

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР ВСЕСОЮЗНЫЙ
ЗАОЧНЫЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра "Технология приборостроения"

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСХЕМ

Задания и методические указания по выполнению домашних контрольных работ студентами
специальности 0705 - "Конструирование и производство радиоаппаратуры"

МОСКВА 1983

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Контрольные работы должны быть сданы на рецензирование не позже сроков, установленных графиком учебных занятий.

Оформлять работы необходимо с учетом требований соответствующих стандартов и общепринятых правил. В частности, преобразование формул и подстановку в них числовых значений нужно делать так, чтобы можно было проследить за ходом решения задачи. Пояснение принятых в формуле буквенных обозначений - обязательно. Для замечаний рецензента необходимо оставлять поля.

На титульном листе необходимо указать: У КП, Факультет, сведения о студенте, наименование контрольной работы, дисциплину, номер варианта. Например: Загорский У КП, контрольная работа по расчету резисторов и конденсаторов микросхем, по курсу КиТМС, фамилия и инициалы, учебный шифр, номер варианта.

Контрольная работа датируется и подписывается студентом. В начале каждой задачи кратко излагается задание. В конце работы приводится список использованной литературы, на которую даны сноски в тексте

Зачтенная контрольная работа хранится до экзамена. Без зачтенной контрольной работы студенты к экзамену не допускаются.

КОТРОЛЬНАЯ РАБОТА №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Усвоить метод термического испарения и последующей конденсации разлитых материалов в вакууме и рассчитать основные параметры, необходимые для получения тонких пленок с заданными характеристиками.

2. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Методом вакуумного термического испарения тонкие пленки для микросхем получают в результате нагрева, испарения и осаждения вещества на подложку в замкнутом объеме рабочей камеры вакуумной установки

Оптимальная температура нагрева испаряемых материалов, как установлено практикой, соответствует давлению насыщенных паров P_n , равно $1,333 \text{ на } /10(-2) \text{ мм рт. ст.}$. Значения этих температур можно найти в справочной литературе. Предполагается, что плотности тонких пленок равна плотности массивных материалов, а давление пара не меняется в процессе конденсации. Все атомы, достигшие подложки конденсируются на ней.

При испарении с поверхностного источника малой площади /рис. 2 количество вещества, испаренного в пределах телесного угла

При испарении из поверхностного источника с малой площадью dS_1 /рис. 2.1./ количество вещества dM , испаренного в пределах телесного угла $d\omega$ осаждается на площади dS_2 , величина которой возрастает с увеличением расстояния r до испарителя, а также с увеличением угла падения θ . Площадь подложки для данных $d\omega$, r , θ равна:

$$dS_2 = r^2 d\omega / \cos \theta$$

Масса dM по закону косинуса связана с общим количеством испаренного вещества M следующим соотношением:

$$dM = M \cos \gamma \frac{d\omega}{4\pi}$$

Отсюда, масса вещества, осажденного на единицу площади подложки, равна:

$$\frac{dM}{dS_2} = \frac{M}{4\pi r^2} \cos \gamma \cos \theta \quad /2.1/$$

Для изготовления тонкопленочных микросхем обычно используют плоские подложки и располагают их параллельно эффективной плоскости испарения /рис. 2.2./. Толщину пленки d на малом участке подложки dS_2 можно записать в следующем виде:

$$d = \frac{1}{\rho} \frac{dM}{dS_2}$$

где ρ - плотность материала пленки, г/см³. Для плоскопараллельной подложки, отстоящей от испарителя на расстоянии h , угол падения θ равен углу испарения γ и

$\cos \theta = \cos \gamma = h/z$. Расстояние z от испарителя до элемента подложки dS_2 при данном h

меняется с расстоянием l от центра подложки до элемента dS_1 по закону $z^2 = h^2 + l^2$.

