии.

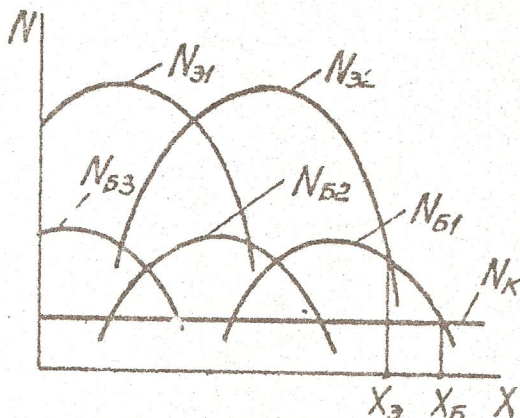


Рис. 4. Профили распределения легирующей примеси в базе (NB) и эмиттере (NE) интегрального транзистора, сформированных ступенчатой ионной имплантацией

Проектирование имплантированных резисторов в общих чертах повторяет этапы проектирования диффузионных резисторов, но имеет некоторые особенности, которые и приводятся ниже.

Функцией распределения примеси при ионной имплантации является гауссово распределение с параметрами λ_{cp} (средняя длина пробега ионов) и σ (среднеквадратическое отклонение пробегов), определяющими профиль данной ступени. Значения λ_{cp} и σ для различных легирующих элементов при различных энергиях E приведены в табл. 2.

Для нижнего профиля, формирующего $p-n$ -переход ("дно" резистора), доза легирования определяется в пределах $0 \dots x_n$:

$$Q_n = \int_0^{x_n} N(x) dx = \frac{Q}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_n} e^{-(x-\lambda_{cp})^2/(2\sigma^2)} dx, \quad (12)$$

где n равна x_B или x_E ; Q — полная доза легирования.

После замены переменных $(x - \lambda_{cp})/(\sigma\sqrt{2}) = v$ и $dx = \sigma\sqrt{2} dv$ получаем

$$Q_n = \frac{Q}{2} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^v e^{-v^2} dv = \frac{Q}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x_n - \lambda_{cp}}{\sigma\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\lambda_{cp}}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (12')$$

Здесь необходимо иметь в виду, что $\sigma_{\text{ГГ}}$ — нечетная функция. Для верхних профилей (см. рис. 4) $Q_{\text{ГГ}} = Q$.

Таблица 2

E, кэВ	$\lambda_{\text{ср. нм}}$				$\sigma, \text{нм}$			
	B	Al	P	As	B	Al	P	As
1	4	4	3	4	4	2	2	1
3	11	7	7	6	7	4	4	2
5	17	9	9	9	11	5	5	3
10	33	16	15	13	17	8	8	5
20	65	29	26	19	29	14	12	7
30	97	42	37	25	38	19	17	9
40	129	56	49	30	46	24	21	11
50	159	70	61	35	52	29	26	13
60	188	84	73	40	57	34	30	15
70	216	99	86	45	62	38	34	16
80	244	113	98	51	66	43	38	18
100	296	143	124	61	73	51	46	21
120	346	173	150	71	79	58	53	25
140	394	202	176	82	84	65	60	28
160	439	232	202	92	89	72	66	31
180	483	262	229	103	92	78	72	35
200	525	291	255	114	96	84	78	38
220	566	320	281	125	99	89	84	41
240	606	349	308	136	102	95	88	44
260	645	377	334	147	104	99	94	47
280	683	406	360	158	106	104	99	51
300	719	434	385	169	108	108	103	54
350	808	502	449	198	113	118	114	61
400	893	568	511	227	117	127	123	69
500	1053	696	631	285	124	142	140	83
600	1203	816	746	345	129	154	153	96
700	1346	931	857	405	133	164	165	108
800	1484	1041	963	465	137	173	175	120
900	1617	1146	1066	525	140	180	184	132
1000	1747	1247	1164	585	143	187	192	142

После суммирования доз легирования всех ступеней, участвующих в формировании резистора, определяют $N_{\text{ср}} = Q_{\Sigma}/x_{\text{п}}$, а затем $N_{\text{ср.эф}}$.

Если резистор получен путем эмиттерной имплантации, то для определения $N_{\text{ср.эф}}$ предварительно нужно найти $N_{\text{ср}}$ в базовой области в пределах толщины резистора. Тогда

$$N_{\text{ср.эф}} = N_{\text{ср.Э}} - N_{\text{ср.Б}} \quad (13)$$

Удельное поверхностное сопротивление $R_{\text{сл}}$ находят так же, как и для диффузионных резисторов.

