



ВІДКРИТИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТКУ ЛЮДИНИ "УКРАЇНА"

“ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ”

Інструктивно-методичні
матеріали
до практичних занять
і курсового проектування



ВІДКРИТИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РОЗВИТКУ ЛЮДИНИ "УКРАЇНА"

Інструктивно-методичні матеріали
до практичних занять і курсового проектування
з Дисципліни

"ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ"

(для студентів спеціальностей 6.09 і 002

"Побутова електронна апаратура" всіх форм навчання.)

Затверджено
на засіданні кафедри
побутова електронна апаратура
протокол №1 від 17.09.2002

Рекомендовано до друку
методичною радою ВМУУРД
"Україна"
протокол №1 від 14.10.2002

КИЇВ
ВМУУРД "Україна"
2003

*Затверджено та рекомендовано до друку
Методичною радою Відкритого міжнародного
Університету розвитку людини "Україна"
(Протокол від 14.10.2002 р. №1)*

Укладачі

М.М. Прищеп, к.т.н., доцент

Рецензент

С.М. Дяченко, к.т.н., доцент
Радіотехнічного факультету
НТУУ "КПІ"

"Основи мікроелектроніки" (для студентів спеціальності 6.091002 "Побутова електронна апаратура" всіх форм навчання). Укл. М.М. Прищеп, к.т.н. доцент, -
Київ: ВМУРОЛ "Україна", 2003 - 21 с.

ББК 32.973.1

© Відкритий міжнародний університет
розвитку людини "Україна" (ВМУРОЛ), 2003

Мета практичних занять із дисципліни "Технологія і конструювання мікросхем і мікрозбіроч" - закріпити й розширити отримані теоретичні знання й придбати навички з розрахунку й конструювання пливкових елементів гібридних інтегрованих мікросхем (ІМС).

Предметом практичних занять є проведення конструкторських розрахунків елементів і розробка топологічної структури ІМС.

Кожне практичне заняття присвячується розрахунку й проектуванню одного із елементів гібридної ІМС або виконанню одного з етапів розробки топології.

На практичних заняттях кожний студент самостійно виконує розрахунки і розробляє конструкцію усіх основних пливкових елементів (РС,1,РС), а на закінчення - розробляє топологію функціонального вузла, оцінює якість розробки.

У методичних указах до практичних занять наведені списки теоретичні відомості й інженерні методи розрахунку й конструювання елементів і ІМС у цілому, а також комплекти завдань для самостійної роботи. При розв'язуванні задач необхідно використовувати усі вихідні дані, наведені в умові. У деяких завданнях умова повинна бути доповнена даними, що характеризують точність процесів, вибраних для одержання пливоч і формування розмірів елементів і ін.

РОЗДІЛ I

РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУВАННЯ ПЛІВКОВИХ РЕЗИСТОРІВ

1.1. Плівкові резистори

Плівкові резистори (рис. 1.1) складаються з резистивної смужки 1 простої або складної форми і двох або більше виводів 2 для підключення до інших елементів мікросхеми. Конфігурація резистора залежить від значення його опору; точності, методу формотворення геометричних розмірів, матеріалу резистивної смужки й площі, відведеної на платі для резистора. Технологічними конструкціями є прямокутна (рис. 1.1.а,б) і типу мандри (рис. 1.1.в).

Опір тонкоплівкової резистивної смужки 1 для однорідної по товщині резистивної плівки визначають за формулою

$$R = \frac{\rho l}{db} = (\rho/d)(l/b) = R_0 K_\phi \quad (1.1)$$

де ρ - питомий опір матеріалу плівки; d -товщина плівки; l - b - відповідно довжина і ширина резистивної смужки; $R_0 = \rho/d$ - опір квадрата резистивної плівки; K_ϕ - коефіцієнт форми або число квадрата резистивної смужки.

Виводи 2 є контактними площинками до резистивної смужки, котрі переходять у провідники. Контактні переходи будь-якого типу мають опір, що залежить від R_0 резистивної смужки, питомої електропровідності контактного переходу G_k і довжини перекриття l_k (рис. 1.1.а).

Для розрахунків резисторів повинні бути задані із схематичного розрахунку: опір R ; відносна похибка номінального значення γ_n ; розділова потужність P_d ; умови експлуатації (довговічність t , робоча температура T) і інші вимоги і обмеження, сформульовані в [13].

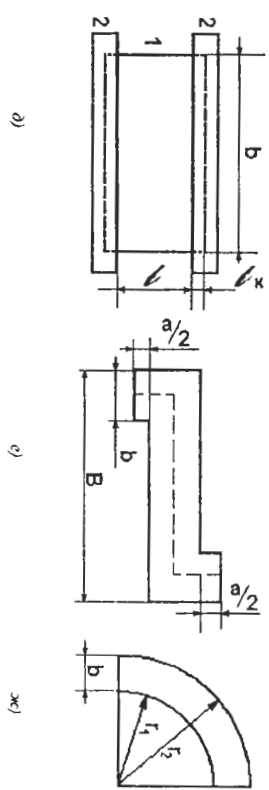
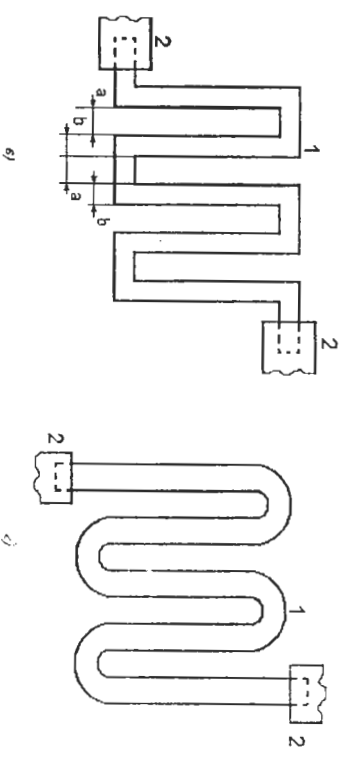
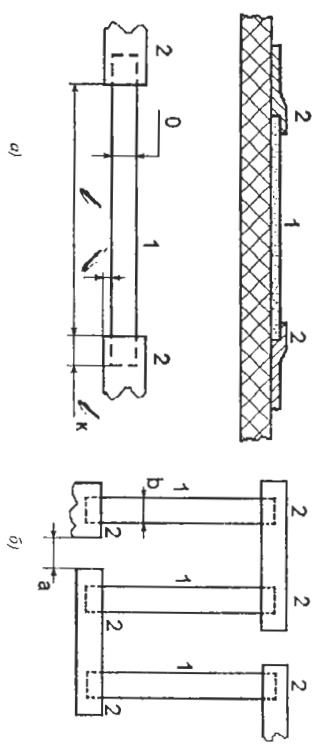


Рис. 1.1

Розрахунки і конструювання резисторів виконують такої послідовності: вибір матеріалу (матеріалів) резистивної смужки і виводів; вибір методів отримання шарів і напівки; розрахунки розмірів резисторів за умови, що кожний із них має прямокутну форму; визначення конфігурації резисторів з уточненням розмірів.

1.2. Вибір матеріалів резисторів

Вибір матеріалу зводиться до визначення власне матеріалу і вибору величини R_0 . Матеріал (або матеріали) вибирають із усього набору дозволених для застосування резистивних матеріалів з урахуванням: стабільності, $T\alpha_R$ сумісності матеріалу резистора і контактних плішчок, вартості і ефективності, сумісності технології виготовлення резисторів із даного матеріала з технологією виготовлення інших елементів і мікросхеми в цілому.

З числа відібраних матеріалів, що задовольняють перерахованим вимогам, вибирають матеріали з оптимальним значенням R_0 за критерієм мінімальної площі усіх резисторів мікросхеми. Якщо відношення максимального опору до мінімального з числа резисторів, що розробляються, $R_{max}/R_{min} \geq 100$, доцільно застосувати два матеріали. Усі резистори розбивають на дві групи так, щоб $R_{max1}/R_{min1} \approx R_{max2}/R_{min2}$. Для кожної групи вибирають свій матеріал. Оптимальне значення R_0 у кожній із груп (або мікросхеми - при використанні одного матеріалу) визначають за формулою

$$R_{optn} = (1 - \gamma_n) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_i}\right)}} \quad (1.2)$$

де R_i - номінальне значення i -го резистора; n - число резисторів у групі (мікросхемі). Для усіх резисторів γ_n приймають однаковим. За найменшим для кожній групи R_{optn} вибирають матеріал із R_0 , найближчим до R_{optn} .

Вибираючи матеріал визначають значення опорів квадрата резистивної плівки R_0 , максимального допустимому кінтовому потужності розсіювання резистивної смужки P_0 , $T\alpha_R$, коефіцієнт старіння χ_{st} , та інші технічні характеристики плівки (табл. Д.1.1).

Матеріали контактних плішчок і провідників повинні мати мале значення R_0 високу електропровідність S_d між резистивною і контактною плівками, бути хімічно інертними, стабільними і мати хорошу адгезію до підложки.

У тонкоплівкових мікросхемах для виконання перерахованих вимог застосовують двош- і трьохшарові плівки (табл. Д.2.2). Вибір комбінації матеріалів підшару, шару і захисного шару залежить від використовуваного матеріалу резистивної плівки (табл. Д.1.1). У товстоплівкових мікросхемах перераховані вимоги до матеріалів контактних плішчок задовольняють складом провідникових паст.

1.3. Вибір методів нанесення шарів і формотворення

Вибір технологічного процесу нанесення плівок і методу формування малюнка пов'язані із матеріалами резистивної смужки і контактних плішчок і визначає відносну виробничу похибку $\chi_{в}$ номінального значення резистора. До $\chi_{в}$ входять три основні складові:

- відносна похибка R_0 ($\chi_{R_0} = \Delta R / R$) яка визначається властивостями матеріалу, методом нанесення шару і контактних умов виробництва. Оскільки число виробничих чинників, що впливають на значення R_0 велике, то розподіл похибки описується нормальним законом з абсолютним середнім квадратичним відхиленням $\sigma_{R_0} = \Delta R / 3$. Значення χ_{R_0} знаходиться в межах $\pm 0,02$ для середніх і $\pm 0,05$ для нижніх і верхніх значень R_0 ;

- відносна похибка формування розмірів резистора (відносна похибка коефіцієнта форми) $\chi_{\phi} = \Delta b / b + \Delta l / l$. Граничні відхилення ширини Δb і довжини Δl резистивної смужки, а також мінімальні розміри b_{min} і l_{min} визначаються вибраним методом формування малюнка (табл. Д.1.3). Абсолютні середньоквадратичні відхилення $\sigma_b = \Delta b / 3$, $\sigma_l = \Delta l / 3$;

- відносна похибка резистора за рахунок опорів контактних переходів R_k ($\chi_{R_k} = 2R_k / R$). У залежності від умов нанесення наступних, після резистивного, шарів, питома електропровідність контактного переходу S_d буде різною. За умов переходу до нанесення наступних шарів в умовах глибокого вакууму $G_d = (5 \dots 10) \text{ Ом}^2 \cdot \text{см}^{-2}$, а при впаїні на плівку, осаджену першою, атмосферних умов $S_d = (0,1 \dots 0,5) \text{ Ом}^2 \cdot \text{см}^{-2}$. Розподіл R_k характеризується двома першими моментами: математичним чеканням m_k і середнім квадратичним відхиленням σ_{R_k} . Розрахунки контактних переходів виконують таким чином, щоб $\chi_{R_k} = (0,01 \dots 0,03)$. Відносна виробничая похибка для розрахунку резисторів методом повної взаємозамінності

$$\chi_{в} = \chi_{R_0} + \chi_{\phi} + \chi_{R_k} \quad (1.3)$$

а дисперсія виробничої похибки для ймовірного методу розрахунку

$$\overline{\sigma_{Rn}^2} = \overline{\sigma_{R0}^2} + \overline{\sigma_{K0}^2} + \overline{\sigma_{R1}^2}, \quad (1.4)$$

де $\overline{\sigma_{K0}^2}$, $\overline{\sigma_{R0}^2} = \overline{\sigma_I^2} + \overline{\sigma_R^2}$, $\overline{\sigma_{Kk}^2}$ - дисперсії похибок відповідних параметрів резисторів значення яких розраховують за відповідними формулами:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_{K0}} &= \frac{Y_{K0}}{3}, \quad \overline{\sigma_{K\phi}} = \frac{Y_{K\phi}}{3}, \quad \overline{\sigma_{Rk}} = \frac{Y_{Rk}}{3}, \\ \overline{\sigma_I} &= \frac{\sigma_I}{I}, \quad \overline{\sigma_S} = \frac{\sigma_S}{S}, \quad \overline{\sigma_{Rk}} = \frac{\sigma_{Rk}}{R}. \end{aligned}$$

У процесі експлуатації мікроелементами на параметри елементів впливають виробничі умови. Тому у рівняння точності опору резистора до відносних виробничих похибок додають відносні експлуатаційні похибки за рахунок зміни властивостей матеріалів під дією температури Y_{KT} і старіння Y_{KT} . Тому, досягнувши відносну похибку резисторів $Y_{\text{вд}}$ або дисперсію похибки $\overline{\sigma_{R1}^2}$ визначають за формулами:

$$Y_{\text{вд}} = Y_{\text{в0}} + Y_{\text{в}\phi} + Y_{\text{вT}} + Y_{\text{вCT}}, \quad (1.5)$$

$$\overline{\sigma_{R1}^2} = \overline{\sigma_{R0}^2} + \overline{\sigma_{K\phi}^2} + \overline{\sigma_{KT}^2} + \overline{\sigma_{KCT}^2}, \quad (1.6)$$

де $\overline{\sigma_{R1}^2} = \frac{Y_{R1}}{3}$, $\overline{\sigma_{KCT}^2} = \frac{Y_{KCT}}{3}$ - відносні середньоквадратичні відхилення опору резистора R під дією температури і старіння для знакозмінної зміни властивостей матеріалу резистивної смужки. Для матеріалів з односторонньою зміною властивостей, розподіл похибок R в процесі експлуатації характеризується математичними чкканнями m_{KT} , m_{KCT} і σ_{KT} , σ_{KCT} .

Якщо відносна похибка значення опору резистора із схемотехнічного розрахунку $Y_{\text{в0}} > Y_{\text{вд}}$ то в умовах виробництва можна одержати резистори заданої точності без підстроювання і підгонки.

Відносну похибку коефіцієнта форми для розрахунку методом повної взаємозамінності або дисперсію похибки коефіцієнта форми для розрахунку ймовірносним методом визначають за формулами:

$$Y_{K\phi} = Y_{R1} - Y_{R0} - Y_{KT} - Y_{KCT}; \quad (1.7)$$

$$\overline{\sigma_{K\phi}^2} = \overline{\sigma_{R1}^2} - \overline{\sigma_{R0}^2} - \overline{\sigma_{KT}^2} - \overline{\sigma_{KCT}^2}, \quad (1.8)$$

$$\text{де } \overline{\sigma_{R1}^2} = \frac{Y_{R1} - \sum_{i=1}^n m_{Ri}}{3},$$

а $\sum_{i=1}^n m_{Ri}$ - алгебраїчна сума відносних систематичних похибок:

$$m_{Ri} = \frac{m_{Ri}}{R_i}; \quad m_{K1} = \frac{m_{K1}}{R_i}; \quad m_{K2} = \frac{m_{K2}}{R_i}.$$

Вибір методів нанесення шарів і формотворення є не тільки технічною, але й економічною проблемою, що визначає вартість технологічного устаткування і його продуктивність (див. табл. Д.1.3).

Стосовно до конкретних виробничих умов конструктори мікроелементами частіше обмежені у свободі вибору як матеріалів, так і методів нанесення шарів і методів формотворення. Усі необхідні характеристики матеріалів і процесів можуть бути задані у вигляді даних. У цьому випадку $R_{\text{доп}}$ визначають за формулою

$$R_{\text{доп}} \approx \sqrt{\frac{b_{\text{мін}}}{(b_{\text{мін}} + 2I)}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}\right)^2}}. \quad (1.9)$$

1.4. Розрахунки резисторів

Розрахунки резисторів спочатку виконують за припущення, що вони мають прямокутну форму (рис. 1.1, а, д) у такій послідовності:

- 1) визначають коефіцієнти форми резисторів $K_{\phi} = R_1/R_0$;
- 2) визначають ширину резисторів $b_1 \geq \max(b_{\text{мін}}, b_{R1}, b_{\text{товп}})$, $K_{\phi} > 1$ (1.10) або довжину резисторів

$$l_i \geq \max(l_{min}, l_{pi}, l_{con}, l_i), K_{\phi} < 1 \quad (1.11)$$

де b_{min} , l_{min} мінімальні допустимі ширини і довжина резисторів. Для методу вільної маски і сумішеного рекомендується вибирати: $b_{min} = 100$ мкм, $l_{min} = 300$ мкм, для контактної фотолітографії $b_{min} = l_{min} = 100$ мкм; для сіткової графії - $b_{min} = l_{min} = 0,8$ мм. Граничні похибки розмірів b_{min} і l_{min} наведені в табл. Д.1.3; b_{pi} , l_{pi} - ширини або довжини резистора, визначені за критерієм мінімальної площі, необхідної для розсіювання потужності P_{pi} :

$$b_{pi} = \sqrt{\frac{P_{pi}}{P_0 K_{\phi}}}, K_{\phi} > 1, \quad (1.12)$$

$$l_{pi} = \sqrt{\frac{P_{pi} K_{\phi}}{P_0}}, K_{\phi} < 1, \quad (1.13)$$

вочинь, l_{con} - ширина і довжина резистора, відповідно, визначені за критерієм необхідної точності. Для розрахунку методом повної взаємозамінності:

$$b_{con, l} = \frac{\Delta b \left(1 + \frac{1}{K_{\phi}} \right)}{\gamma_{K_{\phi}}}, K_{\phi} > 1 \quad (1.14)$$

$$l_{con, l} = \frac{\Delta l (1 + K_{\phi})}{\gamma_{K_{\phi}}}, K_{\phi} < 1. \quad (1.15)$$

Для розрахунків вмовірнісним методом:

$$b_{con, l} = \sigma_b \sqrt{(1 + 1/K_{\phi}) / \sigma_{K_{\phi}}^2}, K_{\phi} > 1, \quad (1.16)$$

$$l_{con, l} = \sigma_l \sqrt{(1 + K_{\phi}) / \sigma_{K_{\phi}}^2}, K_{\phi} < 1. \quad (1.17)$$

Із двох отриманих значень b_i або l_i , визначених за точністю і за допустимією потужністю розсіювання, вибирають більше з урахуванням технологічних обмежень. Ширину (довжину) резистора округляють убік збільшення до найближчого значення,

кратного кроку координатної сітки з урахуванням масштабу фотографіала. Число значимих цифр повинно бути мінімальним.