Подставляя эти соотношения в формулу /2.1/ будем иметь:

$$d = \frac{M}{4\rho h^2 [1 + (l/h)^2]^2}$$

Удобно охарактеризовать испаритель отношением d/d_0 , где d_0 – толщина в центре подложки при $l = 0$. Тогда

$$d/d_0 = [1 + (l/h)^2]^{-2} \quad /2.2/$$

В конструкторской документации на пленочные микросхемы толщину пленок задают косвенно, указывая величину поверхностного сопротивления R_0 , выраженную в омах на квадрат. Тогда толщина пленки:

$$d = \rho / R_0$$

где ρ - удельное объемное сопротивление материала пленки, Ом*см.

При выполнении расчетов следует учитывать, что не все испаренные атомы достигают поверхности подложки, так как на пути к ней они сталкиваются с молекулами остаточного газа. Это обстоятельство можно выразить формулой:

$$N_2 / N = \epsilon$$

/2.4/

где N_2 - число атомов, достигших поверхности подложки;

N - число атомов, испарившихся с поверхности источника;

L - длина свободного пробега, см.

При вычислении расчетов все вычисления необходимо выражать в системе СИ.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Испарение производится полплоского источника малой площади, которую принимаем равной 1 см^2 , на параллельную ему поверхность круглой подложки / см. рис.2.2/.

Исходные данные:

- испаренный материал;
- сопротивление квадрата пленки R_0 , Ом/см;
- допуск на сопротивление пленки, обусловленный неравномерностью ее

$$R_0, \Omega$$

толщины

- диаметр подложки D , мм;

- относительно количества молекул, попадающих на подложку,

Требуется определить:

1. Толщину пленки d_0 , мкм;
2. расстояние h , см;
3. массу, испаряемого материала M_c в граммах, необходимую для получения толщины d_0 ;
4. давление остаточных газов P , Па;
5. время напыления t , с.

Варианты заданий приведены в таблице 3.1, где /1/- порядковый номер студента в учебном журнале.

Таблица 3.1

Варианты заданий

№	Испаряемый материал	R_0 , Ом/см	d_0 , м	D , мм	N_2/N
1-20	Cu				
21-40	Ag	10^{-3}	10^{-4}	10^{-2}	$1-10^{-3}$
41-60	Al				
61-80	Al				

Для всех вариантов необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Какие допущения приняты при расчетах?
2. Для чего необходим высокий вакуум при получении пленок термическим испарением?
3. Какова должна быть форма приемной поверхности конденсации для получения пленок одинаковой толщины на всей ее площади для случая точечного источника и для случая малого плоского одностороннего источника? /ответ пояснить рисунком/.
4. Изобразите схему вакуумной рабочей камеры и с ее помощью кратко описать технологический процесс получения пленок.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИ РАБОТЫ

Рекомендуется следующий порядок выполнения работы:

1. Определить толщину пленки в центре подложки по формуле /2.3/.
2. Определить расстояние от испарителя до центра подложки по формуле /2.2/.
3. Определить массу испаряемого материала по формуле: /

$$M = \sigma_0 \pi r^2 h^2 \quad [2] \quad (2.5)$$

4. Определить давление остаточного газа в рабочей камере по формуле: /

$$P = \frac{5 \cdot 10^3}{\lambda} \cdot 133,322 \text{ [Па]} \quad (2.6)$$

где λ - длина свободного пробега атомов в сантиметрах, определяемая по формуле /2.4/.

5. Определить время напыления по формуле:

$$t = \frac{M}{v} \text{ [с]}, \quad (2.7)$$

где скорость испарения определяется выражением:

$$v = 5,833 \cdot 10^{-2} P_{\text{н}} \sqrt{\frac{M_0}{T}} \text{ [г/см}^2 \cdot \text{с]},$$

в котором давление насыщенного пара $P_{\text{н}} = 10(-2)$ мм рт. ст., M_0 - молекулярный вес в г/моль, T - температура испарения в К.

6. Кратко сформулировать и записать ответы на вопросы.

Поскольку в различных справочниках приводятся несколько отличающиеся друг от друга значения необходимых для вычисления констант, рекомендуется использовать данные таблицы 4.1.

Таблица 4.1.

ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОНСТАНТ

	$P, 10^4 \text{ Па}$	$\lambda, \text{ см}$	$M, \text{ г/моль}$	$T, \text{ К}$
Cu	1,7	6,95	63,54	1546
Ag	1,3	10,5	107,88	1320
Au	2,4	19,3	197,2	1738
Al	2,8	2,69	26,97	1269

Пример:

Исходные данные: испаряемый материал – золото;

$$R_0 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом/мм}^2; \quad \gamma_R = 6\%;$$

диаметр подложки $D = 32 \text{ мм}$;

относительное количество атомов, попадающих на подложку $N_0/N = 0,988$. Определить толщину d_0 , мкм, расстояние h , см; массу испаренного материала M , г; необходимую для получения величины d_0 ; давление газов P , Па; время напыления t , с. Схема расположения испарителя и подложки показана на рис. /2.2/. Площадь испарителя равна 1 см^2 .

1. Выписываем из таблицы 4.1 основные характеристики золота: $\hat{\alpha} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$;

$$\rho = 19,3 \text{ г/см}^3 \quad M_0 = 197,2 \text{ г/моль}, \quad T = 1738 \text{ К.}$$

2. По формуле /2.3/ определяем:

$$d_0 = \frac{2,4 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-3}} = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ см} = 0,2 \text{ мкм}$$

3. Преобразуя формулу /2.2/ получаем:

$$h = \frac{\hat{\alpha}}{\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\gamma_R}{100}} - 1}} = \frac{1,6}{\sqrt{\frac{1}{1 - 0,06} - 1}} = 8,95 \text{ см.}$$

4. Массу определяем по формуле /2.5/:

$$M = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14 \cdot 19,3 \cdot 8,95^2 = 0,097 \text{ г.}$$

5. Используя формулу /2.4/, предварительно определяем:

$$\lambda = \frac{8,95}{0,988} = 745,83 \text{ см}$$

и, затем, давление вычисляем по формуле /2.6/:

$$p = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{745,83} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.} = 799,932 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$$

6. Определяем скорость испарения:

$$v_n = 5,833 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{197,2}{1738}} = 1,95 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с.}$$

время t находим по формуле /2.7/:

$$t = \frac{0,097}{1,95 \cdot 10^{-4}} = 497 \text{ с}$$

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2
РАСЧЕТ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОГОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

1. ЦЕПЬ РАБОТЫ

Изучить методику и провести конструктивный расчет тонкопленочных резистора и конденсатора.

2, ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной работе определяют размеры и площадь резисторов прямоугольной формы и конденсаторов в форме квадрата.

2.1. Расчет резисторов прямоугольной формы

Одним из основных параметров пленочного резистора является коэффициент формы или число квадратов:

$$K_{\phi} = \frac{R_{\phi}}{R_0}, \quad /2.1/$$

где R - номинальное сопротивление, Ом;

R₀ - сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/кв.

Геометрические размеры резистора связаны с K_φ следующим выражением:

$$K_{\phi} = \frac{l}{b}, \quad /2.2/$$

где l - длина резистора, b - ширина резистора.

Для резисторов с K_φ > 1 /рис. 2.Т./, расчет начинают с определения ширины, которую выбирают из условия:

$$b \geq \max \{ b_p, b_{\Delta}, b_{\tau} \} \quad /2.3/$$

где b_p - минимальная ширина резистора, при которой рассеивается заданная мощность:

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{R_0 K_{\phi}}}, \quad /2.4/$$

где b^ε - минимальная ширина резистора, при которой обеспечивается заданная точность:

$$b_{\Delta} = \frac{\frac{\Delta R}{R_0} \cdot l}{\delta K_{\phi}} \quad /2.5/$$

ε b, ε l - точность воспроизведения ширины и длины резистора
/ обычно ε b = ε l = ±10 мкм/;

$$\delta K_{\phi} = \delta R - \delta R_0 - \delta l - \delta R_0 - \delta R_0, \quad /2.6/$$

ε_л R - относительная погрешность сопротивления резистора;

ε_л R₀ - погрешность воспроизведения квадрата резистивной пленки, которая может иметь значения в пределах от 0,5 до 5%;