Значение средних пробегов $\lambda_{\text{ср}}$ [нм] и среднеквадратических отклонений пробегов σ [нм] ионов легирующих примесей в диапазоне энергий $E = 1 \dots 1000$ кэВ можно также вычислить с помощью аппроксимирующих полиномов:

$$\lg \lambda_{\text{ср}} = l_0 + l_1 \lg E + l_2 (\lg E)^2 + l_3 (\lg E)^3,$$

$$\lg \sigma = s_0 + s_1 \lg E + s_2 (\lg E)^2 + s_3 (\lg E)^3.$$

Значение коэффициентов полиномов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Легирующий элемент	Значения коэффициентов полиномов							
	l_0	l_1	l_2	l_3	s_0	s_1	s_2	s_3
В	0,613	0,8786	0,0773	- 0,0262	0,482	0,8594	- 0,0616	- 0,0135
Р	0,682	0,1861	0,3769	- 0,0581	0,401	0,2209	0,3478	- 0,0711
As	0,585	0,4843	0,0299	0,0174	0,192	0,3995	0,109	- 0,0074
Sb	0,579	0,606	- 0,0767	0,0327	0,104	0,4905	0,0103	0,0124

Топологически имплантированные резисторы оформляют, как и диффузионные, в соответствии с рис. 3. Отсутствие бокового эффекта, т. е. точное соответствие размеров резистора размерам маски, через которую проводится имплантация, позволяет назначать ширину резистора по минимальной конструкторской норме. С увеличением ширины и соответственно длины резистора точность сопротивления повышается. В зависимости от требуемой точности минимальная ширина может быть найдена по формуле, приведенной в п. 4 настоящих указаний.

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОМПОНОВКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РЕЗИСТОРОВ

Границей, определяющей «тело» резистора, является $p-n$ -переход, поэтому точность сопротивления резистора зависит не только от точности его геометрических параметров и удельного сопротивления, но и от изолирующих свойств перехода. Изолирующие свойства, в свою очередь, улучшаются с повышением напряжения обратного смещения на переходе (уменьшаются токи утечки и барьерная емкость). Таким образом, коллекторную область, в которой находится резистор, необ-

ходимо соединить с наивысшим потенциалом питания. Соответственно для изоляции низкоомных резисторов, выполненных на основе эмиттерной области, на базовую область должен быть подан наименьший потенциал питания. Это правило целиком относится и к импедансированным резисторам.

Для уменьшения числа и длины проводников, обеспечивающих подвод потенциала смещения, следует стремиться к объединению всех резисторов в общей изолирующей области (коллекторной или базовой). При этом для уменьшения падения потенциала по площади изолирующей области необходимо предусмотреть скрытый высоколегированный слой.

Во избежание образования горизонтальных паразитных транзисторов расстояния между соседними резисторами должны в 2...3 раза превышать диффузионную длину неосновных носителей в изолирующей области.

4. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

В гибридных ИМС и микросборках материал и толщину тонкопленочного резистивного слоя можно выбирать независимо от структуры компонентов (кристаллов ИМС или отдельных транзисторов). Это дает возможность конструктору оптимизировать удельное поверхностное сопротивление по критерию минимальной суммарной площади группы резисторов.

Исходными данными для расчета и конструирования группы интегральных резисторов являются:

- номинальное значение сопротивления резистора R_i , Ом;
- мощность P_i , рассеиваемая резистором, Вт;
- допустимые предельные отклонения $\pm \gamma_{R_i}$ сопротивления от номинального значения, %;

— диапазон рабочих температур $t_{\min} \dots t_{\max}$, °С.

Кроме того, должны быть оговорены метод нанесения резистивных пленок (термическое вакуумное напыление или распыление ионной бомбардировкой) и способ формирования конфигурации резистивных и проводящих элементов (фотолитографический, трафаретный или комбинированный), а также связанные с ними технологические ограничения. Разброс значений R_{cl} в процессах термического вакуумного напыления можно принять в пределах $\pm 2\%$, а в процессах распыления ионной бомбардировкой — $\pm 1\%$. Трафаретный способ может обеспечить минимальный размер топологического элемента, равный 0,3 мм, с точностью $\pm 0,02$ мм; фотолитографический — соответственно 0,1 мм и $\pm 0,05$ мм.

На рис. 5а представлены структура и топология резистора при трафаретном способе его формирования, а на рис. 5б — при фотолитографическом и комбинированном способах. Во втором случае резистивная пленка сохраняется под проводящим слоем, повторяя его рисунок и обеспечивая ему адгезию с подложкой.

Проектирование группы интегральных резисторов следует начинать с определения оптимального удельного поверхностного сопротивления, обеспечивающего минимальную суммарную площадь резисторов:

$$R_{\text{сл}} = \sqrt{\left(\frac{N}{\sum_1 R_i}\right) / \left(\frac{N}{\sum_1 R_i^{-1}}\right)}, \quad (14)$$

где N — количество интегральных резисторов в проектируемой группе.

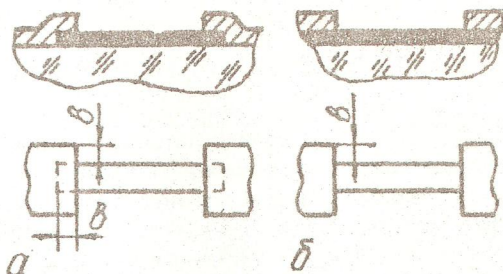


Рис. 5. Структура и топология тонкопленочного резистора, сформированного трафаретным (а) и фотолитографическим или комбинированным (б) способом

По найденному значению $R_{\text{сл}}$ с помощью табл. 4 выбирают стандартный резистивный сплав. При наличии альтернативных вариантов предпочтение отдается сплаву с меньшим значением температурного коэффициента сопротивления α , большим значением допустимой удельной мощности рассеивания P_0 и меньшим коэффициентом старения $\gamma_{\text{ст}}$.