Визначають довжину кожного резистора

$$l_i = K_{\phi} b_i, K_{\phi} > 1, \quad (1.18)$$

або ширину кожного резистора

$$b_i = l_i / K_{\phi}, K_{\phi} < 1 \quad (1.19)$$

з наступним округленням розмірів до найближчої величини, кратної кроку координатної сітки. Необхідно оцінити похибку, отриману в зв'язку з останнім округленням.

Якщо похибка сумарна зі складовими у формулах (1.5), (1.6) необхідно збільшити ширину (довжину) резистора до одержання достатнього запасу за точністю, що компенсує похибку округлення.

1.5. Визначення конфігурації резисторів

Для резисторів із $K_{\phi} \leq 10$ зберігається найпростіша прямокутна форма, для резисторів із $K_{\phi} > 10$ необхідно надавати резисторам конфігурації, зображених на рис. 1.1, б, в, г. Резистори (рис. 1.1, в, г) можна виконати використовуючи контактну маску фотолітографію або сітчасту вільну маску, а резистори (рис. 1.1, б) - крім перерахованих методів додатково за допомогою вільної маски. Порядок конструювання резисторів складної форми повинен бути наступним:

- 1) вибирають конфігурацію резистора і число N ланок. За жорстких вимог до частотної характеристики резистора N вибирають великим. Якщо ж вагомими стають вимоги до площі, то вибирають форму з малим N . Сумарне значення середніх довжин ланок дорівнює розрахунковому значенню l_i а за однакових довжин ланок - $l_i = l_i / N$. Необхідно дотримуватися правила - напрямки струмів на вході і виході резистора повинні геометрично співпадати;

- 2) уточнюють довжину кожного резистора $l_{con, l}$ й остаточно визначають усі розміри ланок.

Для резисторів із послідовним з'єднанням резистивних смужок (рис. 1.1.6) загальний опір резистора буде збільшуватися за рахунок опору $2N$ контактних переходів, рівного $\Delta R = 2NR_k$

Сумарну довжину резистивних смужок необхідно зменшити в порівнянні з початковим розрахунковим значенням l_0 :

$$l_{\text{рез}} = l_0 (1 - 2NR_k / R_0) \quad (1.20)$$

Для резисторів типу мезандр (рис. 1.1.в) на кожному повороті "губитися" через перерозподіл ліній струму опір $0,45R_0$. Це призводить до зменшення загального опору резистора на $\Delta R = 2N \cdot 0,45R_0 = 0,9N \cdot R_0$. Сумарну довжину середньої лінії резистивної смужки необхідно збільшити на $\Delta l_1 = 0,9N \cdot b_1$

$$l_{\text{рез}} = l_0 + 0,9N \cdot b_1 \quad (1.21)$$

У площу резистора типу мезандр, визначають за формулою:

$$S_{\text{рез}} = l_{\text{рез}} \cdot (b_1 + a_1) \quad (1.22)$$

де a_1 - відстань між двома резистивними смужками.

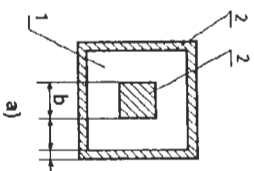
Конфігурація й основні розміри ланки резистора типу мезандр зображені на рис. 1.1.е. Якщо разом із високочастотними резисторами необхідно виготовити низкочасті, доцільно для останніх вибрати конфігурацію, зображену на рис. 1.2,а (між контактними площадками 2 розташована резистивна смужка 1). Такі резистори мають малий коефіцієнт форми.

За заданими значеннями R_0 і R_0 за номограмою (рис. 1.2,б) визначають коефіцієнт форми резистора $n_{\Phi} = l/b_1$. Ширяну внутрішньої контактної площадки визначають відповідно зі співвідношення (1.1.10), використовуючи формули:

$$b_{\text{рез}} = \frac{1}{4} \sqrt{P_{\text{рез}} R_0 / P_0 R_0}, \quad n_{\Phi} > 1; \quad (1.23)$$

$$b_{\text{внут}} = \Delta b (1 + 1/n_{\Phi}) / \gamma_{\text{кон}} (1/2n_{\Phi} - 1) \ln(1 - 2/n_{\Phi}); \quad (1.24)$$

$$b_{\text{внут}} = \sigma_{\text{к}} (1 + 1/n_{\Phi}) / \sigma_{\text{ск}} (1/2n_{\Phi} + 1) \ln(1 - 2/n_{\Phi}). \quad (1.25)$$



- 1-10: 2-50; 3-100;
- 4-500; 5-100; 6-200
- 7-3000; 8-5000;
- 9-10000; 10-20000 Ом/□

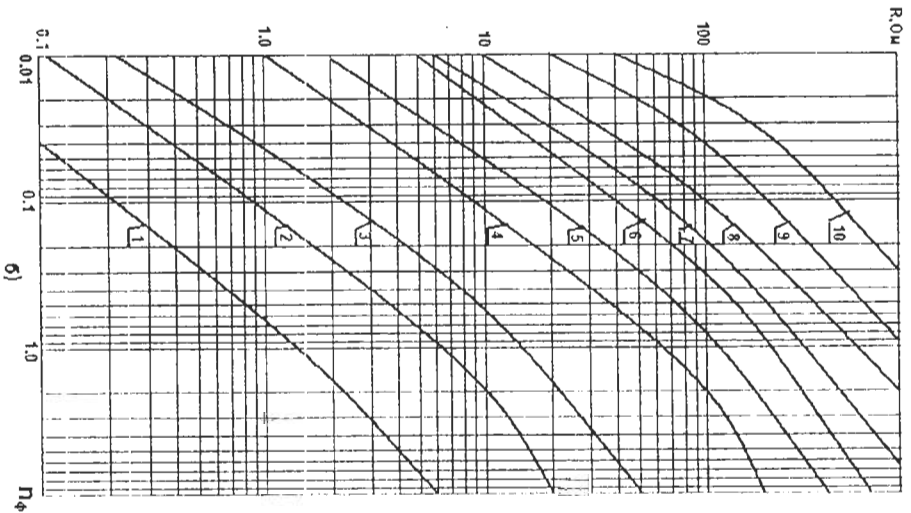


Рис. 1.2

Якщо $n_{\text{вн}} < 1$, $n_{\text{вн}} \text{ внн}$ розраховують за формулами, подібними (1.15, 1.17), з урахуванням коефіцієнта $1/(1+1/2n_{\text{вн}})$.

Довжина резистора $l_j = b_j \cdot n_{\text{вн}}$ повинна задовольняти умові $l_j \geq l_{\text{мін}}$ в залежності від методу формування металюнка.

1.6. Розрахунок підстроюваних гніткових резисторів

Підстроюваний резистор (рис. 1.3) представляє собою суму загальних виготовлених і певним чином з'єднаних секцій резистивної смужки. Процес підстроювання полягає у виключенні із схеми або нахиланні в схему окремих підстроюваних секцій резистора. Підстроювання дозволяє одержати номінальне значення опору резистора з відносною похибкою на момент виготовлення $\pm(1-2)\%$, а в технічно випрацьованих випадках - $\pm 0,5\%$.

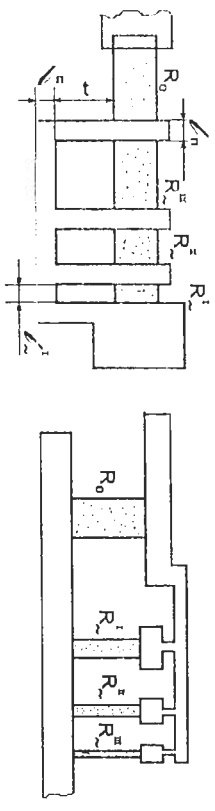


Рис. 1.3

Для розрахунку підстроюваних резисторів повинні бути задані: R_0 , $\gamma_{\text{вн}}$, $R_{\text{вн}}$ та інші параметри. Матеріали і методи нанесення шарів і формування вибирають відповідно до методик, викладених в параграфах 1.2 і 1.3.

Якщо досяжна відносна похибка $\gamma_{\text{вн}} > \gamma_{\text{вн}}$ то в умовах даного виробництва можливо одержати резистори тільки з елементами підстроювання або підгонки.

1.6.1. Підстроювання високоомного резистора

Високоомні резистори підстроюють послідовним приєднанням до основної частини резистора $R_{\text{осн}}$ (рис. 1.3 а) низкоомних підстроюваних резисторів (секцій). Підстроювання здійснюють перерізанням провідників, що закорочують секції.

Розрахунок проводять у такій послідовності:
 а) визначають номінальне значення опору основної частини резистора

$$R_{\text{осн}} = R_0 (1 + \gamma_{\text{вн}}) / (1 + \gamma_{\text{вн}}); \quad (1.26)$$

б) визначають опір регульованої частини резистора

$$R_{\text{вн}} \geq R_0 (1 - \gamma_{\text{вн}}) / (1 - \gamma_{\text{вн}}) - R_{\text{осн}}; \quad (1.27)$$

в) визначають номінальне значення опору першої секції

$$R_1^1 = R_0 \cdot 2^{\gamma_{\text{вн}}} / (1 + \gamma_{\text{вн}}); \quad (1.28)$$

г) опір кожної наступної секції подвоюється в порівнянні з попередньою

$$R_j^1 = R_1^1 \cdot 2^{j-1}, \quad (1.29)$$

де j - номер секції.

Якщо $R_j^1 < R_0$, вибирають R_j^1 таким чином, щоб виконувалося співвідношення,

$$R_j^1 : R_0 = 1 : 2^j, \text{ де } n - \text{натуральне число.}$$

Число секцій збільшують доти, доки сума їх опорів перевищить $R_{\text{вн}}$, після чого опір останньої секції треба зменшити, щоб

$$R_{\text{вн}} = \sum_{j=1}^n R_j^1; \quad (1.30)$$

д) розраховують розміри кожної секції як окремого резистора за методами, викладеними в параграфі 1.4. З конструктивних міркувань ширину підстроюваних секцій резистора вибирають рівній ширині резистора основної частини. У деяких випадках доцільно задати довжиною першої секції $l_1^1 \geq l_{\text{мін}}$ для вибраного методу формування металюнка. Визначають $b_1^1 = R_0 \cdot l_1^1 / R_1^1$. Якщо $b_1^1 \leq b_{\text{мін}}$, то за ширину секції приймають значення $b_{\text{мін}}$ і знаходять нове значення $l_1^1 = b_1^1 \cdot R_1^1 / R_0$;

с) вибирають ширину з'єднувальних провідників $l_i \geq b_{\text{min}}$; визначають ширину контактної прошинки $l_{\text{сн}} = l_i + 2l_i$, де l_i - довжина контактного переходу i ($i = (2...4)$), (рис. 1.3.а).

Високочомні резистори, що підстроюють шуптувцями окремих секцій, розраховують, подібно, але вони не технологічні.

1.5.2. Підстроювання низькоомного резистора

Низькоомні резистори підстроюють паралельним приєднанням до основної частини резистора R_0 n високочомних підстроювальних резисторів (рис. 1.3.б). Розрахунок проводять у такій послідовності:

а) визначають номінальне значення опорного резистора

$$R_{\text{конт}} = R_0 (1 - \gamma_{\text{сн}}) / (1 - \gamma_{\text{сн}}^n); \quad (1.31)$$

б) визначають номінальне значення опорного резистора $R_{\text{сн}}$

$$R_{\text{сн}}^n = R_0 (1 + \gamma_{\text{сн}}) / (2\gamma_{\text{сн}} (1 - \gamma_{\text{сн}}^n)); \quad (1.32)$$

в) опір кожної попередньої секції зменшується у 2 раз у порівнянні з наступною

$$R_{\text{сн}}^i = R_{\text{сн}}^n / 2^{n-i}, \quad (1.33)$$

де n - число секцій підстроювання.

Число секцій N підбирають таким, щоб загальний опір підстроюваного резистора дорівнював

$$R_{\text{сн}}^N \leq R_0 (1 + \gamma_{\text{сн}}) / (1 + \gamma_{\text{сн}}^N) \quad (1.34)$$

Для резисторів із трьома подстроювальними секціями можна забезпечити відносну похибку опору резистора після підстроювання (1-10)% за допустимої відносної похибки (4-40)%. Підстроювання здійснюється перфранням провідників.

1.7. Особливості розрахунків товстоплівкових резисторів

Вихідні дані для розрахунків товстоплівкових резисторів такі ж, як для розрахунків тонкоплівкових. Рекомендовані мінімальні розміри резистора $b_{\text{мін}} = l_{\text{мін}} = 0.8$ мм.

Товстоплівкові резистори проектують з урахуванням підгонки. Розрахункове значення опорного резистора визначають за формулою:

$$R_{\text{пл}} = R_0 / (1 + \gamma_{\text{сн}}^n), \quad (1.35)$$

а ширину (довжину)

$$b_{\text{пл}} = \sqrt{K_{\text{пл}} P_{\text{кв}} / P_0 K_{\text{сн}}}, \quad K_{\text{сн}} > 1, \quad (1.36)$$

$$l_{\text{пл}} = \sqrt{K_{\text{пл}} P_{\text{кв}} K_{\text{сн}} / P_0}, \quad K_{\text{сн}} < 1, \quad (1.37)$$

де $K_{\text{пл}}$ - коефіцієнт запасу потужності, що враховує підгонку резистора:

$$K_{\text{пл}} = 2\gamma_{\text{конт}} + 1. \quad (1.38)$$

Товстоплівкові резистори доцільно конструювати найпростішої форми з коефіцієнтом форми $0.1 \leq K_{\text{сн}} \leq 10$. За довжину і ширину резистора приймають значення, найближчі до розрахункового з урахуванням опору R_0 .

1.8. Розрахунок контактних переходів резистивної смужки - контактна площинка

Опір контактних переходів залежить від опору в місці контакту резистивної і провідникової плівок, а також питомої електропровідності перехідного шару між плівками $\sigma_{\text{сн}}$. Електропровідність перехідного шару змінюється від (5...10) Ом⁻¹мм² за швидкого переходу від осаджування одного шару до осаджування іншого в умовах глибокого вакууму до (0.1...0.5) Ом⁻¹мм² за дії на плівку, осаджену першою, атмосферних умов.

Розрахунок проводять у такій послідовності:

а) визначають граничне значення опорного контактного переходу

$$R_{кл} = \sqrt{R_0 / G_1} / b, \quad (1.39)$$

і розрахувать відношену похибку контактноту переходу

$$\gamma_{кл} = 2R_{кл} / R_1. \quad (1.40)$$

Якщо отримане значення $\gamma_{кл} > (0,01 - 0,03)$, то необхідно змінити форму резистора або контактноту переходу:

б) визначать мінімальну допустиме значення довжини контактноту переходу

$$l_{\text{д.пер}} \geq 1,52 / \sqrt{R_0 G_1}, \quad (1.41)$$

в) вибравать l_c з урахуванням похибок формування розмірів, похибок суміщення і конструктивних обмежень

$$l_c \geq l_{\text{д.пер}} + 2\Delta l_{\text{суміщ}} + 2\Delta b. \quad (1.42)$$

Для фотолитографії $l_c = 0,1$ мм, а для вильної маски $l_c = 0,2$ мм;

Гвінбравать розміри напущу між краєм резистивної і краєм провідної півки (рис. 1.1.а):

$$l' \geq 2\Delta l_{\text{суміщ}} + \Delta b. \quad (1.43)$$

1.9. Задачі

1.9.1. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри півково резистора, виконаноту з ніхрома, із номінальним значенням опору 7,5 кОм. Розсіювана потужність 15 мВт, відносна похибка на момент виготовлення не перевищує 0,1. Метод формування малюнка - фотолитографія. Відносна похибка за рахунок опору контактноту переходів $\gamma_{кл} = 0,03$.

1.9.2. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри півково резистора, котрото виготовляють зі сплаву РС-3710. Номінальне значення опору резистора 24 кОм, відносна похибка на момент виготовлення не перевищує 0,1, розсіювана потужність 15 мВт. Нанесення резистивної і провідної півки виконують в різних камерах. Малюнок формують суміщенням методом. Запропоновувати зміни конструкції переходу, які б дозволили зменшити опір $R_{к\text{у}}$ 2 рази.

1.9.3. Розробити конструкцію і розрахувати розміри контактноту переходу резистивна смужка (кермет К-50С) - контактна площинка. Опір контактноту переходу $R_{к\text{к}} \leq 50$ Ом, ширина резистивної смужки $b = 0,5$ мм, спектральноїдність контактноту переходу $G_1 = 0,5$ Ом¹ мм². Малюнок формується суміщенням методом.

1.9.4. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри тонкопівково резистора з номінальним значенням опору 5,6 кОм і середнім квадратичним відхиленням на момент виготовлення $G_{\text{в}} = 100$ Ом. Матеріал резистивної смужки - сплав МЛТ-3М. Розсіювана потужність 10 мВт. Малюнок формується методом фотолитографії. Розподілення похибок лінійних розмірів, $\Delta R_{кл}$ і $R_{к\text{к}}$ описується нормальним законом: $G_{R_{кл}} = 8$ Ом¹, $m_{R_{к\text{к}}} = 50$ Ом, $G_{R_{к\text{к}}} = 5$ Ом.

1.9.5. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри тонкопівково резистора з опором 20 Ом, розсіюваното потужністю 50 мВт і відносною похибкою на момент виготовлення, що не перевищує $\pm 0,1$.

1.9.6. Розрахувати розміри резистора опором 3,6 ком, виготовленото зі сплаву МЛТ-3М, розсіюваното потужністю 10 мВт і похибкою на момент виготовлення $\pm 0,1$.

1.9.7. Необхідно виготовити з ніхрому, тонкопівковий резистор із номінальним значенням опору 2,1 кОм і відносною похибкою на момент виготовлення $\pm 0,1$ (із ймовірністю 0,997). Похибка відтворення R_0 із ймовірністю 0,997 не перевищує 0,05. Метод формотворення малюнка - вільна маска. Розподілення всіх похибок вважають нормальними. Визначити геометричні розміри резистора, використовуючи ймовірносний метод розрахунок.

1.9.8. Тонкопівковий резистор 3,3 кОм з розсіюваното потужністю 5 мВт необхідно виготовити з кермета К-50С. Розрахувати розміри і розробити конструкцію резистора з урахуванням умов експлуатації. Максимальна температура навколишнього середовища + 85 С. На інтервалі експлуатації 5 тис. годин необхідно забезпечити з ймовірністю 0,997 відношену похибку номінальноту значення опору $\pm 0,1$. Відносна систематична складова опору контактноту переходів $m_{R_{к\text{к}}} = 0,02$, а $\sigma_{R_{к\text{к}}}^2 = 4 \cdot 10^{-4}$.