ε_л a - погрешность сопротивления вносимая контактами / 1...2%/;

$$\delta_{Rt} = \alpha_R \Delta t$$

- температурная погрешность сопротивления / α_R - ТКС материала резистора/;

$$\delta_{Rst}$$

- погрешность сопротивления за счет старения резистивной пленки / 0,5...2%/;

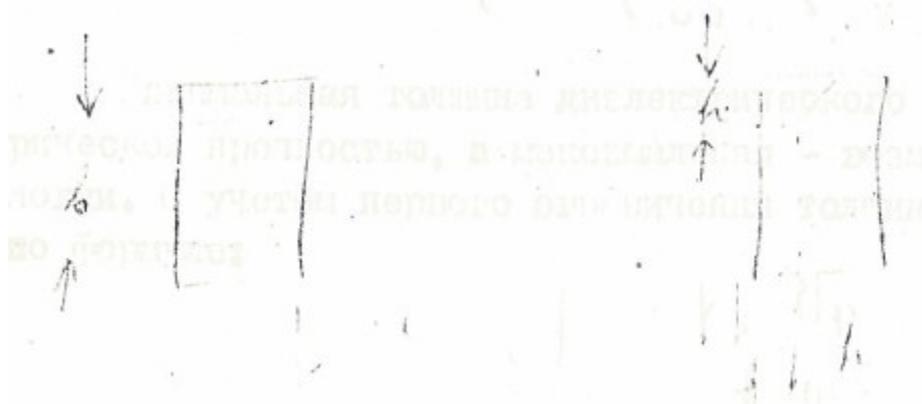
$$b_T$$

- минимальная ширина резистора, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования его контура / для масочного метода и метода фотолитографии

$$b_T$$

=100 мкм/.

РЕЗИСТОР С $K_f > 1$



b - ширина резистора, l - его длина, h - перекрытие резистивной полоски с контактными площадками

Рис. 2.1.

За окончательную величину t принимают ближайшее большое значение, кратное шагу координатной сетки.

После того, как определена ширина резистора, находят его длину по формуле:

$$l = b \cdot K_f \quad /2.7/$$

которую округляют до ближайшего значения, кратного шагу координатной сетки.

Для резистора с $K_f < 1$ /рис. 2.2/ расчет его размеров начинают наоборот с величины l .

РЕЗИСТОР С $K_f < 1$

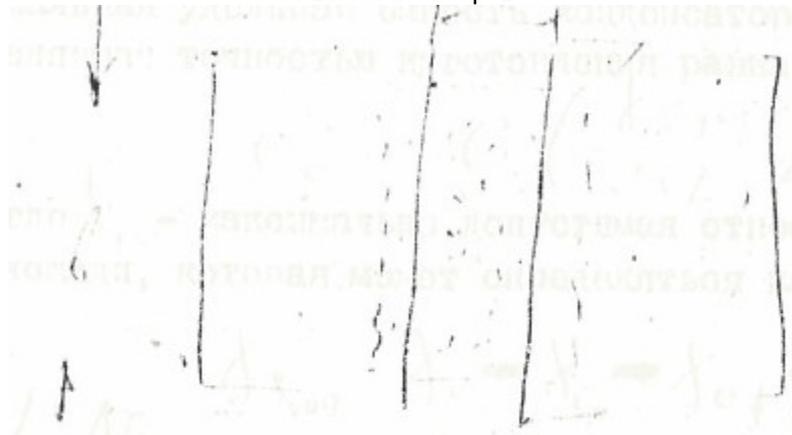


Рис. 2.2.

Значения l выбирают из условия

$$l \geq \max \{ l_p, l_n, l_t \} \quad /2.8/$$

где l_p - минимальная величина, при которой рассеивается заданная мощность:

$$l_p = \sqrt{\frac{P k_{\text{фр}}}{P_0}} \quad /2.9/$$

l_n - минимальная величина, при которой обеспечивается заданная точность:

$$l_n = \frac{\Delta b \cdot n + \Delta \epsilon}{\delta_{k_{\text{фр}}}} \quad /2.10/$$

l_t - минимальная величина, определяемая разрешающей способностью выбранного метода формирования контура резистора / как правило $l_t = bt$ / За окончательную величину l пригашают ближайшее большее значение, кратное шагу координатной сетки.