Таблица 4

Марка сплава	$R_{\text{сл}}$, Ом	$\alpha \cdot 10^4$, K^{-1}	P_0 , Вт/см ²	$\gamma_{\text{ст}} \cdot 10^2$ за 1000 ч при 85 °С и нагрузке 1 Вт/см ²
РС5006	3 — 20	0,5	5	2
РС5402	5 — 100	0,5	2	1
РС5406К	10 — 500	0,5	2	1
РС5406Н	50 — 500	0,3	2	1
РС3710	50 — 3000	1	5	0,5
РС4800	100 — 1000	2	5	1
РС1714	300 — 500	2	5	1

Марка сплава	Рсл, Ом	$\alpha \cdot 10^4, \text{K}^{-1}$	$P_0, \text{Вт/см}^2$	$\gamma_{\text{ст}} \cdot 10^2$ за 1000 ч при 85 °С и нагрузке 1 Вт/см ²
PC4206	1000	0,5	2	0,5
PC4400	$10^3 - 5 \cdot 10^3$	3	10	
PC1004	$3 \cdot 10^3 -$ $5 \cdot 10^4$	15	5	2
PC2310	$10^4 - 8 \cdot 10^4$	12	5	2
PC2005	$8 \cdot 10^4 -$ $5 \cdot 10^5$	12	5	2

В дальнейшем проводят расчет меньшего (критического) размера для каждого резистора. В соответствии с соотношением $R_i = (R_{\text{сл}} l_i) / a_i$ для резисторов с $R_i < R_{\text{сл}}$ критическим размером является длина l_i , а для резисторов с $R_i > R_{\text{сл}}$ — ширина a_i (рис. 6).

На первом этапе проектирования критические размеры резистора с учетом технологических ограничений принимают равными 0,3 или 0,1 мм в зависимости от способа формирования его конфигурации. Следует особо подчеркнуть, что при комбинированном способе ширина всех резисторов определяется возможностями фотолитографии, а длина — трафаретом.

На втором этапе проектирования критические размеры корректируют с учетом мощности рассеивания P_i :

$$P_i = P_0 a_i l_i = P_0 a_i^2 \frac{l_i}{a_i} = P_0 a_i^2 \frac{R_i}{R_{\text{сл}}} = P_0 l_i^2 \frac{R_{\text{сл}}}{R_i} \quad (15)$$

Из соотношения (15) следует, что для резисторов с $R_i < R_{\text{сл}}$

$$l_i = \sqrt{P_i R_i / (P_0 R_{\text{сл}})} \quad (16)$$

а для резисторов с $R_i > R_{\text{сл}}$

$$a_i = \sqrt{P_i R_{\text{сл}} / (P_0 R_i)} \quad (16')$$

На третьем этапе проектирования критические размеры корректируют с учетом заданной точности γ_{R_i} . Для расчета, однако, целесообразно использовать более узкий технологический допуск $\gamma_{\text{тех}}$:

$$\gamma_{\text{тех}} = \gamma_{R_i} - \gamma_{\text{ст}} - \gamma_t \quad (17)$$

где $\gamma_{\text{ст}}$ — коэффициент старения, т.е. относительное необратимое изменение сопротивления (см. табл. 4); $\gamma_t = \alpha \Delta t_{\text{max}}$ — относительное обратимое изменение сопротивления; α — температурный коэффициент сопротивления (см. табл. 4); $\Delta t_{\text{max}} = 120^\circ\text{C} - t_{\text{пред}}$ — максималь-

ное отклонение температуры от комнатной для заданного температурного диапазона.

На основании соотношения $R = R_{\text{сл}} l/a$ можно записать выражение для предельных относительных погрешностей

$$\gamma_{\text{тех}} = \gamma_{R_{\text{сл}}} + \gamma_l + \gamma_a = \gamma_{R_{\text{сл}}} + \frac{\delta_l}{l} + \frac{\delta_a}{a}, \quad (18)$$

где δ_l , δ_a — предельные абсолютные погрешности соответственно длины и ширины резистора; l , a — номинальные (расчетные) значения соответственно длины и ширины резистора.