1.9.9. Визначити розміри і розробити конструкцію півколого резистора 30 Ом із відносною похибкою на момент виготовлення, що не перевищує $\pm 0,1$. Матеріал резистивної смужки - сплав МЛТ - ЗМ. Розсіювана потужність 2 мВт.

1.9.10. Необхідно виготовити з ніхрому тонкоплівковий резистор із номінальним значенням опору 2,7 кОм і відносною похибкою на інтервалі експлуатації 5 тис. годин за максимальної температури $+85^\circ\text{C}$, що не перевищує $\pm 0,1$ (із ймовірністю 0,997). Визначити необхідну точність формування геометричних розмірів резистора і вибрати метод формування малюнка. Відносна систематична складова опору контактних переходів $\overline{m_{жк}} = 0,02$, а $\overline{\sigma_{жк}} = 0$.

1.9.11. Визначити розміри і розробити конструкцію півколого резистора 30 Ом із відносною похибкою на момент виготовлення $\pm 0,1$. Матеріал - пічрам, розсіювана потужність 2 мВт. Резистор повинен мати форму "мандру".

1.9.12. Вибрати матеріал і розрахувати розміри трьох півколових резисторів: $R_1 = 240$ Ом, $R_2 = 10$ мВт, $\gamma_{жк} = 15\%$; $R_2 = 1200$ Ом, $R_3 = 2$ мВт, $\gamma_{жк2} = 10\%$; $R_3 = 6,2$ кОм, $R_4 = 20$ мВт, $\gamma_{жк4} = 20\%$. Всі резистори виготовляють в одному шарі. Малюнок формується методом вільної маски. Вкажіть до точності наведені на момент виготовлення

1.9.13. Розрахувати розмір півколого резистора опором 1 кОм із відносною похибкою на момент виготовлення, що не перевищує $\pm 0,1$, і розсіюваною потужністю 10 мВт. У якості матеріалів резистивної смужки вибрати хром ($R_0 = 50$ Ом/д), МЛТ - ЗМ ($R_0 = 500$ Ом/д) і кермет ($R_0 = 5000$ Ом/д). Похибкою за рахунок контактних переходів $\gamma_{жк}$ можна знехтувати, $\gamma_{ж0} = 0,03$ (для усіх матеріалів). Малюнок формується методом вільної маски. Побудувати залежність площі резисторів від значення R_0 . Пояснити отримані результати. Визначити оптимальний матеріал для виготовлення резистора.

1.9.14. У одному шарі з одного матеріалу виготовляють тонкоплівковий резистор: 270 Ом - 1 шт.; 910 Ом - 1 шт.; 1 кОм - 2 шт.; 1,5 кОм - 2 шт.; 2,7 кОм - 2 шт.; 3,6 кОм - 1 шт.; 4,3 кОм - 3 шт.; 5,1 кОм - 2 шт.; 7,5 кОм - 3 шт.; 10 кОм - 7 шт. Визначити оптимальне значення R_0 резистивної плівки і вибрати необхідний матеріал, якщо відомо, що $\gamma_{ж0} = 0,15$.

1.9.15. Резистори: $R_1 = 2,4$ кОм, $R_2 = 10$ мВт, $R_3 = 4$ кОм, $R_4 = 5$ мВт, $R_5 = 24$ кОм, $R_6 = 10$ мВт виготовляють в одному шарі. Відносна похибка резисторів на момент виготовлення не перевищує $\pm 0,1$. Малюнок формується методом фотолітографії. Розрахувати розміри резисторів, обравши в якості матеріалу шару сплаву МЛТ - ЗМ, сплаву РС - 3710 і Кермет К-

50С. Для всіх матеріалів $\gamma_{ж0} = 0,03$, а $\gamma_{жк} = 0,02$. Побудувати залежність сумарної площі всіх резисторів від значення R_0 матеріалу шару.

1.9.16. Розрахувати розміри і розробити конструкцію тонкоплівкового резистора із опором 2,4 кОм, що виготовляють із ніхрому. На інтервалі експлуатації 5 тис. годин за температури $+100^\circ\text{C}$ відносна похибка з ймовірністю 0,997 не перевищує $\pm 0,1$. Відносна похибка $\gamma_{ж0} = 0,03$ (із ймовірністю 0,997). Розподіл усіх похибок залежить нормальним.

1.9.17. В одному топологічному шарі виготовляють три резистори зі сплаву МЛТ - ЗМ: $R_1 = 2,2$ кОм, $R_2 = 10$ мВт, $R_3 = 2,2$ кОм, $R_4 = 5$ мВт, $R_5 = 2,2$ кОм, $R_6 = 5$ мВт. Відносна похибка резисторів на момент виготовлення не перевищує $\pm 0,1$. Метод формування малюнка - фотолітографія. Відносна похибка $\gamma_{жк} = 0,04$ і $\gamma_{ж0} = 0,03$ однакові для всіх резисторів. Побудувати залежність розмірів резисторів від сумарної площі всіх резисторів. Яким чином зменшувати розміри резисторів, якщо відомо, що похибка на момент виготовлення становить $\pm 0,1$?

1.9.18. Розробити конструкцію і визначити розміри півколого резистора 300 Ом, що виготовляють зі сплаву МЛТ - ЗМ. Розсіювана потужність 12 мВт. На інтервалі експлуатації 10 тис. годин за температури $+100^\circ\text{C}$ відносна похибка з ймовірністю 0,997 не перевищує $\pm 0,1$.

1.9.19. В одному топологічному шарі разом з високочастотним резистором виготовляють низькочастотний - 10 Ом. Розсіювана потужність 50 мВт. У якості матеріалу резистивної смужки використовують сплав МЛТ - ЗМ із $R_0 = 500$. Відносна похибка на момент виготовлення не повинна перевищувати $\pm 0,1$. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри резистора.

1.9.20. Розрахувати розміри і розробити конструкцію резистора з підстроюваним опором 4 кОм і похибкою на момент виготовлення, що не перевищує $\pm 0,03$. Відносна похибка $\gamma_{ж0}$ не перевищує $\pm 0,04$, опір контактних переходів може змінюватися в межах від 5 до 40 Ом. Матеріал - пічрам. Розсіювана потужність 20 мВт. Розміри формуються вільно маскою.

1.9.21. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри резистора 100 Ом із відносною похибкою на момент виготовлення $\pm 0,04$ і розсіюваною потужністю 50 мВт. Резистивний і провідний шари наносять послідовно в одному технологічному циклі без порушення вакууму. Матеріал - хром. Метод формування малюнка - фотолітографія.

1.9.22. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри тонкоплівкового резистора опором 20 Ом і відносною похибкою на інтервалі експлуатації 5 тис. годин за температури $+85^{\circ}\text{C}$, що не перевищує $\pm 0,1$. Малюнок формується вільною маскою.

1.9.23. Вибрати матеріал і розрахувати розміри трьох плівкових резисторів, що виготовляють в одному шарі: $R_1 = 470\ \text{Ом}$, $R_2 = 1,2\ \text{кОм}$, $R_3 = 1\ \text{МВт}$; $R_3 = 8,2\ \text{кОм}$, $R_3 = 20\ \text{МВт}$. Відносна похибка резисторів на інтервалі 5 тис. годин за температури $+100^{\circ}\text{C}$ не перевищує 0,15. Малюнок формується методом фотолітографії.

1.9.24. Вибрати матеріал, конструкцію і розрахувати розміри трьох плівкових резисторів, що виготовляють в одному шарі: $R_1 = 470\ \text{Ом}$, $R_1 = 1\ \text{МВт}$, $R_2 = 2,7\ \text{кОм}$, $R_2 = 5\ \text{МВт}$; $R_3 = 12\ \text{кОм}$, $R_3 = 10\ \text{МВт}$. Відносна похибка кожного із резисторів на момент виготовлення з ймовірністю 0,997 не повинна перевищувати $\pm 0,1$. Відносна похибка за рахунок невідтвореності R_0 має нормальне розподілення з $\bar{m}_{R_0} = 0$ і $\bar{\sigma}_{R_0} = 0,02$, а похибка за рахунок опору контактних перекладів також має нормальне розподілення з $\bar{m}_{R_k} = 0,01$ і $\bar{\sigma}_{R_k} = 0,01$. Метод формотворення вільна маска.

1.9.25. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри тонкоплівкового резистора 10 Ом із відносною похибкою на момент виготовлення $\pm 0,05$ (із ймовірністю 0,997). Рознована похибка 20 мВт. Відносна похибка за рахунок невідтвореності R_0 має нормальний розподіл з $\bar{m}_{R_0} = 0$ і $\bar{\sigma}_{R_0} = 0,02$. Матеріал - хром. Малюнок формується методом фотолітографії.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУВАННЯ ПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ

2.1. Плівкові конденсатори

Плівкові конденсатори мають, здебільшого, трьохшарову структуру (рис. 2.1.а), що складається з двох провідникових плівок (обкладінок), розділених діелектричною плівкою.

Такі конденсатори конструюють для створення ємності від 20 до 5000 пФ. Конденсатори меншої ємності конструюють у вигляді гребінчастої структури (рис. 2.1.д) з одностороннім розміщенням обкладінок; ємність у таких конденсаторів утворюється через

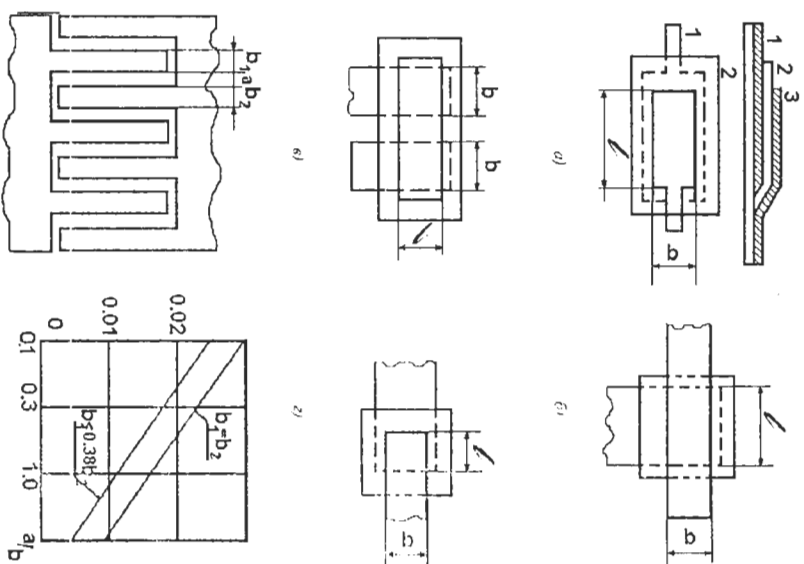


Рис. 2.1

діелектрик підложки і захисного покриття. Конденсатори ємністю більше 5000 пФ можуть створюватися як багатопшарові, послідовним нанесенням провідників і діелектричних шарів із заданим числом більше 3. Проте збільшення числа шарів призводить до збільшення складності технологічного процесу, збільшення браку і зменшення надійності. Тому в якості ємнісних елементів із ємністю більше 5000 пФ переважно використовують мініатюрні навісні конденсатори (компоненти).

Для конструкції конденсатора визначається номінальним значенням ємності, точністю, достовірними матеріалами, робочою частотою, отводимою на платі площею й іншими параметрами.

Ємність плоского конденсатора визначають за формулою

$$C = \epsilon \epsilon_0 S_0 / d + C_0 P = C_0 S_0 + C_0 P, \quad (2.1)$$

де ϵ - відносна діелектрична проникність діелектрика; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; S_0 - площа перекриття обкладок; d - товщина діелектрика; C_0 - питома погонна ємність за рахунок крайового ефекту; P - довжина периметра перекриття обкладок.

За даної площі перекриття обкладок конденсатора крайовим ефектом можна нехтувати і вважати, що $C_0 = C_0 S_0$. Крайовий ефект необхідно враховувати за $S_0 < 5 \text{ мм}^2$. Питома ємність діелектричного шару

$$C_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \epsilon / d, \quad (2.2)$$

Ємність пробічного конденсатора

$$C = \beta \epsilon \epsilon_0 L, \quad (2.3)$$

де β - коефіцієнт, що залежить від ширини півквових провідників і відстані між ними; $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2$ - розрахункове значення діелектричної проникності; ϵ_1, ϵ_2 - діелектричні проникності навколишнього середовища і підложки; L - довжина спільної межі провідників. Температурний коефіцієнт ємності (ТКЕ) з урахуванням того, що лінійне розширення обкладок і діелектрика діюю визначається коефіцієнтом лінійного розширення матеріалу підложки, розраховується за формулою

$$\alpha_c = 2\alpha_0 + \alpha_1 - \alpha_2, \quad (2.4)$$

де α_0 - ТКП матеріалу підложки (по відношенню α_0 незначиться зміною як і тан і β); α_1, α_2 - ТК діелектричної проникності матеріалу діелектрика; α_0 - ТКП матеріалу діелектрика (при розширенні діелектрика ємність зменшується).

Добротність Q конденсатора, або обернену її величину $1/Q$, визначають утратами в матеріалі діелектрика $1/g\delta_d$ і втратами в металевих елементах конденсатора

$$1/g\delta_d = 1/g\delta_d + \omega C U_{\text{eff}}^2, \quad (2.5)$$

$$r_{\text{сум}} = r_{\text{сум}} + r_{\text{д}}, \quad (2.6)$$

де $r_{\text{сум}}$ - еквівалентний опір утрат переміною струмом; $r_{\text{сум}}$ - еквівалентний опір обкладок; $r_{\text{д}}$ - опір виводів.

За умов розміщення виводів з протилежних сторін конденсатора

$$r_{\text{сум}} = 0,67 R + r_{\text{д}}, \quad (2.7)$$

де $R = R_1 / b$ - опір однієї обкладки конденсатора на постійному струмі.

Тангенс кута діелектричних утрат нелінійно залежить від частоти, втрачати в діелектричній плівці і, практично, не залежить від розмірів і конфігурації обкладок конденсаторів. При конструюванні конденсаторів, що працюють на частотах вище 10 мГц, рекомендується обкладки робити протилежними з виводами, розташованими з протилежних сторінок, і вибирати ширину виводів рівною зовнішній обкладці. Для попереднього розрахунку добротності за $C_0 = (30-100) \text{ пФ/мм}^2$ і $R = 0,1 \text{ Ом/мм}^2$ можна скористатися формулою

$$Q = 1,2 \cdot 10^8 / f C, \quad (2.8)$$

де f - робоча частота, МГц; C - ємність конденсатора, пФ.

Для розрахунків конденсаторів повинні бути дані зі складових частин розрахунку: ємність конденсатора C ; відносна похибка номінального значення γ_c ; максимальна робоча напруга конденсатора $U_{\text{д}}$; робоча частота f ; тангенс кута діелектричних утрат $1/g\delta_d$ або добротність Q ; умови експлуатації (довговічність t_0 , робоча температура T і інші вимоги й обмеження, сформульовані в ТЗ).

Розрахунки і конструювання конденсаторів проводяться в такій послідовності: вибір матеріалів діелектрика і провідникових обкладок; вибір методів нанесення шарів і формотворення; розрахунки конденсаторів; вибір форми конденсаторів і остаточне визначення розмірів конструкції.

2.2. Вибір матеріалів конденсаторів

Матеріали діелектричних плівок повинні мати хороші ізоляційні властивості, високу діелектричну проникливість ϵ , малий $\epsilon_0 \delta$, високу електричну міцність E_{gr} , достатню хімічну стійкість. ТКСДР матеріалу діелектрика повинен бути близьким до ТКСДР підложки (для усунення напруг і мікродісперсії), високу відносну часову γ_{ct} і температурну γ_{ctT} стабільність. Матеріал діелектрика вибирають з урахуванням вартості і дефіцитності, сумісності технології нанесення діелектричного шару з технологією нанесення провідникових обкладінок. Матеріали діелектричних плівок і їхні електрофізичні характеристики наведені в табл. Д.2.1.

Вибір матеріалу діелектрика зводиться до визначення власне матеріалу і вибору значення ϵ_{gr} . На першому етапі проводиться вибір технологічних матеріалів, що відповідають конкретним вимогам добротності, часової і температурної стабільності. Потім із відібраних на першому етапі вибирають матеріал із найбільшим значенням S_{gr} , що необхідно для зменшення розмірів за одночасного задоволення вимог електричної міцності:

$$d_{gr} \geq K U_{gr} / E_{gr} \quad (2.9)$$

де $K = (2 \dots 4)$ - коефіцієнт запору електричної міцності; U_{gr} - робоча напруга конденсатора. В якості діелектриків широко застосовують боросилікатне ($SiO_2-B_2O_3$) і алюмосилікатне ($SiO_2-Al_2O_3$) скло, в котрих шляхом вибору складу компонентів можна плавно й у широких межах змінювати електричні, механічні, теплові й інші характеристики. Проте ці матеріали мають малі значення питомої ємності S_{gr} .

Використання в якості діелектричних плівок оксидів U_2O_3 , Sr_2O_3 і фторидів легких рідкоземельних елементів дозволяє значно збільшити значення S_{gr} . Найбільші значення $S_{gr} = (1000 \dots 2000)$ пФ/м² одержують при анодуванні нанесених катодним розпильником плівок тантала. Проте робочий діапазон частот танталових конденсаторів з причин великого опору нижньої обкладки не перевищує декількох МГц, що обмежує їх застосування у якості фільтруючих або блокуючих конденсаторів у низьочастотних схемах і схемах постійного струму.

Матеріали обкладінок конденсаторів повинні мати високу електропровідність і малу міграційну здатність атомів для запобігання дифузії атомів у діелектрик і можливості короткого замикання обкладінок, малу температуру випаровування (для зменшення енергії при нанесенні на діелектрик і проникненні в нього), хорошу адгезію до підложки і діелектрика, хімічну стійкість. Найповніше цим вимогам відповідає алюміній, який широко

застосовується. Товщина алюмінію приблизно 0,5 мкм, що відповідає $R = 0,05-0,07 \text{ Ом} \cdot \mu$. У конденсаторах із діелектриком із Ta_2O_5 , швидко обкладінок випотовляють із тантала. У якості провідних обкладінок товстоплівкових конденсаторів використовують провідні насти (табл. Д.1.2).