Затем вычисляют величину b по формуле:

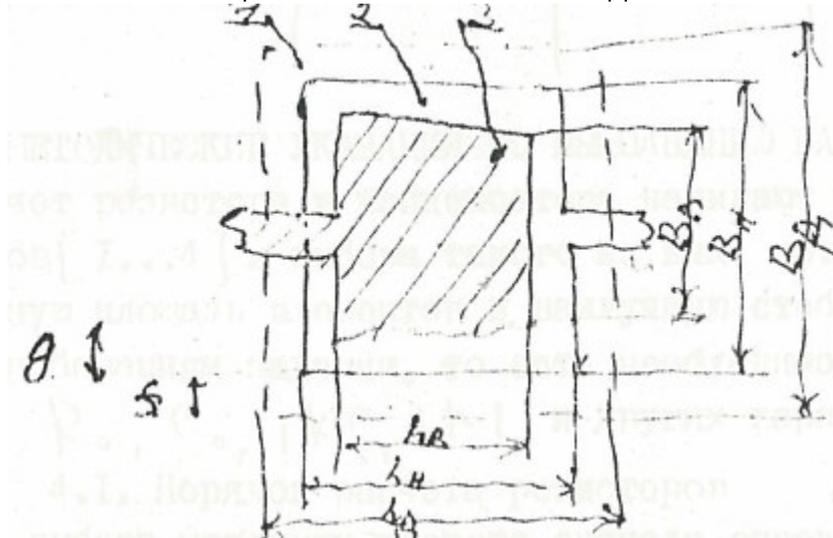
$$b = \frac{c}{k_{\text{фр}}} \quad /2.11/$$

которую округляют до ближайшего значения, кратного шагу координатной сетки.

2.2. РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРА В ФОРМЕ КВАДРАТА

Объектом расчета является конденсатор с двумя обкладками и одним слоем диэлектрика /рис. 2.3./.

КОНСТРУКЦИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО КОНДЕНСАТОРА



1 - диэлектрик; 2 - нижняя обкладка; 3 - верхняя обкладка. Активная площадь перекрытия обкладок $S > 5 \text{ мм}^2$.

Рис. 2.3.

Емкость конденсатора, в общем случае, определяется по известной формуле:

$$C = 0,0885 \frac{\epsilon S}{d} \quad [\text{пФ}].$$

где $\epsilon_{дд}$ - диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;
 S - площадь перекрытия обкладок, равная площади верхней обкладки, см²;
 d - толщина диэлектрического слоя, см.
 Максимальная удельная емкость, обусловленная электрической прочностью

$$C_{0п} = 9,0 \cdot 10^{11} \frac{\epsilon}{d} \left[\frac{\text{пФ}}{\text{см}^2} \right] \quad /2.12/$$

Тогда без учета краевого эффекта

$$C = C_{0п} S \quad /2.13/$$

Минимальная толщина диэлектрического слоя ограничивается электрической прочностью, а максимальная - возможностями пленочной технологии. С учетом первого ограничения толщину диэлектрика определяют по формуле:

$$d = \frac{K_3 U_p}{E_{пр}} \quad /2.14/$$

где K_3 - коэффициент запаса обычно принимаемый $K_3 = 3$;
 $E_{пр}$ - прочность материала диэлектрика; В/см;
 U_p - рабочее напряжение, В.

Относительная погрешность изготовления конденсатора определяется суммой относительных погрешностей:

$$\delta_{\epsilon} = \delta_{\epsilon 0} + \delta_{S} + \delta_{\epsilon 1} + \delta_{\epsilon ст} \quad /2.15/$$

где $\delta_{\epsilon 0}$ - относительная погрешность удельной емкости;
 $\delta_{\epsilon S}$ - относительная погрешность активной площади конденсатора;
 $\delta_{\epsilon 1}$ - относительная температурная погрешность;
 $\delta_{\epsilon ст}$ - относительная погрешность, обусловленная старением пленки конденсатора;

Можно принять $\delta_{\epsilon 0} = 5\%$, $\delta_{\epsilon ст} = 2\%$. Температурная погрешность равна

$$\delta_{\epsilon 1} = \delta_{\epsilon} \frac{\Delta T}{T} \quad /2.16/$$

где δ_{ϵ} - ТКЕ материала диэлектрика.