С учетом соотношения $l/a = R/R_{\text{сл}}$ для резистора с $R_i < R_{\text{сл}}$ получим

$$l_i = \left(\frac{R_i}{R_{\text{сл}}} \delta_a + \delta_l \right) / (\gamma_{\text{тех}} - \gamma_{R_{\text{сл}}}), \quad (19)$$

а для резисторов с $R > R_{\text{сл}}$

$$a_i = \left(\delta_a + \delta_l \frac{R_{\text{сл}}}{R_i} \right) / (\gamma_{\text{тех}} - \gamma_{R_{\text{сл}}}). \quad (19')$$

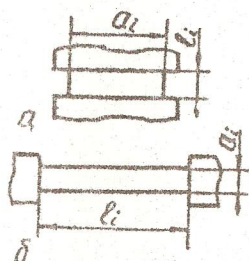


Рис. 6. Конфигурация резисторов при $R_i < R_{\text{сл}}$ (а) и $R_i > R_{\text{сл}}$ (б)

На основании проведенных расчетов для каждого резистора, входящего в группу, определяют три значения критического размера, которые сводят в следующую таблицу (значения R_1, R_2, \dots, R_N располагают в порядке возрастания):

Ограничение	R_1	R_2	...	$(R_{\text{сл}})$	...	R_{N-1}	R_N
Технологические возможности	l_1	l_2	...		...	a_{N-1}	a_N
Мощность рассеивания	l_1	l_2	...		...	a_{N-1}	a_N
Требуемая точность	l_1	l_2	...		...	a_{N-1}	a_N

Из трех значений критического размера для каждого резистора выбирают наибольшее значение и округляют его в большую сторону до значения, кратного $\Delta_{\text{ор}}/M$, где $\Delta_{\text{ор}}$ — абсолютная предельная погрешность размеров элементов рисунка оригинала (зависит от точно-

сти оборудования, применяемого для изготовления оригинала — координатографа, генератора изображения и т.п.); M — масштаб увеличения изображения рисунка на оригинале, используемом для изготовления фотошаблона или трафарета.

Расчет заканчивают определением второго размера для каждого резистора. Для резисторов с $R_i < R_{сл}$ вычисляют $a_i = R_{сл}h/R_i$, а для резисторов с $R_i > R_{сл}$ находят $l_i = R_i a_i / R_{сл}$.

При последующей компоновке спроектированных резисторов на микроплате необходимо учитывать следующие требования:

1. Напуск a контактной области проводника относительно ширины резистора (см. рис. 5) должен быть не менее 0,1 мм для фотолитографического способа и 0,2 мм для трафаретного способа формирования; то же значение напуска (0,2 мм) при трафаретном способе принимают для перекрытия проводящей и резистивной пленок.

2. Минимальные зазоры между смежными топологическими элементами одного слоя принимают равными 0,1 или 0,3 мм в зависимости от способа их формирования; между проводящими и резистивными элементами зазор должен быть не менее 0,2 мм.

3. Минимальные размеры монтажной контактной площадки под микросварку проволоки диаметром 50 мкм должны составлять 0,25x0,2 мм.

4. Размеры микроплаты рекомендуется принимать исходя из условия безотходного разделения групповой подложки стандартных размеров (60x48 мм).

Высокоомным резисторам, имеющим большую длину, целесообразно придавать форму меандра (рис. 7), что обеспечивает более компактное размещение группы резисторов на микроплате и сокращает длину межсоединений.

Особенность расчета резисторов типа меандр обусловлена тем, что плотность тока в изгибах резистора неравномерна (возрастает к внут-

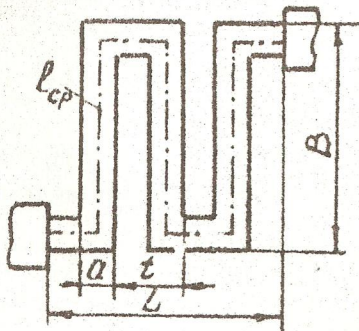


Рис. 7. Резистор в форме меандра

ренним областям контура), в результате чего эффективная длина резистора, рассчитанная по средней плотности тока, будет меньше геометрической, и следовательно, его сопротивление уменьшается (рис. 8а). Так, Г-образный участок, содержащий три квадрата, имеет в действительности сопротивление $2,55 R_{сл}$, а П-образный (пять квадратов) — $4 R_{сл}$ (рис. 8б).

Таким образом, суть расчета сводится к определению длины линейных участков, увеличение которой компенсирует уменьшение эффективной длины на изгибах.

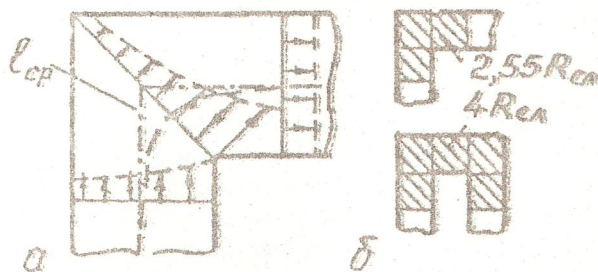


Рис. 8. Неравномерность плотности тока на угловых участках резистора (а) и действительные значения сопротивления Г- и П-образных участков (б)

Поскольку длина меандра $L = nt$, а ширина $B = l_{cp}/n$ (где n — число звеньев, t — шаг), число звеньев можно определить по формуле

$$n = \sqrt{(l_{cp}/t) (L/B)}. \quad (20)$$

Минимальные габариты меандра будет иметь в случае, если он вписывается в квадрат, т. е. при $L = B$. Обычно также принимают ширину зазоров между звеньями равной ширине резистивной полоски, т. е. $t = 2a$. Тогда оптимальное число звеньев

$$n_{opt} = \sqrt{l_{cp}/(2a)}. \quad (20')$$

Далее сопротивление резистора представляют как сумму сопротивлений характерных участков, причем отдельные слагаемые выражают через $R_{сл}$:

$$R = m R_{Г} + k R_{П} + n R_{I} = 2,55 R_{сл} m + 4 R_{сл} k + n (l_i/a) R_{сл}. \quad (21)$$

Здесь m и k — число Г- и П-образных участков; $R_{Г}$ и $R_{П}$ — сопротивление Г- и П-образных участков соответственно; R_{I} — сопротивление прямолинейного участка.