2.3. Вибір методів нанесення шарів і формування

Вибір технологічного процесу нанесення діелектричних плівок і методу формування малянка шарів конденсатора пов'язаний із матеріалами діелектрика й обкладінок (табл. П.2.1). При незалежності операцій формування контуру і нанесення діелектрика, вибір матеріалів і методів визначає відносну виробничу похибку γ_{gr} або відносну дисперсію σ_{gr}^2 номінального значення ємності конденсатора

$$\gamma_{gr} = \gamma_{cv} + \gamma_s \quad (2.10)$$

$$\sigma_{gr}^2 = \sigma_{cv}^2 + \sigma_s^2 \quad (2.11)$$

де $\gamma_{cv} = \Delta C_n / C_n$ - відносна похибка питомої ємності C_n , залежить від ряду технологічних чинників і є характеристикою конкретного технологічного процесу $\gamma_{cv} = \pm(0,03 \dots 0,07)$. Розподіл ΔC_n описується нормальним законом із відносним середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{cv} = \gamma_{cv} / 3$; γ_s - відносна похибка площі перекриття обкладінок конденсатора, залежить від обраного методу формування малянка і конструкції конденсатора. Граничні відхилення M і D_b визначаються обраним методом формування малянка (табл. П.1.3). Розподіл M і D_b описується нормальним законом, а $\sigma_s = \Delta l / 3$ і $\sigma_s = \Delta b / 3$.

У процесі експлуатації мікрохеми ємність плівкового конденсатора змінюється як під дією температури, так і в результаті старіння матеріалів. Відносну похибку ємності конденсатора під дією температури визначають за формулою

$$\gamma_{gr} = \alpha (T_{max} - 20) \quad (2.12)$$

де T_{max} - максимальна робоча температура мікрохеми.

Відносна похибка ємності конденсатора в результаті старіння

$$\gamma_{cst} = \gamma_{cst} b_0 / 10^3, \quad (2.13)$$

де γ_{cst} - коефіцієнт старіння діелектрика за 1000 годин за робочої напруги на конденсаторі; b_0 - термін екстимуляції мікросхеми.

Для матрицілів з однопроваженою змінною властивістю, розподіли похибок ємності під впливом температури й у результаті старіння характерніуються математичними чеканими m_{cst} і σ_{cst} . Для матрицілів із двомазонавою змінною властивістю ємності середньоквадратичні відхилення ємності під дією температури й у результаті старіння для нормального закону розподілення похибок $\overline{\sigma_{cst}} = \gamma_{cst} / 3$, $\overline{\sigma_{cst}} = \gamma_{cst} / 3$.

Допустимі відносно похибок конденсаторів γ_{cst} або дисперсію похибки $\overline{\sigma_{cst}}$ визначають за формулами:

$$\gamma_{cst} = \gamma_{cst} - \gamma_{cst} + \gamma_{cst}; \quad (2.14)$$

$$\overline{\sigma_{cst}} = \overline{\sigma_{cst}} + \overline{\sigma_{cst}} + \overline{\sigma_{cst}}. \quad (2.15)$$

Якщо відносна похибка номінального значення ємності з схемотехнічного розрахунку $\gamma_{cst} > \gamma_{cst}$, то в заданих умовах виробництва можна одержати конденсатори заданої точності без підстроювання і підгонки.

Допустиму відносно похибок γ_{cst} або дисперсію похибки $\overline{\sigma_{cst}}$ площі перекриття обкладінок для розрахунків конденсатора, визначають за формулами:

$$\gamma_{cst} = \gamma_{cst} - \gamma_{cst} - \gamma_{cst}; \quad (2.16)$$

$$\overline{\sigma_{cst}} = \overline{\sigma_{cst}} - \overline{\sigma_{cst}} - \overline{\sigma_{cst}}. \quad (2.17)$$

де $\overline{\sigma_{cst}} = (\gamma_{cst} - \sum_{j=1}^m m_{cst} / 3)$ (для нормального закону); $\sum_{j=1}^m m_{cst}$ - алгебраїчна сума відносних систематичних похибок.

2.4. Розрахунки конденсаторів

За обраної технології і матеріалах конденсатора, тобто, відомому математичному чеканні m_{cst} і відносній похибці γ_{cst} або відносній дисперсії $\overline{\sigma_{cst}}$, конструктор може лише частково змінити γ_{cst} або $\overline{\sigma_{cst}}$, обравши конструкції конденсатора (рис. 2.1, а, б, в, г).

Для конденсатора (рис. 2.1, а), у якого верхня обкладінка розташована в межах нижньої, довжина l і ширина b площі взаємного перекриття обкладінок $S_n = lb$ формується на одній операції формування верхньої обкладінки. Коефіцієнт кореляції $r_{nb} \rightarrow 1$. Тоді можемо записати:

$$\gamma_n^2 = (\gamma_l + \gamma_b)^2; \quad (2.18)$$

$$\overline{\sigma_n^2} = (\overline{\sigma_l^2} + \overline{\sigma_b^2})^2. \quad (2.19)$$

Для конструкції конденсатора у вигляді обкладінок, що перетинаються (рис. 2.4, б) розмір l формується незалежно від розміру b (на різних операціях). Коефіцієнт кореляції між ними прагне до нуля $r_{nb} \rightarrow 0$. Значення відносної похибки площі перекриття обкладінок або дисперсію площі перекриття розраховують за формулами:

$$\gamma_n^2 = \gamma_l^2 + \gamma_b^2; \quad (2.20)$$

$$\overline{\sigma_n^2} = \overline{\sigma_l^2} + \overline{\sigma_b^2}. \quad (2.21)$$

Якщо методи формування обох обкладінок однакові і $\Delta l = \Delta b$, $\sigma_l = \sigma_b$, то співвідношення (2.18) ... (2.21) можна записати:

$$\gamma_n = (l + b) \Delta l / S_n, \quad r_{nb} \rightarrow 1 \quad (2.22)$$

$$\overline{\sigma_n^2} = (l + b) \sigma_l / S_n, \quad r_{nb} \rightarrow 1, \quad (2.23)$$

$$\gamma_n = \sqrt{l^2 + b^2} \Delta l / S_n, \quad r_{nb} \rightarrow 0, \quad (2.24)$$

$$\overline{\sigma_n^2} = \sqrt{l^2 + b^2} \sigma_l / S_n, \quad r_{nb} \rightarrow 0. \quad (2.25)$$

Для конструкції конденсатора із широким виводом верхньої обкладінки (рис. 2.1, г) і за умови, що малюнок верхньої і нижньої обкладінок формується одним методом, а також $\overline{\sigma_l} = \overline{\sigma_b}$, $\gamma_l = \gamma_b = \gamma$,

$$\gamma_n^2 = 2\gamma^2 \sqrt{lw} + 5\gamma^2; \quad (2.26)$$

$$\overline{\sigma_n^2} = 2\overline{\sigma_l^2} \sqrt{lw} + 5\overline{\sigma_l^2}, \quad (2.27)$$

де $\gamma_{\text{суми}} -$ відносна похибка суміщення; $\sigma_{\text{суми}}^2 -$ відносна дисперсія похибки суміщення.

Для конденсатора складного контуру, у якого верхня обкладка розташована в межах нижньої (типу рис. 2.1.а), а всі розміри l_i, h_i формуються на озній операції формотворення верхньої обкладки ($\sigma_l = \sigma_h = \sigma, \Delta l = \Delta h$)

$$\gamma_s = \left(\sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m h_j \right) \Delta l / S_n, \quad r_n \rightarrow 0, \quad (2.28)$$

$$\sigma_s = \left(\sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m h_j \right) \sigma / S_n, \quad r_n \rightarrow 0. \quad (2.29)$$

Якщо конденсатор складного контуру побудований за принципом ортогонального перетинання (типу рис. 2.1.б) обкладок, то усі взаємозалежні розміри l_i формуються незалежно від взаємозалежних розмірів h_j :

$$\gamma_l = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^m h_j \right)^2} \Delta l / S_n, \quad r_n \rightarrow 0, \quad (2.30)$$

$$\sigma_l = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^m h_j \right)^2} \sigma / S_n, \quad r_n \rightarrow 0. \quad (2.31)$$

Відношення сторін площі перекриття обкладок позначають як коефіцієнт форми конденсатора

$$K_{\phi} = l/b. \quad (2.32)$$

Ураховуючи, що площа перекриття обкладок $S_n = lb$ можна записати:

$$l = \sqrt{S_n K_{\phi}}; \quad b = \sqrt{S_n / K_{\phi}}. \quad (2.33)$$

Відносну похибку γ_s або дисперсію похибки σ_s^2 , площі перекриття обкладок із урахуванням конструкції конденсатора визначають за такими формулами:

$$\gamma_s^2 = (\Delta l^2 / S_n) (K_{\phi} + 1)^2 / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 1, \quad (2.34)$$

$$\sigma_s^2 = (\sigma_l^2 / S_n) (K_{\phi} + 1)^2 / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 1. \quad (2.35)$$

$$\gamma_s^2 = (\Delta l^2 / S_n) (K_{\phi}^2 + 1) / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 0, \quad (2.36)$$

$$\sigma_s^2 = (\sigma_l^2 / S_n) (K_{\phi}^2 + 1) / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 0. \quad (2.37)$$

За $K_{\phi} = 1$ для конструкцій конденсаторів (рис. 2.1.а,б) значення γ_s^2 і σ_s^2 будуть мінімальними.

Для забезпечення заданої точності ємності конденсатора допустимі значення $\gamma_{\text{суми}}^2$ (2.16) або $\sigma_{\text{суми}}^2$ (2.17) повинні бути більшими або рівними відповідних розрахункових значень за (2.34...2.37). Отже, площу S_n , необхідну для забезпечення заданої точності конденсаторів, визначають за такими формулами:

$$S_n = (\Delta l^2 / \gamma_{\text{суми}}^2) (K_{\phi} + 1)^2 / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 1, \quad (2.38)$$

$$S_n = (\sigma_l^2 / \sigma_{\text{суми}}^2) (K_{\phi} + 1)^2 / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 1, \quad (2.39)$$

$$S_n = (\Delta l^2 / \gamma_{\text{суми}}^2) (K_{\phi}^2 + 1) / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 0, \quad (2.40)$$

$$S_n = (\sigma_l^2 / \sigma_{\text{суми}}^2) (K_{\phi}^2 + 1) / K_{\phi}, \quad r_n \rightarrow 0. \quad (2.41)$$

Отримані значення S_n мінімальні і використовуються для оцінки максимальної питомої ємності, що забезпечувала б задану точність ємності конденсатора:

$$C_{\text{итогови}} = (C_{\text{суми}}^2 / \Delta l^2) K_{\phi} / (K_{\phi} + 1)^2, \quad r_n \rightarrow 1, \quad (2.42)$$

$$C_{\text{итогови}} = (C_{\text{суми}}^2 / \sigma_l^2) K_{\phi} / (K_{\phi} + 1)^2, \quad r_n \rightarrow 1, \quad (2.43)$$

$$C_{\text{итогови}} = (C_{\text{суми}}^2 / \Delta l^2) K_{\phi} / (K_{\phi}^2 + 1), \quad r_n \rightarrow 0, \quad (2.44)$$

$$C_{\text{итогови}} = (C_{\text{суми}}^2 / \sigma_l^2) K_{\phi} / (K_{\phi}^2 + 1), \quad r_n \rightarrow 0. \quad (2.45)$$

Порядок розрахунків конденсаторів повинен бути наступним:

1. Розрахувують значення питомої ємності (враховуючи як властивості матеріалу діелектричної плівки, так і її товщину) за критеріями електричної стійкості і точності

$$C_0 = \min(C_{0E}, C_{0TGR}), \quad (2.46)$$

де C_{0E} - питома ємність конденсатора, розрахована за критерієм електричної стійкості діелектрика. Реалізують цей пункт у такій послідовності:

Спочатку за формулою (2.9) визначають товщину діелектричної плівки, а потім за формулою (2.2) знаходять значення C_{0E} для i -го конденсатора. Знайдене значення C_{0E} дозволяє попередньо оцінити можливу площу перекриття обкладенок конденсатора $S_{дE} = C_0 / \epsilon_{дE}$ і вибрати необхідну конструкцію конденсатора. Якщо $S_{дE} \geq 10 \text{ м}^2$, доцільно вибрати конструкцію, у котрій (рис. 2.1.д) верхня обкладка розташована в межах нижньої ($r_{дE} \rightarrow 1$). Якщо ж $S_{дE} < 10 \text{ м}^2$, доцільно вибрати конструкцію конденсатора (рис. 2.1.б) у вигляді провідників, що перетинаються ($r_{дE} \rightarrow 0$) або зображену на рис. 2.1.г.

Сигнали - питома ємність конденсатора, розрахована за критерієм необхідної точності. У залежності від конструкції і коефіцієнта кореляції між сторонами площі перекриття конденсатора, для розрахунків C_{0TGR} використовують формули (2.42...2.45). На цьому етапі розрахунків відношення сторін конденсатора $K_{дE} = l_i / b_i$ звичайно, невідомо. Тому для спрощення розрахунків приймають $K_{дE} = 1$. З двох отриманих значень C_{0E} і C_{0TGR} вибирають менше й округляють у бік зменшення.

Визначають C_0 для кожного конденсатора мікросхеми і зіставляють отримані результати. Оскільки для всіх конденсаторів мікросхеми, як правило, вибирають один матеріал, то з усіх розрахованих значень C_0 вибирають мінімальне.

2. Визначають площу перекриття обкладенок конденсатора

$$S_{дE} = (1/K) C_0 / C_{0E} \quad (2.47)$$

де K - коефіцієнт, що враховує вплив крайового ефекту. Якщо $C_0 / C_{0E} > 5 \text{ мм}^2$, то $K = 1$, а для $1 \leq C_0 / C_{0E} \leq 5 \text{ мм}^2$

$$K = 1,3 - 0,06 C_0 / C_{0E} \quad (2.48)$$

Розрахунки конденсаторів із підстроюваним провідять подібно до розрахунків підстроюваних резисторів (п. 1.6). Необхідно врахувати, що конденсатори малої ємності підстроюються послідовним присланням до основної частини конденсатора секції

підстроювання, а конденсатори великої ємності - паралельним присланням до основної частини підстроюваних секцій.

Розрахунки товстоплівкових конденсаторів виконують подібно до розрахунків тонкoplівкових. Відмінними особливостями товстоплівкових конденсаторів є мале значення питомої ємності C_0 і високе значення провідних напруг. Тому для товстоплівкових конденсаторів рекомендується діапазон номінальних значень ємностей від 60 до 220 пФ. Товстоплівкові конденсатори доцільно застосовувати в схемах із підвищеними напругами живлення.

2.5. Вибір форми конденсаторів

Відмінність плівкових конденсаторів від плівкових резисторів в тому, що є можливість вибрати будь-яку форму конденсатора при збереженні площі перекриття $S_{дE}$ (розрахованої за C_0). Для плівкових резисторів повинна бути випукла форма (задана R) за можливих умов змінювання площі. Тому конструктор може замінити форму конденсатора $K_{дE} = l_i / b_i$ зберігаючи площу $S_{дE}$ незмінною.

Вибір форми конденсатора й остаточне визначення всіх розмірів конструкції проводять на етапі розробки топології. За основу приймають обраний тип конструкції і розраховане для кожного конденсатора значення $S_{дE}$. В будь-якому варіанті конструкції нижня обкладка конденсатора повинна виступати за край верхньої на розмір $\delta_i = 2\Delta_i \text{ см} / \text{мм}$. Шар діелектрика повинний виступати за край нижньої обкладки на розмір

$$\delta_i \geq 2\Delta_i \text{ см} / \text{мм} + K_{дE} U_p, \quad (2.49)$$

де $K_{дE} = (2-3) \cdot 10^3 \text{ мм/V}$.

Конденсатори, у котрих $C_0 / C_{0E} < (0,5 \dots 1) \text{ мм}^2$, конструюють у вигляді послідовного з'єднання двох конденсаторів із номінальним значенням, рівним $2C_0$ (рис. 2.1.в). Для кожного із конденсаторів сторони площі перекриття обкладенок формується на різних операціях формотворення. Для розрахунків таких конденсаторів необхідно скористатися відповідними формулами, наведеними раніше.

Для конденсаторів гребінчастої конструкції ширину штирів b_i і відстань між ними a_i визначають методом формування малюнка, а також робочою напругою U_p . Вибравши

значення розмірів b , l та графіками (рис. 2.1.д) визначають значення параметра β_c (погонна ємність конструкції, якщо в якості діелектрика використовують вакуум). За формулою

$$L = C_1 / \beta_c \epsilon_{gr} \quad (2.50)$$

визначають довжину спільної межі штирів пробійчатого конденсатора. Якщо відношення $L/(b \cdot a + b \cdot l) > 5$ доцільно вибрати N однакових секцій. Довжина середньої ділії кожної секції $l_{gr} = L/N$. Відносна похибка ємності пробійчатого конденсатора не перевищує ± 0.2 .

2.6. Задачі

2.6.1. Розрахувати відносну похибку площі перекриття обкладінок конденсатора U , в якого верхня обкладінка розташована в межах нижньої (рис. 2.1.а). Площа перекриття обкладінок 12 мм^2 , коефіцієнт форми 2, метод формування - вільна маска.

2.6.2. Розрахувати відносну дисперсію площі перекриття обкладінок конденсатора σ_{τ}^2 в якого розмір l формується незалежно від розміру b (рис. 2.1.б). Площа перекриття обкладінок 4 мм^2 , коефіцієнт форми 1.5, метод формування - фотолітографія. Розподіли похибок лінійних розмірів вважати нормальними.

2.6.3. Конденсатор із діелектриком із монооксиду кремнію виконаний на сигнальній підложці (СТ50-1). Розрахувати температурний коефіцієнт діелектричної проникності плівки монооксиду кремнію, якщо $\text{TKLP SFO } \alpha_{SiO_2} = 1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

2.6.4. Розрахувати відносну похибку ємності конденсатора, викликану зміною діелектричної проникності і товщини монооксиду кремнію (роздільно) у процесі експлуатації за температури $+120^\circ\text{C}$ ($\alpha_{SiO_2} = 1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

2.6.5. Розрахувати значення робочих напруг трьох плівкових конденсаторів. У якості діелектрика використовують монооксид кремнію. Питомі ємності діелектрика конденсаторів 50, 100, 150 пФ/мм². Побудувати залежність питомої ємності діелектрика від товщини діелектрика. Побудувати залежність робочої напруги конденсаторів від питомої ємності діелектрика.

2.6.6. Розрахувати розміри і розробити конструкцію плівкового конденсатора ємністю 1500 пФ із відносною похибкою на момент виготовлення, що не перевищує ± 0.1 (із ймовірністю 0,997). Робоча напруга 10 В, робоча частота 1 кГц. Відносна

середньоквадратичне відхилення питомої ємності $\sigma_{gr} = 0.02$. Розподілення всіх похибок вважати нормальними.