Максимальная удельная скорость конденсатора с квадратными обкладками, определяемая точностью изготовления равна:

$$C_{0п} = C \left(\frac{\delta_{S доп}}{2 \cdot a^2} \right)^2 \quad /2.17/$$

где $\delta_{S доп}$ - максимально допустимая относительная погрешность активной площади, которая может определяться как

$$\delta_{S доп} = \delta_{\epsilon} = \delta_{\epsilon 0} + \delta_{\epsilon 1} + \delta_{\epsilon ст} \quad /2.18/$$

ϵL , ϵB - абсолютная погрешность размеров верхней обкладки конденсатора.

Требуется выбрать технологический метод изготовления и в соответствии с его возможностями и ограничениями, рассчитать размеры резисторов и конденсаторов, обеспечить выполнение заданных требований по электрическим и эксплуатационным параметрам. Расчеты должны завершиться выполнением топологических чертежей на масштабной-координатной бумаге с миллиметровым или большим шагом координатной сетки. Рекомендуется выбирать масштаб 10:1 или 20:1. На полях чертежа обязательно указывать значение шага координатной сетки в выбранном масштабе.

Исходные данные для расчета:

1. Номинальные значения сопротивления резистора R и конденсатора C.
2. Допуск на номиналы $\delta_R = 10\%$, $\delta_C = 15\%$
3. Мощность рассеивания P для резистора.
4. Рабочее напряжение для конденсатора U_p .
5. Рабочий диапазон температур от -60°C до 100°C .

Остальные величины, встречающиеся в формулах находят в литературных источниках

[1...5].

Варианты заданий приведены в следующей таблице.

m	R, кОм	P, мВт	ϵ , ф	U_p , В	Таблица
Резисторы по пер судовому коэффициенту	10-10	10	10-50	15-100,5	

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Расчет резистора и конденсатора начинают с анализа существующих материалов [1...4] и выбора такого из них, который обеспечивал бы минимальную площадь, элементов и наилучшую стабильность, а также отвечал бы требованиям задания, то есть необходимо определить оптимальные значения R0, C0, TKE и других характеристик.

4.1. Порядок расчета резисторов

Для выбора методики расчета сначала определяют коэффициент формы резистора по формуле /2.1/, стремясь получить $K_f \approx 1$. Пленочные резисторы больше 2 см(2) и меньше 0,01 см(2) не проектируют. Для резисторов с $K_f > 1$ рекомендуется следующая последовательность расчета:

1. Определить допустимую относительную погрешность коэффициента формы, по формуле /2.6/.
2. Определить W_p по формуле /2.4/.

3. Определить по формуле /2.5/ значение δ_a .
4. Из трех величин в формуле /2.3/ выбрать максимальную и округлить её значение до большого целого числа шагов координатной сетки.
5. Определить C по формуле /2.7/ и округлить ее значение до ближайшего полного числа шагов координатной сетки. После этого округления в соответствии с формулой /2.2/ оценить

получившуюся погрешность коэффициента формы в соответствии с

$$\delta_{k_f} = \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta b}{b}$$

$$\delta_{k_f} > \delta_{R_0}$$

и погрешность сопротивления резистора используя формулу /2.6/. В случае, если выбирают большее значение ширины резистора, при котором округление l дает приемлемую ошибку.

6. Определить действительную удельную мощность рассеивания по формуле:

$$P_0 = \frac{P}{k_f \cdot b}$$

Должно выполняться условие: $k_f \cdot b \geq P_0$. Если оно не выполняется, расчет корректируют аналогично п.5. Для резисторов с $K_f < 1$ расчет начинают с определения и пользуются формулами /2.8...2.11/. В остальном порядок расчета и прочерки аналогичен предыдущему случаю.