Отсюда можно найти длину l_i каждого прямолинейного участка. Например, для резистора, изображенного на рис. 7,

$$R = 2 R_T + 2 R_{II} + 3 R_i = 5,1 R_{сл} + 8 R_{сл} + 3 (l_i/a) R_{сл},$$

отсюда

$$l_i = \frac{(R - 13,1 R_{сл}) a}{3 R_{сл}}.$$

Концевые участки пленочных резисторов любой конфигурации должны быть ориентированы так, чтобы исключить влияние погрешности совмещения резистивного и проводящего рисунков на величину сопротивления (при этом, естественно, должны быть предусмотрены необходимые напуски и перекрытия). Формально правило сводится к тому, что входной и выходной токи резистора должны иметь одинаковое направление. С этой точки зрения резистор, приведенный на рис. 7, спроектирован правильно, а резисторы, изображенные на рис. 9, — неправильно.

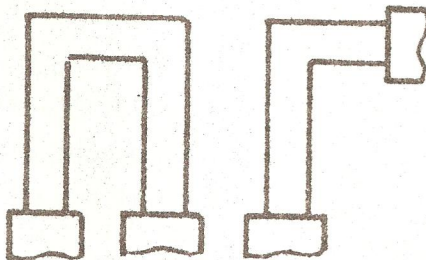


Рис. 9. Примеры неправильной ориентации концевых участков резисторов

ЛИТЕРАТУРА

1. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1980. 424 с.
2. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов / Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев П.И. и др.; Под ред. Л.А.Коледова. М.: Высш. шк., 1984. 231 с.
3. Парфенов О.Д. Технология микросхем: Учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 320 с.
4. Парфенов О.Д. Конструирование полупроводниковых интегральных схем: Методические указания по курсовому проектированию. М.: МВГУ, 1984. 28 с.

ПРИМЕР РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИФфуЗИОННОГО РЕЗИСТОРА

Условие задачи: спроектировать резистор на основе базовой области транзисторной структуры, формируемой в двухстадийном процессе термической диффузии бора.

Исходные данные: толщина базовой области $x_B = 3$ мкм; коэффициент диффузии при разгонке бора $D_p = 10^{-12}$ см²/с; время разгонки $t_p = 4000$ с; доза легирования $Q = 5,32 \cdot 10^{14}$ см⁻²; концентрация примеси в эпитаксиальном коллекторе $N_k = 10^{16}$ см⁻³. Сопротивление резистора $R = 4,7$ кОм ± 20 %.

Решение

Условная доза легирования

$$Q_{II} = 5,32 \cdot 10^{14} \cdot \operatorname{erf} \left(3 \cdot 10^{-4} / 2 \sqrt{10^{-12} \cdot 4000} \right) = 5,32 \cdot 10^{14} \cdot \operatorname{erf} 2,5 = \\ = 5,32 \cdot 10^{14} \cdot 0,9996 = 5,318 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}.$$

Среднее значение концентрации введенной примеси в пределах $0 \dots x_B$:

$$N_{cp} = 5,318 \cdot 10^{14} / 3 \cdot 10^{-4} = 1,7726 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Эффективная концентрация примеси

$$N_{cp, \text{эф}} = 1,7726 \cdot 10^{18} - 10^{16} = 1,7626 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Суммарная концентрация примеси в базовом слое

$$N_{\Sigma} = 1,7726 \cdot 10^{18} + 10^{16} = 1,7826 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Подвижность основных носителей (дырок) в базе:

$$\mu_p = 47,7 + 447,3 / \left[1 + (1,7826 \cdot 10^{18} / 6,3 \cdot 10^{16})^{0,76} \right] = 80 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

Удельное объемное сопротивление базового слоя

$$\rho_B = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 80 \cdot 1,7626 \cdot 10^{18})^{-1} = 0,0443 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Удельное поверхностное сопротивление слоя

$$R_{cl} = 0,0443 / 3 \cdot 10^{-4} = 148 \text{ Ом}.$$

С учетом требуемой точности сопротивления (± 20 %) ширина резистора

$$a = 5 \cdot 3 = 15 \text{ мкм.}$$

При размерах L_1 контактного окна 5×5 мкм (нормативный минимум), $\Delta_{\text{пл}} = 0,5$ мкм, $\Delta_c = 2$ мкм ширина металлического проводника

$$l_{\text{п}} = 5 + 1 + 4 = 10 \text{ мкм,}$$

а размер контактной области

$$L_2 = 10 + 1 + 12 = 23 \text{ мкм.}$$

Результаты расчета приводят к варианту, приведенному на рис. 3б (см. также рис. 2). Для $L_1/a = 5/15 = 1/3$ и $L_2/a = 23/15 = 1,5$ из графика находим $K = 0,53$.