2.6.7. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри плівкового конденсатора ємністю 3300 пФ із відносною похибкою на момент виготовлення ± 0.1 . Робоча напруга 10 В, відносна похибка питомої ємності ± 0.05 . Робоча частота 1 кГц. Визначити скважність і добротність конденсатора при використанні його на частоті 10 мГц. Індуктивність виводів і обкладінок складає 10 нГн.

2.6.8. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри плівкового конденсатора ємністю 5000 пФ. На інтервалі експлуатації 5 тис.годин за температури $+100^\circ\text{C}$ відносна похибка ємності конденсатора не повинна перевищувати ± 0.2 . Робоча напруга 10 В. Відносна похибка питомої ємності ± 0.03 . Конденсатор працює в низькочастотних ланцюгах.

2.6.9. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри плівкового конденсатора ємністю 600 пФ із відносною похибкою на інтервалі експлуатації 4 тис.годин за температури $+100^\circ\text{C}$ не більшою ± 0.15 . Робоча напруга 30 В. Діелектриком є монооксид кремнію. Відносна похибка питомої ємності ± 0.05 .

2.6.10. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри плівкового конденсатора ємністю 1500 пФ. Робоча напруга 10 В, матеріал діелектрика - монооксид кремнію. Діапазон робочих частот від 50 Гц до 10 МГц. На інтервалі експлуатації 5 тис.годин за температури $+100^\circ\text{C}$ відносна похибка ємності конденсатора не повинна перевищувати ± 0.2 . Відносна похибка питомої ємності не перевищує ± 0.05 . Визначити, наскільки зміниться скважність і добротність конденсатора на верхній частоті діапазону в порівнянні зі значенням цих параметрів на низьких частотах. Індуктивність виводів і обкладінок складає 20 нГн.

2.6.11. Розрахувати розміри і розробити конструкцію плівкового конденсатора ємністю 8 пФ, виготовленого на сигнальній підложці. Робоча напруга конденсатора 20 В. Поверхня конденсатора захищена плівкою SiO₂. Відносна похибка ємності на момент виготовлення не повинна перевищувати ± 0.2 .

2.6.12. Розрахувати розміри і розробити конструкцію плівкового конденсатора ємністю 60 пФ. Робоча напруга 15 В. На інтервалі експлуатації 3 тис.годин за температурі $+120^\circ\text{C}$ відносна похибка ємності конденсатора не повинна перевищувати ± 0.2 . У якості діелектрика використовують монооксид кремнію з питомою ємністю 100 пФ/мм².

2.6.13. Визначити оптимальне значення питомої ємності конденсаторів: $C_1 = 2200$ пФ ± 0.1 , $U_p = 12$ В; $C_2 = 4700$ пФ ± 0.2 , $U_p = 10$ В; $C_3 = 680$ пФ ± 0.15 , $U_p = 7$ В; $C_4 = 300$ пФ ± 0.2 , $U_p = 20$ В, виготовлених на одній підложці, тривалість експлуатації 5 тис.годин за $T =$

+120°C. Відносна похибка питомої ємності $\pm 0,05$. Розміри всіх конденсаторів формуються одним методом.

2.6.14. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 680 нФ. Робоча напруга 10 В, відносна похибка ємності на момент виготовлення не перевищує $\pm 0,1$. Визначити частоту, на якій добротність конденсатора зменшиться в 2 рази в порівнянні з добротністю на частоті 1 кГц.

2.6.15. Розробити конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора з підстроюванням. Ємність конденсатора 2200 нФ, робоча напруга 10 В, відносна похибка після підстроювання не повинна перевищувати $\pm 0,03$. Відносна дозвужа похибка ємності конденсатора без підстроювання $\pm 0,15$.

2.6.16. Розрахувати дозвужу відносно похибки ємності конденсатора з площиню перекриття об'ємом 12 мм² і коефіцієнтом форми 2. У якості діелектрика використовують монооксид германію. Відносна похибка питомої ємності $\pm 0,05$. Тривалість експлуатації 5 тис. годин, робоча температура 80 °С. Метод формування малюнка - вільна маска.

2.6.17. Розробити конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора із підстроюванням. Ємність конденсатора 200 нФ, робоча напруга 5 В, відносна похибка після підстроювання не повинна перевищувати $\pm 0,04$. Відносна похибка питомої ємності $\pm 0,08$. Матеріалом діелектрика є монооксид германію.

2.6.18. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 150 нФ. Робоча напруга 100 В. Відносна похибка на інтєрвалі експлуатації 5 тис. годин за температурі 80 °С не повинна перевищувати $\pm 0,3$. Відносна похибка питомої ємності $\pm 0,04$. Мінімальний розмір чарулки січастого трафарету 60 мкм.

2.6.19. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 400 нФ за робочої напруги 20 В і робочій частоті 1 кГц. Відносна похибка на інтєрвалі експлуатації 3 тис. годин за температурі +80 °С не повинна перевищувати $\pm 0,15$ із ймовірністю 0,997. Метод формування розмірів - вільна маска $\sigma_r = \sigma_b = 15$ мкм. Відносна середнє вважуватичне відхилення питомої ємності $\bar{\sigma}_{r0} = 0,02$. Розподілення всіх похибок вважати нормальними.

2.6.20. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 1500 нФ за робочої напруги 15 В і робочій частоті 1 кГц. Відносна похибка ємності конденсатора на момент виготовлення не повинна перевищувати 0,15 (із ймовірністю 0,997), $\bar{\sigma}_{r0} = 0,03$, $\sigma_r = \sigma_b = 15$ мкм. Розрахувати фактичне значення ємності конденсатора на

частоті 50 МГц, якщо індуктивність пластин і виводів складає 10 нГн. Визначити добротність конденсатора на цій частоті.

2.6.21. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 5600 нФ. Робоча напруга 6В. Відносна середньоквадратичне відхилення ємності конденсатора на момент виготовлення $\bar{\sigma}_r = 0,05$; $\bar{\sigma}_{r0} = 0,02$. Коефіцієнт форми дорівнює 3. У якості діелектрика використовується скло С44-1. Розрахувати частоту, на якій добротність складає 80% добротності на низьких частотах.

2.6.22. Визначити мінімальну площу перекриття об'єдланок конденсатора, що забезпечує відносне середньоквадратичне відхилення площі перекриття об'єдланок $\bar{\sigma}_r = 0,01$. Коефіцієнт форми конденсатора $K_{\phi} = 2$. Верхня об'єдланка формується методом вільної маски і розташована в межах нижньої. Розподілення похибок лінійних розмірів вважати нормальними. В скільки разів зміниться мінімальна площа перекриття, якщо верхня об'єдланка буде формуватися методом фотолітографії?

2.6.23. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 330 нФ. Робоча напруга 20 В, відносна середньоквадратичне відхилення номінального значення ємності на момент виготовлення $\bar{\sigma}_r = 0,04$, відносне середньоквадратичне відхилення питомої ємності $\bar{\sigma}_{r0} = 0,02$. Паралельна індуктивність об'єдланок і виводів складає 10 нГн. Визначити частоту, на котрій фактична ємність складає 300 нФ. Визначити добротність конденсатора на цій частоті.

2.6.24. Визначити відносно похибку площі перекриття об'єдланок конденсатора ємністю 500 нФ. Конденсатор виконаний у вигляді об'єдланок, що перестинаються. Робоча напруга 5 В. Діелектриком є монооксид германію. Коефіцієнт форми дорівнює 1,2.

2.6.25. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри пливкового конденсатора ємністю 3300 нФ. Робоча напруга 15 В. Відносна похибка ємності конденсатора на інтєрвалі експлуатації 5 тис. годин за температурі 80 °С не повинна перевищувати $\pm 0,2$. Відносна похибка питомої ємності складає $\pm 0,05$.

РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУЮВАННЯ ПЛІВКОВИХ ОДНОРІДНИХ РС-СТРУКТУР ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

3.1. Плівкові РС - структури

Плівкові РС-структури з розподіленими параметрами використовують у мікросхемах як фільтри, фазозсуваючі елементи, а також елементи селективного зворотного зв'язку при побудові активних фільтрів. Найбільше застосування знайшли два типи РС-структур: R-C-NR і C-R-NC (рис. 3.1,а,б). За конструктивно-технологічним виконанням структура R-C-NR подібна плівковому конденсатору C з високоомним обкладками, що мають опори R і NR між выводами 1-2 і 3-4, відповідно (N - постійний коефіцієнт). Структура типу C-R-NC складається з двох конденсаторів із ємностями C і NC, що мають спільну обкладку з високоомного матеріалу опором R між выводами 1 і 2. РС-структури по довжині можуть бути з постійними й змінними параметрами. Для змінн параметрів змінюють ширину резистивної і діелектричної плівок. РС- структури, у яких параметри по довжині не змінюються, називаються однорідними

Однорідні РС-структури, як правило, виконують на окремій шаті у вигляді прямокутної п'ятишарової структури, що складається з провідникових, діелектричних і резистивних плівок (рис. 3.1,в). Виконання РС-структур на окремій платі зв'язано зі складністю технологічного процесу виготовлення структури. Разом з іншими пасивними елементами на одній підложці можливо виготовляти трьохполюсні RC - структури типу C-R (рис. 3.2,г) N = 0.

Основною характеристикою однорідної РС-структури з розподіленими параметрами є постійна часу

$$\tau = RC; \tag{3.1}$$

$$\tau = RC = C_0 R_0 l^2, \tag{3.2}$$

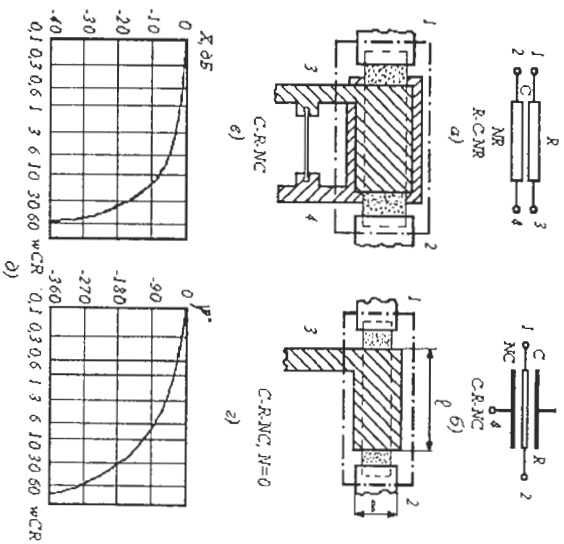


Рис. 3.1

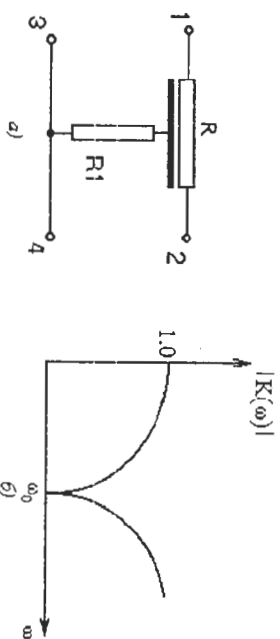


Рис. 3.2

де l - довжина резистора.

Амплітудно-частотна й фазо-частотна характеристики трикопозної одпорілки РС-структури зображені на рис. 3.1.д.

Із рис. 3.1 видно, що РС-структури з розподіленими параметрами мають фазове зміщення набагато більше ніж можна забезпечити за допомогою одного РС-лашхожка на дискретних елементах.

Для побудови мікроелектронних пристроїв частотної селекції використовують РС-нульові фільтри (рис. 3.2.а). У цих фільтрів на частоті ω_0 коефіцієнт передачі дорівнює нулю (рис. 3.2.б):

$$\omega_0 = M / RC, \quad (3.3)$$

$$N = Rl / R. \quad (3.4)$$

де M і N - величини, що визначають вид необхідної амплітудно-частотної характеристики.

Для нульових фільтрів $M = \omega_0 RC = 11,12$, $N = 0,0563$.

Для розрахунків РС-структури повинні бути задані зі схемотехнічного розрахунку: опір резистивної плівки R ; розсіювана резистором потужність P ; ємність структури C ; робоча напруга U_n ; відносна похибка постійної часу лашхожка γ_n або відносна дисперсія постійної часу $\overline{\sigma}_t^2$; частоти зрізу для фільтрів високої або низької частоти; частота резонансу для сумових фільтрів; частота режекції для нульових фільтрів; параметр M , умови експлуатації; технологічні обмеження й інші вимоги й обмеження, сформульовані в ТЗ.

Розрахунки і конструювання РС-структур виконують у такій самій послідовності, як розрахунок резисторів і конденсаторів. Спочатку вибирають матеріали (за критеріями, використовуваними при конструюванні резисторів і конденсаторів) і, орієнтовно, визначають R_0 резистивної плівки і питому ємність C_0 . Вибирають методи нанесення резистивної і діелектричної плівок і методи формотворення малюнка шарів.

3.2. Розрахунки одпорілки РС-структур

Приймаючи, що похибки всіх параметрів у (3.2) розподілені за нормальними законам, можна записати

$$\overline{\sigma}_t^2 = \overline{\sigma}_r^2 + \overline{\sigma}_{k_0}^2 + 4\overline{\sigma}_l^2 \quad (3.5)$$

Значення $\overline{\sigma}_{r_0}$, $\overline{\sigma}_{k_0}$ і $\overline{\sigma}_l$ визначаються методами нанесення плівок і методом формування довжини резистивної смужки. За урахування умов експлуатації РС-структур в рівняння (3.5) слід включити складові, які характеризують зміну питомої ємності й опору резистивної плівки на квадрат під впливом температури й у результаті старіння.

Відносну дисперсію довжини резистивної смужки визначають за формулою:

$$\overline{\sigma}_l^2 = (\overline{\sigma}_r^2 - \overline{\sigma}_{r_0}^2 - \overline{\sigma}_{k_0}^2) / 4. \quad (3.6)$$

Оскільки $\overline{\sigma}_r = \sigma_r / l$, то l для забезпечення заданої точності повинна задовольняти умові

$$l \geq 2\sigma_r / \sqrt{\overline{\sigma}_r^2 - \overline{\sigma}_{r_0}^2 - \overline{\sigma}_{k_0}^2}. \quad (3.7)$$

За відомого значення R_0 (якщо резистор РС-структури виготовляють різком з іншими резисторами) або за вибраним R_0 визначають коефіцієнт форми резистора $K_\phi = R / R_0$.

Попереднє значення C_0 діелектричного шару визначають за формулою

$$C_0 = C \cdot K_\phi / l^2. \quad (3.8)$$

Остаточне значення C_0 вибирають з урахуванням робочої напруги й інших плівокових конденсаторів, виготовлених на одній плівожці, після чого розраховують площу резистора РС-структури

$$S_{RC} = C / C_0 \quad (3.9)$$

і визначають ширину b довжину резистора структури:

$$b = \sqrt{S_{RC} / K_\phi}, \quad l = \sqrt{S_{RC} \cdot K_\phi}. \quad (3.10)$$

Щоб уникнути похибки ϵ та рахунок неточності суміщення, резистор РС-структури повинен бути довший розрахункового на дві величини похибки суміщення. На кінцях РС-

структури з'являються невеликі додаткові резистори, але значення τ не буде залежати від точності суміщення R і S шарів. Як правило, додаткові резистори на кінцях структури багато менші опору резистора R_C - структури і помітного впливу на роботу не зроблять, оскільки можуть бути віднесені до опорів тензодатчика й навантаження.

При визначенні інших розмірів R_C -структури необхідно керуватися правилами, застосовуваними при конструюванні конденсаторів і плівкових резисторів.

Формули (3.5...3.7) можна використовувати для розрахунків R_C - структур методом повної взаємозамінності, попередньо замінивши $\bar{\sigma}_n$ на $\gamma_{\sigma n}$, $\bar{\sigma}_m$ на $\gamma_{\sigma m}$, Δl и $\bar{\sigma}_t$ на γ_t .

3.3. Задачі

3.3.1. Розрахувати розміри і розробити конструкцію однорядної R_C - структури, що виконує функції фазозмішувачого ланцюга. Фазове зміщення на частоті $f = 500$ кГц дорівнює -180° . Опір резистивної плівки 10 кОм, розсіювана резистором потужність дорівнює 5 мВт. Робота напруга R_C -структури 6 В. Відносна дисперсія постійної часу $\bar{\sigma}_t^2 = 0,0025$. Малюнок структури виконують методом вільної маски.

3.3.2. Розробити конструкцію і визначити розміри однорядної трьохполюсної структури з розподіленими параметрами типу $S-R-NC$ ($N = 0$). Ємність структури дорівнює 288 пФ, опір резистора структури -4 кОм, робоча напруга 5 В, розсіювана потужність резистором структури дорівнює 1 мВт. Матеріал резистивної плівки - хром. Формування розмірів ведуть методом вільної маски. Відносна похибка постійної часу $\gamma_t = 0,2$.

3.3.3. Визначити з ймовірністю $0,997$ граничну відносну дисперсію постійної часу однорядної R_C -структури з розподіленими параметрами типу $S-R-NC$ ($N = 0$). Структура формується методом вільної маски. Опір резистивної плівки 10 кОм, ємність 800 пФ. Матеріал резистивної плівки – сплав МЛТ-3М $R_0 = 200$ Ом/см², матеріал діелектричної плівки SrO , $\epsilon_0 = 100$ пФ/км². Тривалість експлуатації структури - 5 тис.годин, робоча температура 100° С. Відносна похибка C_0 із ймовірністю $0,997$ складає $0,06$, а відносна похибка R_0 з ймовірністю $0,997$ - $0,03$. Розподілення всіх похибок вважати нормальними.

3.3.4. Розробити конструкцію і розрахувати розміри R_C - пульсового фільтра з $b_0 = 200$ кГц. Відносна дисперсія постійної часу, $\bar{\sigma}_t^2 = 0,0025$. Ємність однорядної R_C - структури $C =$

5000 пФ. Робоча напруга 5 В. Відносна дисперсія $\bar{\sigma}_{\sigma n}^2 = 0,0009$, $\bar{\sigma}_{\sigma m}^2 = 0,0001$. Малюнок фільтра формується методом вільної маски. Потужність, розсіювана резистором R , дорівнює 2 мВт, а резистором $R_l - 0,5$ мВт (рис. 3.2, а). Розподілення всіх похибок вважати нормальними.

3.3.5. Розробити конструкцію і розрахувати розміри однорядної R_C - структури типу $S-R-NC$ ($N = 0$), що має на частоті 1 мГц коефіцієнт передавання -10 дБ. Опір резистивної смужки 7 кОм. Відносна похибка постійної часу $\gamma_t = 0,15$. Потужність, розсіювана резистором, дорівнює 5 мВт. Відносна похибка $\gamma_{\sigma n} = 0,07$, $\gamma_{\sigma m} = 0,03$. Малюнок резистивної смужки формується методом фотолітографії.