ПРИМЕР. Определить размеры и площадь пленочного резистора по следующим исходным данным:

$$R = 0,4 \text{ Ом}, \delta_{R_0} = 10\%, P = 4 \text{ мВт}$$

Температура эксплуатации, от -60°C до 100°C . Метод формирования рисунка масочный.

$$\delta_{R_0} = 2\%, \delta_{R_0} = 0,5\%, \Delta C = \Delta b = 0,01 \text{ мм}, \delta_{C_1} = 0,1\%$$

Технологические данные:

1. По таблице 2.1. 5 выбираем в качестве материала резистивной пленки хром с поверхностным удельным сопротивлением $R_0 = 400 \text{ Ом/кв}$. Из этой же таблицы выписываем характеристики материала, необходимые для расчета: $P_c = 20 \text{ мВт/мм}^2$; $\alpha_{\text{хр}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$; $\epsilon_{\text{хр}} = 1\%$.

2. Вычисляем коэффициент формы пленочного резистора по формуле /2.1/:

$$K_f = \frac{400}{400} = 1$$

3. Определяем допустимую относительную погрешность по формуле /2.6/, подставив в нее вычисленное значение

$$\delta_{R_0} = 1 \cdot 10^{-1} \cdot 80 = 0,08$$

$$\delta_{k_f} = 10 - 0,5 - 0,8 - 1 - 2 = 5,7\% \text{ или } \delta_{k_f} = 0,057$$

4. Определяем ширину резистивной пленки по формулам /2.4/ и /2.5/

$$b_{\text{р}} = \sqrt{\frac{P}{P_c}} = 0,43 \text{ мм}, b_{\text{л}} = \frac{100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01}{0,057} = 0,175 \text{ мм}$$

5. В соответствии с формулой /2.3/ и с учетом шага координатной сетки $H = 0,1 \text{ мм}$ / $M \cdot 20:1$; 2-х миллиметровая сетка/ принимаем окончательное значение $b = 0,5 \text{ мм}$.

ПРИМЕР. Определить размеры и площадь пленочного конденсатора по следующим исходным данным: $C = 20 \text{ нФ}$, $L_c = 15\%$; $U_p = 25 \text{ В}$; $\Delta t = 80^\circ\text{C}$.

Технологически погрешности:

$$K_p = 5\%, \Delta L = \Delta B = 0,01 \text{ мм}; K_{C_{\text{от}}} = 2\%.$$

1. Пользуясь справочными материалами, например, таблицей 3.1[2], выбираем в качестве материала диэлектрического слоя монооксид кремния. Основные характеристики этого диэлектрика: $\epsilon_{\text{д}} = 5 \dots 6$,

$$E_{\text{пр}} = 1/2 \dots 3 / 10^6 \text{ В/см}, \alpha_c = 2 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}. \text{ Принимаем: } \xi = 5,5 \text{ и } E_{\text{пр}} = 2 \text{ МВ/см}.$$

2. Определяем толщину диэлектрического слоя по формуле /2.14/:

$$d = \frac{225}{2 \cdot 10^6} = 37,5 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,375 \text{ мкм}$$

3. Определяем погрешность за счет изменения температуры:

$$K_{C_{\text{от}}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 80 \cdot 100 = 1,6\%$$

4. Вычисляем допустимую погрешность активной площади конденсатора по формуле /2.18/:

$$K_{C_{\text{от}}} = 1,6 + 1,6 = 3,2\%$$

5. Вычисляем $C_{\text{от}}$ по формуле /2.12/:

$$C_{\text{от}} = \frac{20 \cdot 10^{-9}}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 12700 \text{ пФ/см}^2$$

6. Определяем удельную емкость $C_{\text{от}}$ по формуле /2.17/:

$$C_{\text{от}} = 20000 \left(\frac{0,375}{2 \cdot 10^{-6}} \right)^2 = 2,045 \text{ мкФ/см}^2$$

7. Из двух полученных величин для дальнейших расчетов выбираем меньшую, а именно 127000 пФ/см². Однако, удельной емкости для монооксида кремния, окончательно принимаем $C_0 = 10000 \text{ пФ/см}^2$.