По формуле (11) определяем длину линейной части резистора:

$$l = (4700 - 2 \cdot 0,53 \cdot 148) \cdot 15/148 = 460 \text{ мкм.}$$

Ввиду значительной общей длины ($460 + 2 \cdot 23 = 506$ мкм) целесообразно оформить резистор в виде меандра (см. рис. 7, 8). Если принять $L = B$ и $t = 2a = 30$ мкм, то число звеньев меандра, согласно формуле (20'), равно

$$n = \sqrt{460/30} = 3,92 \approx 4.$$

Проектируемый резистор схематично представлен на рис. П1. 1, где $R_{\text{п}}$, R_i , $R_{\text{пк}}$ и $R_{\text{к}}$ — соответственно сопротивление П-образного, искомого, приконтактного участков и контактной области. Тогда

$$R = 3 R_{\text{п}} + 4 R_i + 2 R_{\text{пк}} + 2 R_{\text{к}} = 3 \cdot 4 \cdot R_{\text{сл}} + 4 \cdot l_i R_{\text{сл}}/a + 2 \cdot 2 \cdot R_{\text{сл}} + 2 \cdot 0,53 \cdot R_{\text{сл}} = 17,06 R_{\text{сл}} + 4 \cdot l_i \cdot R_{\text{сл}}/a.$$

Отсюда

$$l_i = (R - 17,06 R_{\text{сл}}) a / (4 R_{\text{сл}}) = (4700 - 17,06 \cdot 148) \times 15 / (4 \cdot 148) = 55,1 \text{ мкм.}$$

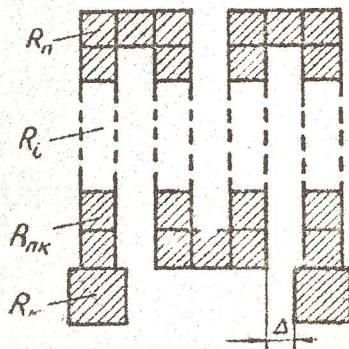


Рис. П1. 1. Конфигурация полупроводникового резистора типа меандр

Минимальный зазор Δ в рисунке резистора (между контактной областью и кромкой центральной части) составляет 11 мкм, что отвечает рекомендациям по компоновке полупроводниковых резисторов.

Габаритные размеры резистора с учетом контактных областей:

$$L = 7 \cdot 15 + 2 \cdot 4 = 113 \text{ мкм};$$

$$B = 4 \cdot 15 + 23 + 55,1 = 138,1 \text{ мкм}.$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ИМПЛАНТИРОВАННОГО РЕЗИСТОРА

Условие задачи: спроектировать резистор на основе базовой области транзисторной структуры, формируемой в трехступенчатом процессе ионной имплантации бора. Оценить точность резистора.

Исходные данные: толщина пассивной базы транзистора $x_B = 0,8 \text{ мкм}$; параметры ступеней имплантации: $E_1 = 180 \text{ кэВ}$, $Q_1 = 1,15 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $E_2 = 100 \text{ кэВ}$, $Q_2 = 0,914 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; $E_3 = 40 \text{ кэВ}$, $Q_3 = 0,5764 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; максимальная концентрация введенной примеси для всех ступеней $N_{\max} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; концентрация примеси в эпитаксиальном коллекторе $N_K = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; требуемое сопротивление резистора $R = 4,7 \text{ кОм}$.

Решение

Из трех вариантов реализации резистора (в трех-, двух- или одноступенчатом процессе) наибольшее поверхностное сопротивление, а значит и наименьшие размеры резистора достигаются с использованием профиля третьей ступени.

Согласно табл. 2, при имплантации бора с энергией $E = 40 \text{ кэВ}$ средняя длина пробега ионов $\lambda_{\text{ср}} = 0,129 \text{ мкм}$, а среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,046 \text{ мкм}$.

Глубина залегания перехода

$$x_n = \lambda_{\text{ср}} + \sigma \sqrt{2 \ln(N_{\max}/N_K)} = 0,129 + 0,046 \cdot \sqrt{2 \ln(5 \cdot 10^{18}/10^{16})} = 0,2915 \text{ мкм}$$

Условная доза легирования

$$\begin{aligned} Q_n &= 0,5764 \cdot 10^{14} / 2 \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{0,2915 - 0,129}{0,046 \sqrt{2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{0,129}{0,046 \sqrt{2}}\right) = \\ &= 0,2882 \cdot 10^{14} \cdot (\operatorname{erf} 2,5054 + \operatorname{erf} 1,9889) = 0,2882 \cdot 10^{14} \times \\ &\quad \times (0,9996 + 0,953) = 0,5749 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}. \end{aligned}$$