3.3.6. Розробити конструкцію і визначити розміри однорядної трьохполюсної R_C - структури типу $S-R-NC$ ($N = 0$), що виконує функції фазозмішувачого ланцюга. Фазове зрушення на частоті 1 МГц дорівнює -180° . Відносна дисперсія постійної часу на інтервалі експлуатації 5 тис.годин за температур 80° С не повинна перевищувати $0,0049$ (із ймовірністю $0,997$). Опір резистивної смужки 10 кОм, розсіювана резистором потужність 2 мВт, робоча напруга структури 5 В. Відносна дисперсія $\bar{\sigma}_{\sigma n}^2 = 0,0009$, $\bar{\sigma}_{\sigma m}^2 = 0,0004$. Малюнок резистивного шару формується методом фотолітографії.

3.3.7. Розробити конструкцію і розрахувати розміри R_C -нумерологічного фільтра на однорядній R_C - структурі типу $S-R-NC$ ($N = 0$). Частота режущої $f_{\text{р}} = 1$ мГц. Опір резистивної смужки 5 кОм. Відносна середньоквадратичне відхилення постійної часу R_C - структури на інтервалі експлуатації 3 тис.годин за температури 80° С не перевищує $0,06$ (з ймовірністю $0,997$). Відносне середньоквадратичне відхилення $\bar{\sigma}_{\sigma n} = 0,03$, $\bar{\sigma}_{\sigma m} = 0,01$. Малюнок резистивної смужки формується методом фотолітографії. Розподілення всіх похибок вважати нормальними. Робоча напруга структури 5 В, розсіювана потужність на R дорівнює 1 мВт, а на $R_l = 0,5$ мВт.

3.3.8. Розробити конструкцію і розрахувати розміри однорядної R_C - структури типу $S-R-NC$ ($N = 1$). Ємність структури 10000 пФ, опір резистивної смужки 20 кОм, робоча напруга 5 В, розсіювана потужність 2 мВт. Малюнок резистивного шару формується методом фотолітографії. Відносне середньоквадратичне відхилення постійної часу структури $\bar{\sigma}_t = 0,07$, відносна похибка питомої ємності $\gamma_{\epsilon_0} = 0,08$, а опору плівки на квадрат $\gamma_{\sigma_0} = 0,02$ (з ймовірністю $0,997$). Розподілення всіх похибок вважати нормальними.

3.3.9. Розробити конструкцію і розрахувати розміри однорядної R_C - структури типу $S-R-NC$ ($N = 2$). Ємність структури 10000 пФ, опір резистивної смужки 10 кОм, робоча напруга 3 В, розсіювана резистором потужність 1 мВт. Відносна похибка постійної часу структури на

інтервалі експлуатації 3 тис.годин за температури 80°С не перевищує 0,25 (з ймовірністю 0,997). Відносна похибка питомої ємності складає 0,07, відносна похибка R_0 $\gamma_{m0} = 0,02$. Малюнок резистивної смужки формується методом фотолитографії. Розподілення похибок вважати нормальними.

3.3.10. Розробити конструкцію і розрахувати розміри однорідної RC-структури типу С-Р-МС ($N = 0$), що виконує функції фазозміщуючого ланцюга. Фазове зміщення на частоті 200 кГц дорівнює -90°. Олір резистивної смужки 15 Ом. Відносне середньоквадратичне відхилення постійної часу RC-структури на інтервалі експлуатації 3 тис.годин за температури 100°С не перевищує 0,1 ($\bar{\sigma}_{\tau_{01}} = 0,02$, $\bar{\sigma}_{\tau_{02}} = 0,01$). Визначити коефіцієнт переизміння фазозміщуючого ланцюга на робочій частоті. Розподілення похибок вважати нормальними.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУВАННЯ ПЛІВКОВИХ ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

4.1. Плівкові індуктивні елементи.

Плівкові індуктивні елементи виконують у вигляді плоских спіралей круглої або квадратної форми (рис. 4.1, а,б) із провідного матеріалу, який наносять на ізоляційну або феритову підложку.

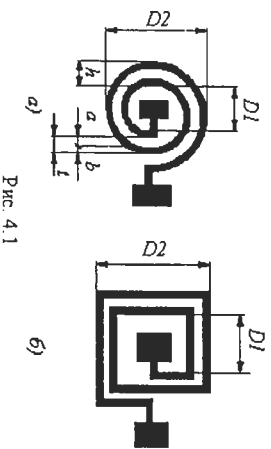


Рис. 4.1

Основні параметри плівкових індуктивних елементів: індуктивність L , добротність Q , власна резонансна частота f_0 , температурний коефіцієнт індуктивності (ТКИ). Вони залежать від конструкції, розмірів спіралі, питомого опору провідного матеріалу й умов навколишнього середовища.

Індуктивність плоскої спіралі визначають за формулою

$$L = T \frac{W^2 \cdot D_{sp}}{1 + 2,75 \cdot h / D_g} \cdot 10^{-7} \quad [\mu\text{H}], \quad (4.1)$$

де T - коефіцієнт (для круглої спіралі) $T=24,6$ Гн/м, для квадратної $T=28,4$ Гн/м); W - число витків, $D_{sp}=0,5(D_1+D_2)$ - середній діаметр круглової або середня довжина сторони квадратної спіралі; $h = 0,5(D_2 - D_1)$ - радіальна ширина спіралі.

Найбільше значення індуктивності визначається зовнішнім розміром спіралі D_2 , який обмежений (10...20) мм. Індуктивність плівкових спіралей не перевищує одиниць мікрогенері, а пинжа робочої частоти складає десятки МГц. Для збільшення індуктивності застосовують підложки з матеріалу з підвищеною магнітною проникністю. Плівкові спіралі квадратної форми мають за однакових значень D_1 , D_2 , h і W більшу індуктивність, ніж спіралі круглової форми, приблизно на 10%. Металеві елементи або скрани, розташовані на відстані від плівкової спіралі меншій її діаметра D_2 , зменшують її індуктивність і добротність.

Для розрахунків індуктивності плівкових індуктивних елементів можуть бути використані і інші емпіричні вирази:

- для круглої спіралі

$$L \approx 5 \frac{(D_1 + D_2)^2 W^2}{15D_2 - 7D_1}; \quad (4.2)$$

- для квадратної спіралі

$$L \approx 6 \frac{(D_1 + D_2)^2 W^2}{15D_2 - 7D_1}. \quad (4.3)$$

В рівняння (4.2) і (4.3) розміри діаметрів підставляють в міліметрах, а значення індуктивності отримують у нГн.

Добротність плівкової індуктивності

$$Q = \omega L / (r_s + r_j) \quad (4.4)$$

де r_s - діелектричні втрати в підложці;

$$r_0 = \omega^2 C_k L^2 g \delta; \quad (4.5)$$

r_1 - опір матеріала спіралі з урахуванням поверхневого ефекту:

$$r_1 = 10^{-3} \cdot \alpha \cdot l_k \cdot \sqrt{f \cdot p} / (b+d). \quad (4.6)$$

Коефіцієнт α розраховують за наступними виразами:

$$\alpha = \begin{cases} 1,32 & \text{як } 1 \leq b/d \leq 4 \\ 1,35 \exp[5,4 \cdot 10^{-3} \cdot (b/d - 4)] & \text{як } b/d \geq 4 \end{cases} \quad (4.7)$$

C_k - власна ємність півкової індуктивності:

$$C_k = C_{11} \cdot (W-1) l_1, \quad (4.8)$$

де l_1 - середня довжина першого (внутрішнього) витка; C_{11} - погонна ємність між двома сусідніми витками:

$$C_{11} \approx \epsilon \epsilon_0 \sqrt{(t+b)^2 / t^2 - 1}. \quad (4.9)$$

l_k - довжина спіралі. Для круглої спіралі:

$$l_k = 1,3 \cdot 2\pi \left[W R_1 + (t+b) \sum_{i=1}^k (i-1) \right]; \quad (4.10)$$

для квадратної спіралі:

$$l_k = W \left[4D_1 + (4W-1)l \right], \quad (4.11)$$

де $l = (a+b)$ - крок спіралі, b - ширина провідника, a - відстань між провідниками; d - товщина провідника; R_1 - радіус першого витка.

За емпіричними формулами добротність круглої спіралі:

$$Q = 2,10^3 \frac{Wb(D_2+D_1)\sqrt{f}}{15D_2-7D_1}, \quad (4.12)$$

а добротність квадратної спіралі:

$$Q = 1,6 \cdot 10^3 \frac{Wb(D_2+D_1)\sqrt{f}}{15D_2-7D_1}. \quad (4.13)$$

У виразах (4.12) і (4.13) всі розміри підставляють в міліметрах, а частоту - у ГГц.

Кругла спіраль забезпечує більшу добротність, ніж квадратна. Однак квадратну легше виконати і вона замінає за різних номінальних значеннях індуктивності меншу площу.

Максимальна добротність півкової індуктивності досягається при оптимальному відношенні розмірів $D_1/D_2 = K$. Для круглої спіралі $K = 0,4$, для квадратної $K = 0,36$.

Власна резонансна частота f_0 контуру, утвореного індуктивністю L і власною ємністю C_k , визначають за формулою $f_0 = 1 / 2\pi \sqrt{LC_k}$. З підвищенням частоти ефективний індуктивний опір півкової індуктивності зменшується в K раз:

$$K = 1 / [1 - (f/f_0)^2] \quad (4.14)$$

Температурний коефіцієнт індуктивності визначають як суму температурних коефіцієнтів: лінійного розширення α_n ; діелектричної проникності α_ϵ і магнітної проникності α_μ підложки; активного опору провідників α_r ; екранування α_ϵ :

$$\alpha_k = \alpha_n + \alpha_\epsilon + \alpha_r + \alpha_\epsilon + \alpha_r. \quad (4.15)$$

4.2. Розрахунки і конструювання індуктивних елементів

Розрахунки і конструювання півкових індуктивних елементів виконують у наступному порядку:

4.2.1. Вибирають матеріали провідника, визначають необхідну товщину півки d і методи нанесення. Для спіралей використовують ті ж матеріали, що і для формування

провідників (підшар, шар і покриття). Товщина плівки повинна бути більше глибини скин-шару (глибини, за якої щільність струму падає до значення $1/e$):

$$\delta = \sqrt{\rho / \pi f \mu_0} \quad (4.16)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Вибирають товщину плівки $d = 3\delta$. В якості основного матеріалу шару найчастіше використовують мідь, покриття - нікель, срібло, золото. За необхідності виконують електролітичне наробування міді. При визначенні δ варто врахувувати, що величина ρ за електролітичного осаджування може бути в 2...3 рази більшою питомого опору масивного матеріалу.

4.2.2. Виходячи з технологічних обмежень, вибирають ширину провідника $b = b_{min}$, відстань між провідниками $a = a_{min}$ і визначають крок спіралі $l = a + b$.

4.2.3. Вибирають форму спіралі й відношення $k = D_1/D_2$. Мінімальну площу буде мати індуктивність, у якій $D_1 = 0$, тобто за $k = 0$. Для круглої спіралі k вибирають з інтервалу (0.2...0.4), а для квадратної - (0.2...0.36).

4.2.4. Визначають зовнішній діаметр спіралі:

$$D_2 = \sqrt{\frac{2(15-7k)^2 l^2 L}{(1-k^2)^2 T}} \cdot 10^3, \quad (4.16)$$

внутрішній діаметр спіралі $D_1 = k \cdot D_2$ і число витків:

$$N = \frac{(D_2 + l) - (D_1 + 2b)}{2l}. \quad (4.17)$$

4.2.5. За формулами (4.8) і (4.9) визначають власну ємність плівкової індуктивності, а за формулами (4.10) чи (4.11) розраховують довжину спіралі.

4.2.6. За формулами (4.4)...(4.6) або (4.12) і (4.13) розраховують добротність індуктивних елементів.

Якщо розраховане значення Q задовольняє вхідним даним, розрахунок закінчується. Якщо ж $Q_{нар} < Q_{дана}$, то необхідно збільшити значення b і a , і повторити весь розрахунок спочатку, починаючи з п.4.2.2.

Індуктивності до 10...20 нГн, використовувани в діапазоні НВЧ, реалізуються у вигляді відрізків плівкового провідника, круглої або квадратної петлі (рис. 4.2.а,б,в) і розраховуються за наступними формулами:

- для прямокутного провідника

$$L = 0,2\ell [\ln(\ell/b+d) + 1,19 + 0,22(b-d)/\ell], \quad (4.18)$$

де b, ℓ, d - ширина, довжина і товщина провідника у міліметрах, L - у нГн;

- для круглої петлі

$$L = 0,2\rho [\ln(2\rho/(b+d)) - 2,451] \quad (4.19)$$

де ρ - периметр петлі, b, d - ширина і товщина провідника у міліметрах; L - у нГн;

- для квадратної петлі

$$L = 0,2D [\ln(2D/(b+d)) - 2,853], \quad (4.20)$$

де D - сторона квадрата, b, d - у міліметрах; L - у нГн.



Рис. 4.2

Якщо відстань від плівкової індуктивності до металевого корпусу менша її діаметра D_2 , то екран зменшує магнітне поле плівкового елемента, що призводить до зниження її індуктивності й добротності. Тому конструктивному розрахунку підлягає значення індуктивності плоскої спіралі, розміщеної у металевому корпусі на діелектричній підложці.

Вихідні дані для розрахунку: значення індуктивності в корпусі, задана за електричною принциповою схемою L_2 (мкГн), верхня робоча частота f (ГГц), внутрішній D_1 (мм) і зовнішній D_2 (мм) діаметри плівкової спіралі, діелектрична проникність підложки ϵ , відстані площини спіралі до паралельних стінок корпусу Z_1 і Z_2 (мм) (рис. 4.3).

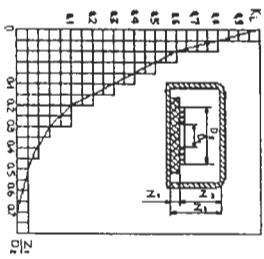


Рис. 4.3

Порядок розрахунку:

а) для прямокутної спіралі визначають значення еквівалентних діаметрів

$$D_{2, \text{вн}} = 1,13 \sqrt{A_2 \cdot B_2}; \quad D_{1, \text{вн}} = 1,13 \sqrt{A_1 \cdot B_1}, \quad (4.21)$$

де A_1, B_1, A_2, B_2 відповідно зовнішні і внутрішні сторони прямокутної спіралі;

б) визначають конструктивний параметр

$$m = 1/(1 - K_1 - K_2 + K_3) \quad (4.22)$$

де K_1, K_2, K_3 коефіцієнти, визначені за графіком (рис. 4.3), як функції відповідних відстаней

Z_1, Z_2, Z_3 ;

в) розраховують значення індуктивності без урахування екранування

$$L = L_1 \cdot m \quad f < 0,001 \Gamma\Gamma\text{ц}; \quad (4.23)$$

$$L = L_1 \cdot |m - C_{\text{дл}} f^2 L_1 (D_2^2 - D_1^2) \epsilon|; \quad (4.24)$$

$$f \geq 0,01 \Gamma\Gamma\text{ц}$$

де $C_{\text{дл}}$ - ємність спіралі на корпус через підложку, пФ

$$C_{\text{дл}} = 0,00885 \epsilon_r S_r / d_r \quad (4.25)$$

де S_r - площа провідника спіралі, мм², d_r - товщина підложки, мм; ϵ_r - діелектрична проникність підложки.

4.3. Задачі

4.3.1. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності круглої форми. Номінальне значення індуктивності 1 мкГн, робоча частота 40 МГц, добротність - не менша 25. Індуктивність виконується на підложці з полікора.

4.3.2. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності квадратної форми, виконувану на сигнальній підложці (СТ50-1). Номінальне значення індуктивності 0,5 мкГн, робоча частота - 100 мГц, добротність - не менша 50.

4.3.3. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності, що розміщується в металевому корпусі. Номінальне значення індуктивності в корпусі 1,5 мкГн, робоча частота 20 мГц, добротність - не менша 30. Індуктивність виконують на підложці із ситала (СТ50-1); товщина підложки 0,6 мм; відстань від поверхні індуктивності до кришки корпусу 4,8 мм.

4.3.4. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності, виконувану на підложці з полікора. Номінальне значення індуктивності 20 нГн, робоча частота 10 ГГц. Розрахувати температурний коефіцієнт індуктивності. Температурний коефіцієнт магнітної проникності дорівнює температурному коефіцієнту діелектричної проникності.

4.3.5. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності квадратної форми. Номінальне значення індуктивності 7 мкГн, робоча частота 40 мГц. Розрахувати добротність. Розрахувати розміри півкової індуктивності, що має добротність у 1,5 вищою.

4.3.6. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності круглої форми. Номінальне значення індуктивності 5 мкГн, робоча частота 50 мГц. Розрахувати добротність. Визначити, у скільки разів зміниться індуктивність плоскої спіралі при роботі на частоті 100 мГц?

4.3.7. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності квадратної форми, яку розміщують у металевому корпусі. Номінальне значення індуктивності в корпусі 0,3 мкГн, робоча частота 150 МГц, добротність - не менша 40. Товщина підложки з полікора 1,2 мм, відстань від поверхні півкової спіралі до кришки корпусу 1,8 мм.

4.3.8. Розрахувати розміри і розробити конструкцію півкової індуктивності. Номінальне значення індуктивності 3 мкГн, робоча частота 100 МГц. Визначити добротність.

Індуктивність виконана на полікоровій підложці. Визначити, на скільки зміниться індуктивність при переході на роботу частотою 150 МГц?

4.3.9. Визначити форму, розрахувати розміри, індуктивність і добротність півкової спіралі, що має площу 1 см² і має найбільшу добротність. Робота частота – 100 МГц. Підложка виконана з полікора.

4.3.10. Вибрати конструкцію і розрахувати розміри півкової індуктивності 0,5 мкГн.

Індуктивність виконана на ситаловій підложці і повинна займати найменшу площу.

Розрахувати добротність індуктивності. Робота частота 60 МГц.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТОПОЛОГІЇ

5.1. Етапи розроблення топології

Розробка топології є одним з основних етапів у процесі конструювання гібридної інтегрованої мікросхеми, на якому вирішується завдання компоновання півкових елементів мікросхеми з урахуванням електричних особливостей схеми, технології виготовлення і конструктивних обмежень.

Розробка топології проводиться з урахуванням раніше виконаних розрахунків півкових елементів у чотирьох етапах:

- розробка комутаційної схеми, тобто схеми взаємного розташування елементів, компонентів і їхніх з'єднань на платі без урахування розмірів;
- розміщення й вибір форми півкових елементів на платі (при необхідності - корекція розмірів), а також виконання між'єднань;

- оцінка якості топології й (при необхідності) її корекція;
- відпрацювання креслень шарів.