8. Определяем активную площадь конденсатора, используя формулу /2.13/:

$$S_0 = \frac{20000}{10000} = 0,2 \text{ см}^2 = 20 \text{ мм}^2$$

9. Вычисляем размеры верхней обкладки:

$$L_n = B_n = 0,5 \sqrt{2 \cdot 0,2} = 4,4 \text{ мм}$$

10. Вычисляем размеры нижней обкладки:

$$L_n = B_n = 0,5 \sqrt{2 \cdot 0,2} = 4,4 \text{ мм}$$

11. Определяем размеры диэлектрика:

$$L_d = B_d = 4,4 + 2 \cdot 0,1 = 5,1 \text{ мм}$$

12. Вычисляем площадь, занимаемую конденсатором на подложке:

$$S_D = 5,1 \cdot 5,1 = 26 \text{ мм}^2$$

13. Определяем действительную относительную погрешность активной площади подложки по формуле:

$$\delta_s' = \frac{2 \Delta L_c}{L_c} = \frac{2 \cdot 0,01}{4,5} \cdot 100 = 0,444\% = 0,5\%$$

6. Находим длину резистора по формуле [2.7] $l = 0,5 \cdot 1 = 0,5 \text{ мм} \cdot 4$

7. Площадь резистора $S = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25 \text{ мм}^2$.

8. Для получения значения действительной удельной мощности производим следующие действия:

$$\delta'_{кф} = \left(\frac{0,5\%}{0,5} + \frac{0,1\%}{0,5} \right) \cdot 100 = 4\%$$

$$\delta'_R = 0,5\% + 0,8\% + 1,2\% = 2,3\% < \delta_R$$

$$P'_0 = 4 / 0,25 = 16 \text{ мВт/мм}^2 < P_0$$

и с помощью полученных данных проверяем полученное ранее значение сопротивления на точность.

Таким образом, сконструированный резистор отвечает требованиям задания по точности и рассеиваемой мощности.

4.2. Порядок расчета конденсаторов.

Рекомендуется следующая последовательность расчета.

1. Определить минимальную толщину диэлектрика из условия электрической прочности по формуле /2.14/,
2. Определить допустимую погрешность активной площади конденсатора по формуле /2.18/.
3. Определить $S_{оп}$ по формуле /2.12/.
4. Вычислить $S_{от}$ по формуле /2.17/.
5. Из двух величин выбрать меньшее значение удельной емкости в соответствии с

$$C \leq \min \{ \epsilon_{оп}, \epsilon_{от} \}$$

формулой: /2.13/

6. Определить активную площадь конденсатора, используя формулу /2.13/. Если получается $S \approx 0,05 \text{ см}^2$, то в этом случае следует учесть краевой эффект с помощью

коэффициента $K = 1,3 - 6 \text{ С/см}^2$, который подставляют в формулу: $S = \frac{C}{\epsilon_0 \cdot K}$

7. Вычисляют размеры верхней обкладки: $L_N = B_N = \sqrt{S}$

Округляют полученное значение до величины, кратной шагу координатной сетки. Затем

нижней: $L_n = B_n + 2q$ / принимаем $q = 0,2 \text{ мм}$ /.

8. Вычислить размеры диэлектрика: $L_d = B_d = l_n + 2f$ ($f = 0,1 \text{ мм}$)

8. Определить площадь конденсатора по диэлектрику: $S_d = L_d \cdot B_d = l_n^2$

10. Провести проверку расчетов. Конденсатор сконструирован правильно, если

действительная погрешность конденсатора $\delta'_C \leq \delta_C \cdot \delta_C'$ определяют по формуле /2,15/, предварительно определив $\epsilon_{\Delta S}$ по формуле;

$$\delta'_S = \frac{2 \Delta h}{h}$$

Кроме того, рабочая напряженность электрического поля не должна превышать напряженность пробоя диэлектрика:

$$E_{пр.раб} \leq E_{пр}; \quad E_{пр.раб} \approx \frac{U_p}{d}$$