Среднее значение концентрации введенной примеси в пределах $0 \dots x_n$ равно

$$N_{\text{ср}} = 0,5749 \cdot 10^{14} / 0,2915 \cdot 10^{-4} = 1,9722 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Эффективная концентрация примеси

$$N_{\text{ср. эф}} = 1,9722 \cdot 10^{18} - 10^{16} = 1,9622 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Суммарная концентрация примеси в слое

$$N_{\Sigma} = 1,9722 \cdot 10^{18} + 10^{16} = 1,9822 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}.$$

Подвижность основных носителей (дырок) в слое

$$\mu_p = 47,7 + 447,3 / [1 + (1,9822 \cdot 10^{18} / 6,3 \cdot 10^{16})^{0,76}] = 78,6 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

Удельное объемное сопротивление слоя

$$\rho = 1 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 78,6 \cdot 1,9622 \cdot 10^{18}) = 0,0405 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Удельное поверхностное сопротивление слоя

$$R_{\text{сл}} = 0,0405 / 0,2915 \cdot 10^{-4} = 1389 \text{ Ом}.$$

Примем размер квадратного контактного окна $L_1 = 5$ мкм, тогда размер квадратной контактной области $L_2 = 23$ мкм (см. решение задачи в приложении 1). Ширину резистора a примем равной 15 мкм. Поскольку $L_2 > a$, конфигурацию резистора выбираем по рис. 36 (см. также рис. 2).

При $L_1/a = 5/15 = 1/3$ и $L_2/a = 1,5$ из графика, приведенного на рис. 36, находим $K = 0,53$. Из формулы (11) находим длину линейной части резистора

$$l = (4700 - 2 \cdot 0,53 \cdot 1389) \cdot 15 / 1389 = 34,86 \text{ мкм}.$$

Общая длина резистора

$$L = l + 2 L_2 = 34,86 + 2 \cdot 23 \approx 81 \text{ мкм}.$$

Принимая $\Delta_{\text{пл}} = 0,5$ мкм и предельную относительную погрешность поверхностного сопротивления $\gamma_{R_{\text{сл}}} = 10$ %, оценим точность сопротивления резистора (по линейной части):

$$\begin{aligned} \gamma_R &\hat{=} \gamma_l + \gamma_a + \gamma_{R_{\text{сл}}} = 0,5/34,86 + 0,5/15 + 0,1 = \\ &= 1,5\% + 3,4\% + 10\% \approx 15\%. \end{aligned}$$

Это означает, что спроектированный резистор будет выполнен с точностью не хуже ± 15 %. Заметим, что при $a = 5$ мкм, погрешность сопротивления резистора превысит 20 %.

ПРИМЕР РАСЧЕТА МАТРИЦЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Условие задачи: спроектировать матрицу тонкопленочных интегральных резисторов, параметры которых приведены ниже:

Номер резистора	1	2	3	4	5
Номинальное сопротивление, Ом	150	600	800	1200	1500
Предельные отклонения сопротивления, %	± 10	± 5	± 5	± 10	± 10
Рассеиваемая мощность, Вт	0,01	0,05	0,06	0,06	0,1
Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$		- 10... + 55			

При расчетах контактным сопротивлением пренебречь. Размеры ситалловой микроплаты выбирать из условия безотходного разделения групповой подложки стандартного размера (60x48 мм). Для изготовления резисторов использовать термическое вакуумное напыление.

Решение

По формуле (14) определим оптимальное удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки:

$$R_{\text{сл}} = \sqrt{(0,15 + 0,6 + 0,8 + 1,2 + 1,5) / (6,67 + 1,67 + 1,25 + 0,83 + 0,67)} = 0,62 \text{ кОм.}$$

Согласно табл. 4, найденному значению $R_{\text{сл}}$ отвечают сплавы РС3710 и РС4800. Предпочтителен сплав РС3710, имеющий меньшие значения α и $\gamma_{\text{ст}}$.

$$\text{Для этого сплава находим } R_{\text{сл}} = 50 \dots 3000 \text{ Ом; } \alpha = 1 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \\ P_0 = 5 \text{ Вт/см}^2; \gamma_{\text{ст}} = 0,005.$$

Выберем комбинированный метод изготовления, при котором ширина a резисторов формируется фотолитографией, а длина l — трафаретом. В связи с этим примем критические размеры $l_1 = l_2 = 0,3 \text{ мм}$, а $a_3 = a_4 = a_5 = 0,1 \text{ мм}$ (см. рис. 6).