Комутаційну схему розробляють на основі принципової електричної схеми, переліку елементів, загальних конструктивних вимог і спеціальних електричних і конструктивних вимог. До останніх найчастіше відносять вимоги по розташуванню контактних площинок

(рознесення входу й виходу, порядок і місце розташування неруфторійних площинок і т.д.), а також вимоги з мінімізації довжини визначених провідників і паразитних зв'язків між контактними елементами й провідниками.

Порядок розробки комутаційної схеми:

а) із принципової схеми виключають усі компоненти, а їх виводи замінюють внутрішніми контактними площинками;

б) контактні площинки розташовують з максимальним урахуванням усіх схемотехнічних і конструктивних вимог (розміщення виводів, розміщення транзисторів, мікросхем і т.д.);

в) розташовують інші елементи (зберігаючи їхнє схемне позначення), приєднуючи їх до контактних площинок у відповідності з принциповою схемою;

г) аналізують отриману комутаційну схему з метою її спрощення й зменшення числа перетинів. При цьому доцільно орієнтовно визначити орієнтацію провідників (а іноді і паразитні ємності провідників) і порівняти їх з допустимими величинами.

Вибір форми й розміщення півкових елементів проводять на основі комутаційної схеми, даних про розміри елементів і підложки з урахуванням конструктивних, електричних і технологічних вимог і обмежень. Послідовність дій при виконанні цього етапу не може бути строго визначена і містити, як правило, декілька ітерацій. Роботу виконують із використанням пакетів програм. Однак за умови простої схеми вола може бути виконана без використання пакетів програм. В цьому випадку всі роботи виконують вручну з кресленнями півкових елементів, що зручно робити на міліметрівці в масштабі фотооригіналу (найкраще 10:1, 20:1 і т.д.).

Площу плати орієнтовно розраховують за формулою

$$S_{пл} = (1/K_3)(S_A + S_B + S_C + S_{дл} + S_{ком} + S_{мод}), \quad (5.1)$$

де K_3 - коефіцієнт заповнення плати (0,35 ... 0,5); S_A , S_B , S_C , $S_{дл}$, $S_{ком}$ - площа всіх резисторів, конденсаторів, індуктивностей, контактних площинок і компонентів.

Розміри плати вибирають із дискретного ряду з урахуванням типорозмірів вибраного раніше типу корпусу або з урахуванням вимог безвідхідного розділення підложки на платі. При кресленні необхідно ошадливо використовувати площу підложки і строго дотримуватися технологічних і конструктивних вимог і обмежень. Ряд вимог, який необхідно виконувати при розробці топології, наведено у Додатку-3. Компоненти розташовують рядами або стовпцями на вільних місцях плати, але допускається їхнє

розміщення на півковних провідниках і резисторах, захищених діелектриком, за умови, що мікросхема функціонує на низьких частотах, а діелектрик не руйнується класм.

Оцінка якості топології містить у собі аналіз сформованої топологічної структури на відповідність усім вимогам і обмеженням, а також проведення розрахунків смієнних і індуктивних зв'язків, опору провідників і теплового розрахунку всієї мікросхеми.

Смієність двох паралельно розташованих півковних провідників розраховують за формулою :

$$C_{\text{пн}} = \epsilon_0 \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \cdot f(1,56 + 0,41 \cdot \lg \frac{h^2}{a}) \cdot 10^{-12}, \quad [\text{пФ}], \quad (5.2)$$

де ϵ_1, ϵ_2 - діелектрична проникність, відповідно, середовища і підложки; h_1, h_2 - ширина провідників; f - стільна довжина провідників; a - відстань між провідниками.

Індуктивність окремого провідника можна розрахувати за формулою (4.18)

Креслення (чи ескіз) шарів, за якими повинні виготовляти фотооригінали, розробляють на основі результатів другого й третього етапів з урахуванням можливостей і вимог технології.

5.2. Задача

Розробити топологію гібридної інтегрованої мікросхеми (рис. 5.1.). Усі відпоєні похибки номінальних значень параметрів елементів дані на момент виготовлення. Вхід (входи) мікросхеми розташовувати на одній стороні плати, а вихід (виходи) і живлення - на протилежній стороні плати. Відстань між зоніцієними контактними площадками 2,5 мм. Параметри параметри: C_T 0,5 пф, L_T 0,5 мкГн, $R_{\text{глад}}$ 1 Ом. Інші обмеження можуть бути сформульовані безпосередньо на практичних заняттях.

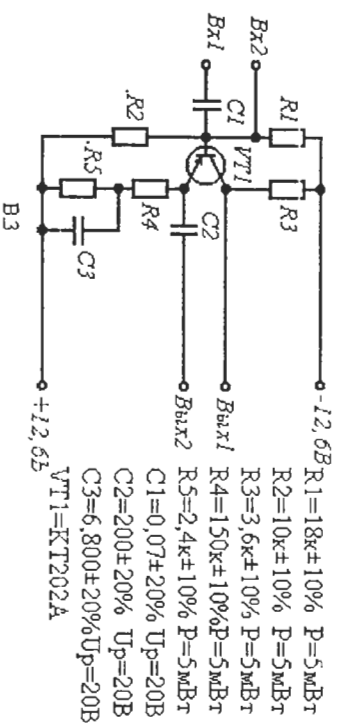
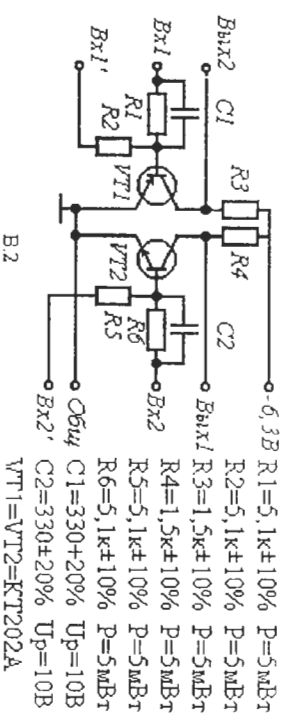
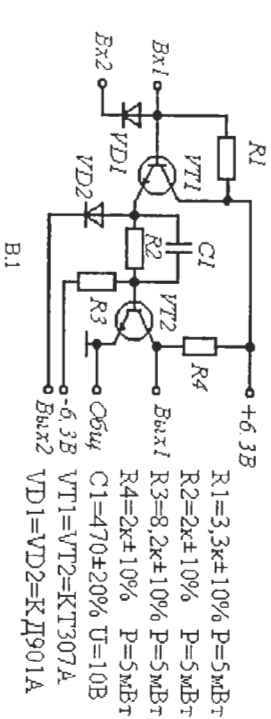
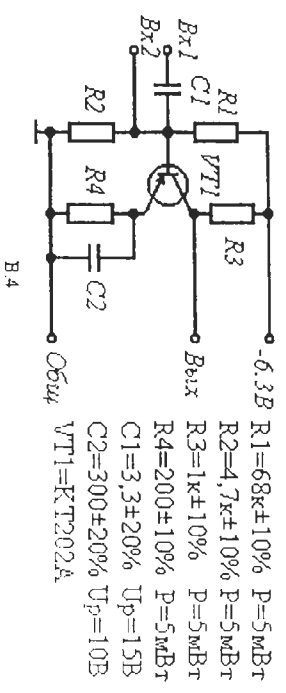
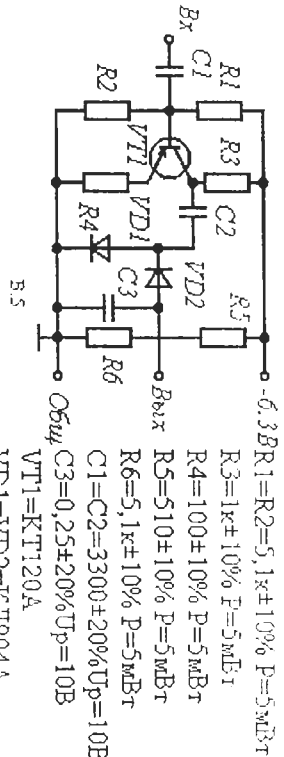


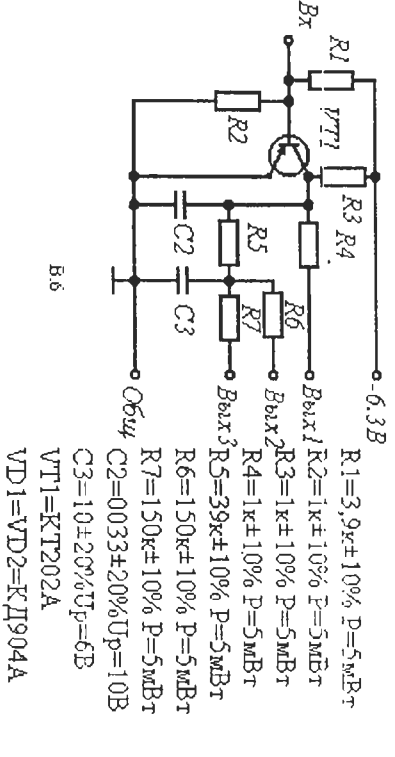
Рис. 5.1



$R1=68k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R2=4,7k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R3=1k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R4=200\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C1=3,3\pm 20\%$ $U_p=15B$
 $C2=300\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $VT1=KT202A$

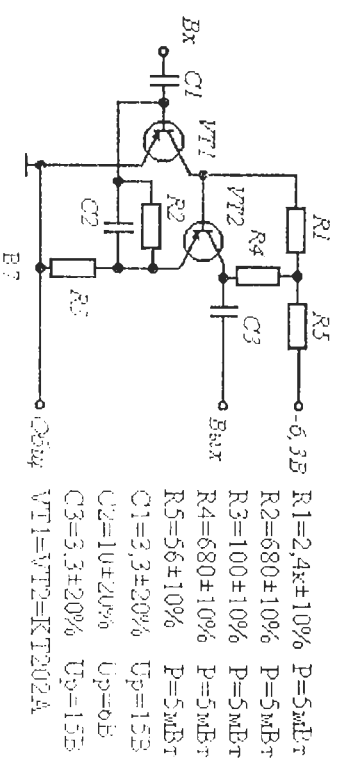


$R1=3,9k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R2=1k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R3=100\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R4=100\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C1=5,1k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C2=3300\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $VT1=KT120A$

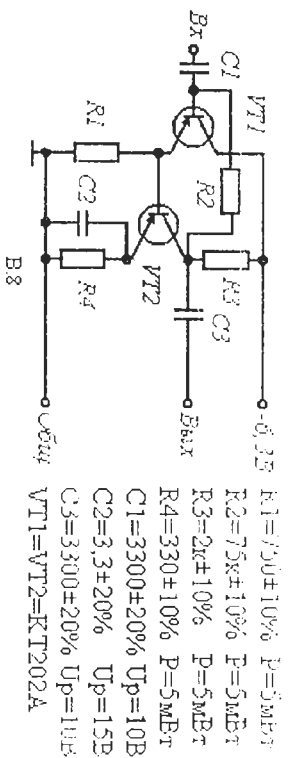


$R1=3,9k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R2=1k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R3=1k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R4=1k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R5=39k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R6=150k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R7=150k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C2=0033\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $C3=10\pm 20\%$ $U_p=6B$
 $VT1=KT202A$
 $VD1=VD2=K\pi 904A$

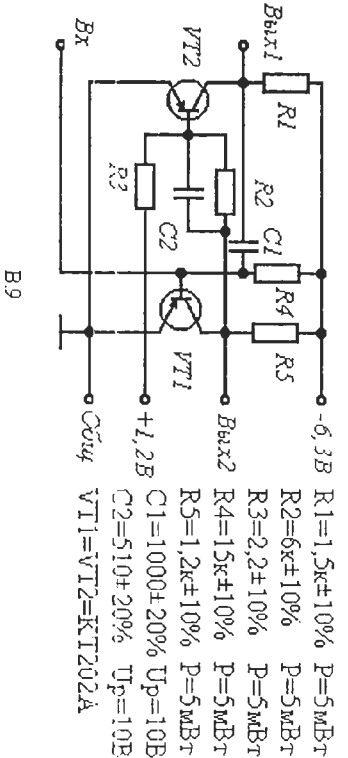
Рис.5.1



$R1=2,4k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R2=680\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R3=100\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R4=680\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R5=56\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C1=3,3\pm 20\%$ $U_p=15B$
 $C2=10\pm 20\%$ $U_p=6B$
 $C3=3,3\pm 20\%$ $U_p=15B$
 $VT1=VT2=KT202A$



$R1=750\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R2=75k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R3=2k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R4=330\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C1=3300\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $C2=3,3\pm 20\%$ $U_p=15B$
 $C3=3300\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $VT1=VT2=KT202A$



$R1=1,5k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R2=6k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R3=2,2\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R4=15k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $R5=1,2k\pm 10\%$ $P=5mB\tau$
 $C1=1000\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $C2=510\pm 20\%$ $U_p=10B$
 $VT1=VT2=KT202A$

Рис.5.1

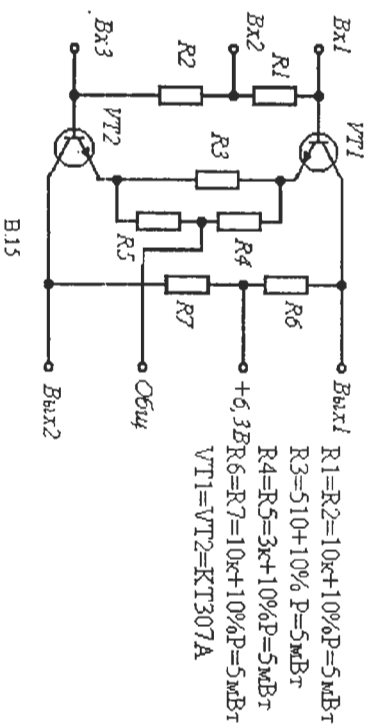
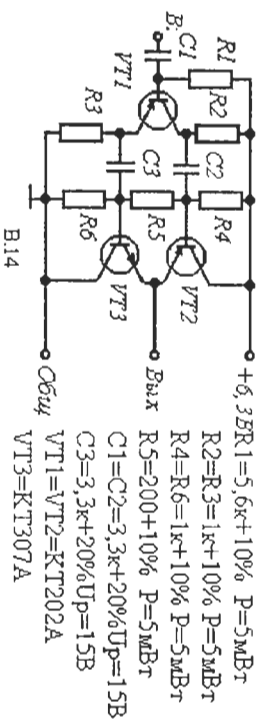
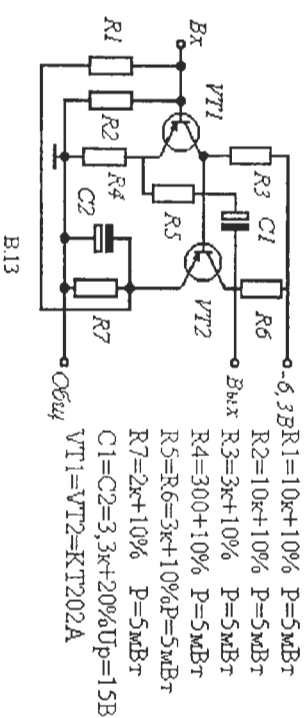
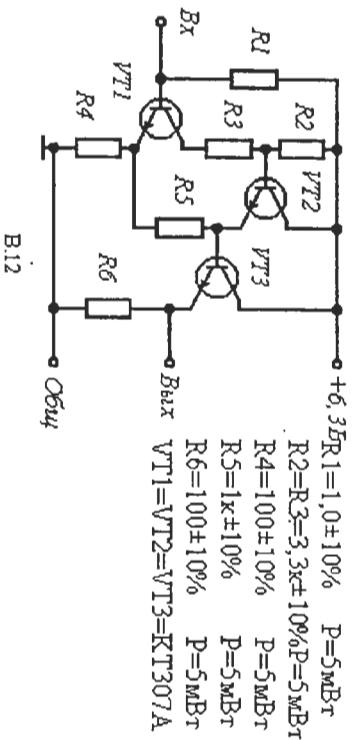
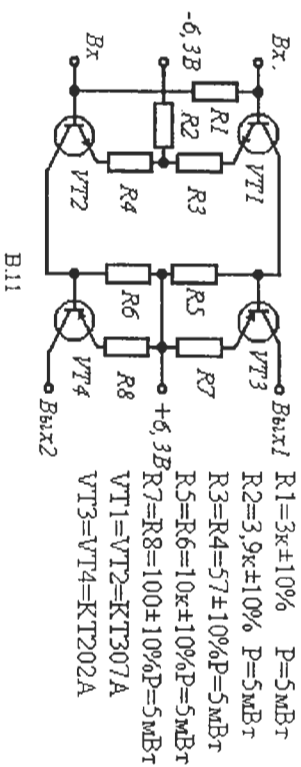
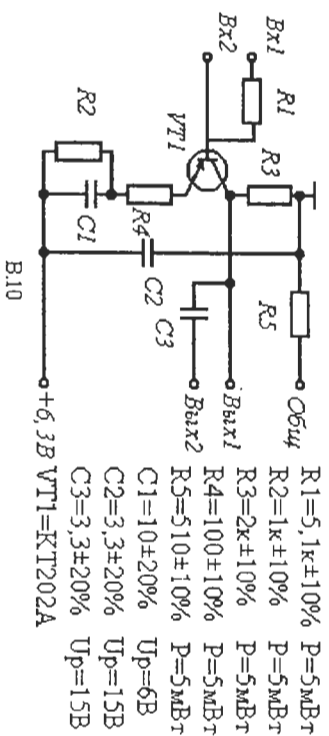
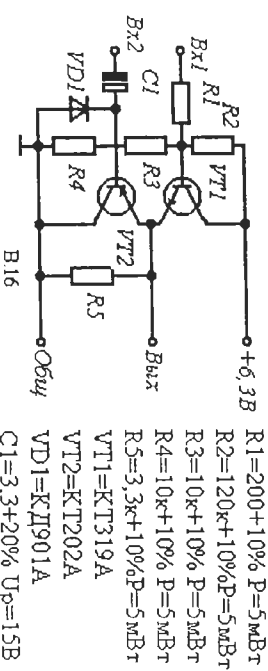
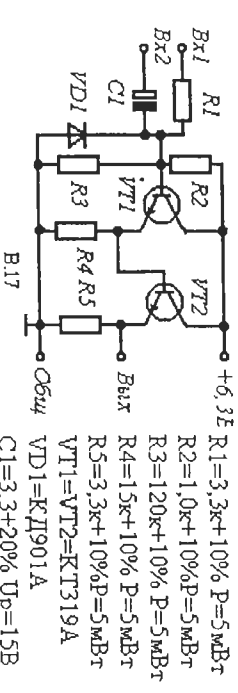