Уточним выбранные критические размеры с учетом рассеиваемой мощности по формулам (16), (16'):

$$l_1 = \sqrt{(0,01 \cdot 150) / (5 \cdot 620)} = 0,022 \text{ см} = 0,22 \text{ мм};$$

$$l_2 = \sqrt{(0,05 \cdot 600) / (5 \cdot 620)} = 0,098 \text{ см} = 0,98 \text{ мм};$$

$$a_3 = \sqrt{(0,06 \cdot 620) / (5 \cdot 800)} = 0,96 \text{ см} = 0,96 \text{ мм};$$

$$a_4 = \sqrt{(0,06 \cdot 620) / (5 \cdot 1200)} = 0,0787 \text{ см} \approx 0,79 \text{ мм};$$

$$a_5 = \sqrt{0,1 \cdot 620 / (5 \cdot 1500)} = 0,091 \text{ см} = 0,91 \text{ мм}.$$

Уточним критические размеры с учетом требуем.й точности. Предварительно определим технологический допуск (предельное отклонение) для каждого резистора:

$$\gamma_t = \alpha \cdot \Delta t_{\max} = 10^{-4} \cdot 35 = 0,0035.$$

Теперь по формуле (17) для R_2 и R_3 находим

$$\gamma_{\text{тех}} = 0,05 - 0,005 - 0,0035 = 0,0415,$$

а для R_1 , R_4 и R_5

$$\gamma_{\text{тех}} = 0,1 - 0,005 - 0,0035 = 0,0915.$$

В случае термического вакуумного напыления

$$\gamma_{R_{\text{сл}}} = 0,02.$$

Искомые размеры вычисляем по формулам (19), (19'):

$$l_1 = (150 \cdot 0,005 / 620 + 0,02) / (0,0915 - 0,02) = 0,297 \text{ мм};$$

$$l_2 = (600 \cdot 0,005 / 620 + 0,02) / (0,0415 - 0,02) = 1,155 \text{ мм};$$

$$a_3 = (0,005 + 0,02 \cdot 620 / 800) / (0,0415 - 0,02) = 0,953 \text{ мм};$$

$$a_4 = (0,005 + 0,02 \cdot 620 / 1200) / (0,0915 - 0,02) = 0,214 \text{ мм};$$

$$a_5 = (0,005 + 0,02 \cdot 620 / 15000) / (0,0915 - 0,02) = 0,185 \text{ мм}.$$

Результаты расчетов критических размеров (l , a в миллиметрах) для $R_1 \dots R_5$ с указанием факторов, ограничивающих их минимальные значения, сводим в следующую таблицу:

Ограничение	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Технологические возможности	<u>0,3</u>	0,3	0,1	0,1	0,1
Мощность рассеивания	0,22	0,98	<u>0,96</u>	0,79	0,91
Требуемая точность	0,297	<u>1,155</u>	0,953	0,214	0,185

Из трех значений критического размера для каждого резистора выбираем наибольшее (см. подчеркнутые значения).

Вычисляем второй размер для каждого резистора:

$$a_1 = R_{\text{сл}} \cdot l_1 / R_1 = 620 \cdot 0,3 / 150 = 1,24 \text{ мм};$$

$$a_2 = 620 \cdot 1,155 / 600 = 1,19 \text{ мм};$$

$$l_3 = R_3 \cdot a_3 / R_{\text{сл}} = 800 \cdot 0,96 / 620 = 1,24 \text{ мм};$$

$$l_4 = 1200 \cdot 0,79 / 620 = 1,53 \text{ мм};$$

$$l_5 = 1500 \cdot 0,91 / 620 = 2,2 \text{ мм}.$$

Окончательные значения l и a приведены ниже:

	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
l , мм	0,3	1,155	1,24	1,53	2,2
a , мм	1,24	1,19	0,96	0,79	0,91

Из сопоставления размеров резисторов можно наметить схему компактного их размещения (рис. ПЗ. 1). Подробную прорисовку топологии следует выполнять с учетом требований к компоновке резисторов (см. п. 4). При комбинированном методе фотошаблон с рисунком резисторов совмещают с рисунком проводящих элементов на подложке, поэтому напуск может быть принят равным 0,1 мм. Минимальные размеры контактной площади для микросварки проволоки диаметром 50 мкм равны 0,25x0,2 мм. Минимальный зазор от кромки элемента до края платы 0,5 мм.

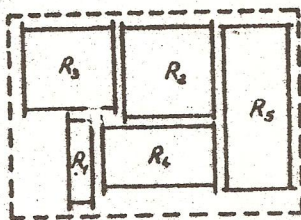


Рис. ПЗ. 1. Схема предварительного размещения спроектированных резисторов

Эскиз компоновки с подробной прорисовкой топологии представлен на рис. ПЗ. 2. Предварительные размеры микроплаты 4,68x6,405 мм. Выбираем размер микроплаты 6x8 мм, что обеспечивает 60 модулей на групповой подложке 60.84 мм. Избыточную длину (~ 1,5 мм по каждой стороне) целесообразно использовать для увеличения критических зазоров (обозначены на рисунке знаком *), а также площадок под микросварку.

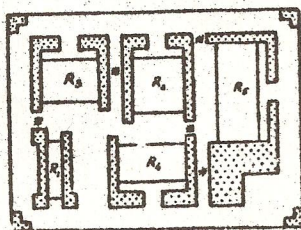


Рис. ПЗ. 2. Эскиз компоновки спроектированных резисторов с подробной прорисовкой их топологии

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Полупроводниковые диффузионные резисторы	5
2. Полупроводниковые имплантированные резисторы	9
3. Рекомендации по компоновке полупроводниковых резисторов	12
4. Тонкопленочные интегральные резисторы	13
Литература	19
Приложения	20