Рис. 5.1

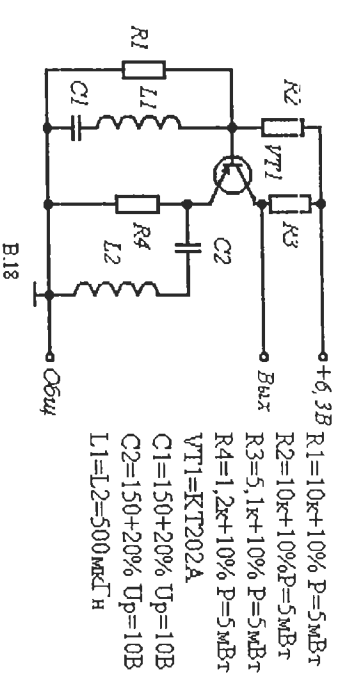
Рис. 5.1



$R1=200\pm 10\%$ P=5mBт
 $R2=120\pm 10\%$ P=5mBт
 $R3=10\pm 10\%$ P=5mBт
 $R4=10\pm 10\%$ P=5mBт
 $R5=3.3\pm 10\%$ P=5mBт
 $VT1=KT19A$
 $VT2=KT202A$
 $VD1=KП901A$
 $C1=3.3\pm 20\%$ Uр=15В

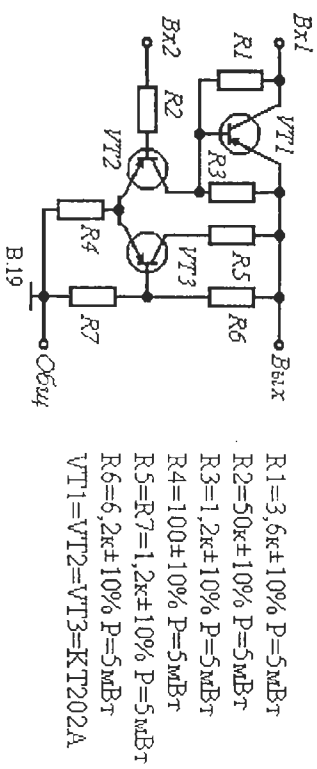


$R1=3.3\pm 10\%$ P=5mBт
 $R2=1.0\pm 10\%$ P=5mBт
 $R3=120\pm 10\%$ P=5mBт
 $R4=15\pm 10\%$ P=5mBт
 $R5=3.3\pm 10\%$ P=5mBт
 $VT1=VT2=KT19A$
 $VD1=KП901A$
 $C1=3.3\pm 20\%$ Uр=15В

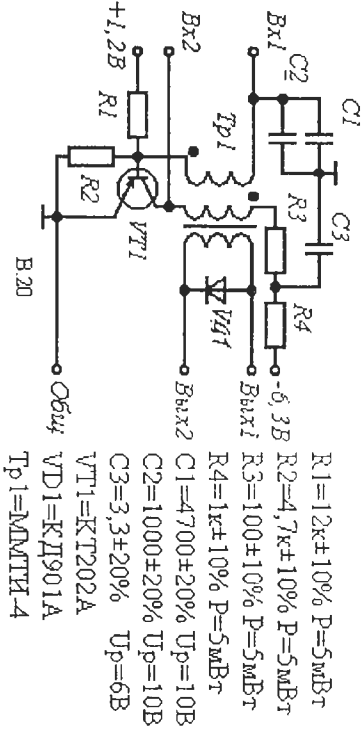


$R1=10\pm 10\%$ P=5mBт
 $R2=10\pm 10\%$ P=5mBт
 $R3=5.1\pm 10\%$ P=5mBт
 $R4=1.2\pm 10\%$ P=5mBт
 $VT1=KT202A$
 $C1=150\pm 20\%$ Uр=10В
 $C2=150\pm 20\%$ Uр=10В
 $L1=L2=500\text{мкГн}$

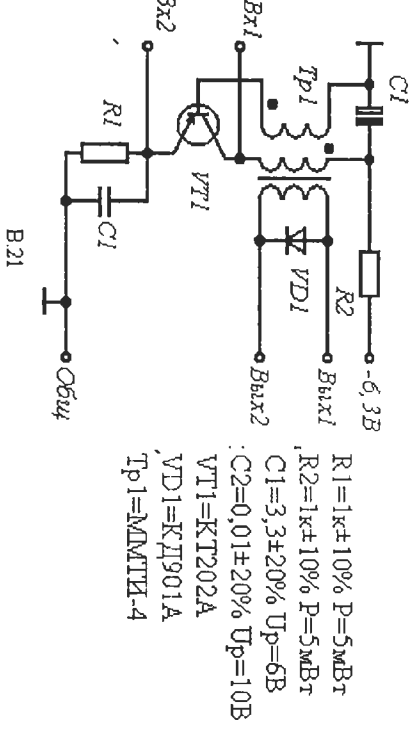
Рис. 5.1



$R1=3.6\pm 10\%$ P=5mBт
 $R2=50\pm 10\%$ P=5mBт
 $R3=1.2\pm 10\%$ P=5mBт
 $R4=100\pm 10\%$ P=5mBт
 $R5=R7=1.2\pm 10\%$ P=5mBт
 $R6=6.2\pm 10\%$ P=5mBт
 $VT1=VT2=VT3=KT202A$

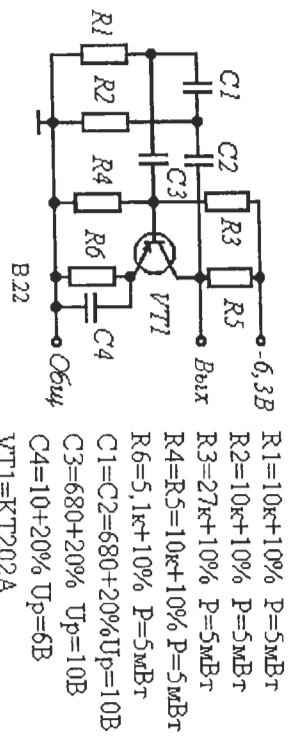


$R1=12\pm 10\%$ P=5mBт
 $R2=4.7\pm 10\%$ P=5mBт
 $R3=100\pm 10\%$ P=5mBт
 $R4=1\pm 10\%$ P=5mBт
 $C1=4700\pm 20\%$ Uр=10В
 $C2=1000\pm 20\%$ Uр=10В
 $C3=3.3\pm 20\%$ Uр=6В
 $VT1=KT202A$
 $VD1=KП901A$
 $Tp1=MMTTN-4$

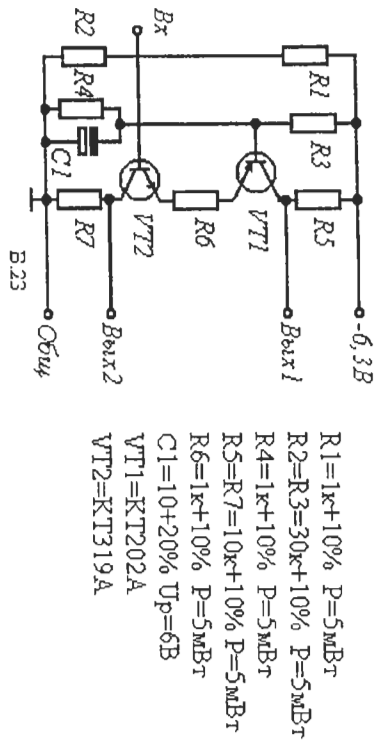


$R1=1\pm 10\%$ P=5mBт
 $R2=1\pm 10\%$ P=5mBт
 $C1=3.3\pm 20\%$ Uр=6В
 $C2=0.01\pm 20\%$ Uр=10В
 $VT1=KT202A$
 $VD1=KП901A$
 $Tp1=MMTTN-4$

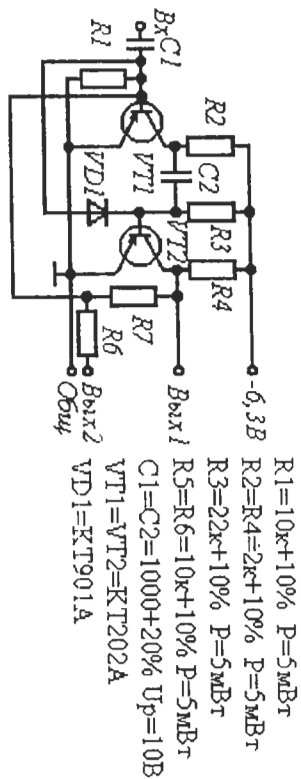
Рис. 5.1



В22



В23



В24

Рис.5.1

Матеріали резистивних плівок їх спектральні характеристики.

Додаток 1
Таблиця Д.1.1

Матеріал резистивної плівки	Матеріал контактних площадок	R ₀ , Ом/	P ₀ , Вт/см ²	ТКС·10 ² , 1/град	γ, % на 1 тис. годин, + 85 °С	Метод одержання плівки	
Хром ЗРХ	Хром-мідь-нікель	10-500	2,0	0,6-1,8	+(1,6-3,2)	Т.В.	
Ніхром Х20Н80	Ніхром-мідь-нікель	50-300	1,0	±2,0	+(1,1-1,3)	Т.В. Д.В.	
Тантал ТВЧ	Тантал-нікель; тантал-ванадій-алюміній; тантал-ніхром-мідь-нікель;	10-100	2,0	-2,0	-1,5	К.Р., ІП.Р.	
Сплав МУТ-3М	МУТ-ніхром-мідь-нікель.	200-500	2,0	±2	±0,5	Т.В., Д.В.	
Сплав РС-3710	РС-хром-(ніхром)-мідь-нікель;	100-2000	1,0	-(2-5)	±0,5	Т.В., Д.В.	
Сплав РС-3001	РС-хром-(ніхром)-мідь-нікель.	800-3000	1,0	-0,4	±0,5	Т.В., Д.В.	
Кермет-К-50С	Кермет-хром-(ніхром)-золото	1000-10000	2,0	(-5)-(±3)	±1,0	Д.В.	
Пр-20	Товсті плівки					±1,5	
Пр-100	20	3,0	(-8,0)-(±8,0)		±1,5		
Пр-1к	100	3,0	(-8,0)-(±8,0)		±1,5		
Пр-20к	1000	3,0	(-8,0)-(±8,0)		±1,5		
	20000	3,0	(-8,0)-(±8,0)		±1,5		

Примітки:

1. Максимально допустима температура плівки резисторів 125°С.
2. Матеріали контактних площадок зазначені в порядку чітковості нанесення на підложку, включаючи резистивний матеріал.
3. Т.В. - термічне випаровування; Д.В. - дискретне випаровування; К.Р. - катодічне розплення; ІП.Р. - іонно-плазмове розплення.

Продовження додат. 1
Таблиця Д.1.2
Матеріали п'ялькових провідників і контактних площинок.

Матеріал (підшар, шар, покривтя)	Товщина, нм	R _с , Ом/	Спосіб контактування, що рекомендується
Тонкі п'яльки			
Ніхром	50-30	0,02-0,04	Паяння мікропаяльником. Зварювання імпульсним непрямим нагріванням.
Мідь	600-800		
Нікель	80-120		
Ніхром	10-30	0,03-0,04	Паяння мікропаяльником. Зварювання імпульсним непрямим нагріванням.
Золото	600-800		
Ніхром	40-50	0,1-0,2	Паяння зварювальним електродом
Алюміній	250-350		Паяння
Нікель	50		
Ніхром	10-30		Паяння мікропаяльником.
Мідь	600-800	0,02-0,04	Зварювання імпульсним непрямим нагріванням.
Золото	50-60		
Ніхром	10-30	0,08-0,16	Ультразвукове зварювання.
Алюміній	300-600		
Алюміній	300-600	0,08-0,16	Ультразвукове зварювання.
Товсті п'яльки			
ПІТ-1	(1-2)·10 ³	0,05	Паяння мікропаяльником з попереднім покриттям прітосом.
ПІТ-2	(1-2)·10 ³	0,5	Паяння мікропаяльником

Додаток 1
Таблиця Д.1.3.

Методи формування малюнка мікросхем і мікробірок

Метод	Тип ІМС або мікробірки, ступінь інтеграції.	В _{мін./макс.} , мкм.	Δв, Δl, мкм.	Δеуміщ.	Вартість обладнання, тис.гр.	Продуктивність, пласт/год.
Вільна маска	Тонкоплівкові 1,2	20-50 (100, 300)	5-10 (5-10)	20-50	50	10
Контактна фотолітографія	Тонкоплівкові Напівпровідникові 1,2,3	2-3 (100)	± 0,5 (2-5)	1	30	50
Сумщений метод	Тонкоплівкові 1,2,3	20-50 (100-300)	5-10 (5-10)	20-50	50	10
Сіткографічний	Тонкоплівкові 1,2,3	200 (800)	50 (50)	100	35	50
Контактна маска	Тонкоплівкові 1,2	10-20	3-5	2-3	70	5
Проекційна літо- графія із зменше- нням масштабу зображення	Напівпровідникові, функціональні 3,4,5	1-2	± (0,25-0,5)	± 0,5	350	20
Послідовна електролітографія	Для створення фотошаблонів	0,5-1,0	± (0,05-0,1)	—	1500	20
Рентгенолітографія	Напівпровідникові, функціональні 3,4,5	0,2-0,4	± (0,1-0,25)	0,1-0,2	300	20

Примітка. Числа в дужках відносяться до тонкоплівкових ІМС.

Додаток 2
Таблиця Д.2.1

Матеріали діелектричних плівок і їх електрофізичні характеристики

Матеріал діелектричної плівки	ϵ_0 , пФ/мм□	Ур, В.	ϵ , $f=1$ кГц	$\lg \delta$, $f=1$ кГц	$E_{пр} 10^6$, В/мм	$f_{роб}$, мГц	ТКЕ 10^4 , $^{\circ}\text{C}^{-1}$, -60°+125°С	$\gamma_{ст.}$, % на 1000 год.	Метод отримання плівки
Тонкі плівки									
Монооксид кремію SiO	50-100	60-30	5-6	0,01-0,02	2-3	500	2	$\pm 1,5$	Т.В.
Монооксид германію GeO	50-150	10-5	11-12	0,005-0,007	1	300	3	± 2	Т.В.
Трьохсіркова сурьма Sb ₂ S ₃	50-200	10	13-14	0,005-0,01	0,7-2	300	5	3,0	Т.В.
Скло С44-1 електровакуумне	150-400	12-6	5,2	0,002-0,003	3-4	300	0,5-1	1,2	Т.В.
Боросилікатне скло SiO ₂ - В ₂ O ₃	25-150	24-8	4	0,001-0,0015	3-4	300	0,35	2,0	Т.В.
Аломосилікатне скло SiO ₂ - Al ₂ O ₃	150-500	12-6	8-10	0,002	2,5-4,5	300	-	1,5	Т.В.
Пятиоксид тантала Ta ₂ O ₅	1000-2000	10-3	23	0,01	1-2	10	2-3	-	Людодування
Товсті плівки									
ПД - 1 (два шари d = 30 мкм)	2-3	100	15	0,002	0,03-0,04		$\pm (2-3)$	$\pm 4,5$	-

Додаток 2
Таблиця Д.2.2

Електрофізичні характеристики підложок інтегрованих мікросхем

Параметри	Скло С41-1	Скло С48-3	Сигал СТ50-1	Кераміка 22 ХС	Високоглиноземиста глазурована кераміка	Полікор	Плавляний кварц	Синтетичний Сапфір	Берилієва кераміка
Густина, г/см ³	2,5	2,1	2,65	3,7	-	3,96	2,3	-	3,0
ТКЛ, $^{\circ}\text{C}^{-1} 10^{-7}$	39-43	46-50	47-51	60-70	38-45	75	55	80	70
Діелектрична проникність, $f=10^9$ Гц і $T=20^{\circ}\text{C}$	Не більше 7,5	3,7-8	5-8,5	Не більше 10,3	Не більше 10,3	9,1	3,8	9,3-11,7	6,4-9,5
$\lg \delta$, $f=10^9$ Гц і $T=20^{\circ}\text{C}$	Не більше $20 \cdot 10^{-4}$	Не більше $15 \cdot 10^{-4}$	$(2-20) \cdot 10^{-4}$	Не більше $6 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	-	$1 \cdot 10^{-4}$	-
Теплопровідність, Вт/м·град	0,8-1,3	0,8	1,2	8,4	1-1,5	23-38	4-15	25-40	140
Температура розм'якчення, $^{\circ}\text{C}$	910	750	620	1500	1900	-	1500	1900	1000
Припустиме значення питомої розсіюваної потужності, Вт/см ²	0,6	0,6	4,0	6,0	6,0	6,0	-	-	30
Питомий об'ємний електричний опір $f=20^{\circ}\text{C}$, Ом·см	10^{14}	10^{17}	10^{14}	10^{11}	10^{12}	10^{14}	-	-	10^{15}

Технологічні обмеження і конструкторські вимоги
на розроблення топології гібридної мікросхеми

Додаток 3
Таблиця Д.3.1.

Обмеження	Розмір, мм
Мінімальна відстань від краю підложки: до півкових елементів до краю отворів до компонента	0,2 1,0 0,4
Мінімальні розміри контактних площинок для монтажу напінних провідників у випадку: термокомпресійного зварювання однократного паяння багаторазового паяння	0,3×0,3 0,4×0,4 0,5×0,5
Мінімальна відстань від півкового елемента до компонента	0,5
Мінімальна відстань між компонентами	0,3
Максимальна довжина виводу компонента до контактної площадки	5,0
Мінімальна відстань між півковими елементами в одному шарі у випадку: вільної маски фотолітографії	0,2 0,1
Мінімальна ширина півкових провідників у випадку: вільної маски фотолітографії	0,1 0,05

ЛІТЕРАТУРА

1. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем: Учебник для вузов / Под ред. Ю. П. Ермолаева. - М.: Советское радио, 1980. - 256 с., ил.
2. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов по спец. "Конструирование и производство радиоаппаратуры" и "Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры" / Коледов Л. А., Волков В. А., Докучаев П. И. и др.; Под ред. Л. А. Коледова. - М.: Высш. Шк., 1984. - 231 с., ил.
3. Матсон Э. А., Крыжановский Д. В. Справочное пособие по конструированию микросхем. - Минск : Выш. школа, 1982. - 224 с., ил.
4. Пономарев М. Ф., Коноплив Б. Г. Конструирование и расчет микросхем и микропроцессоров: Учебное пособие для высших учебных заведений. М.: Радио и связь, 1986, - 176 с., ил.

ПЕРЕЛМОВА	
РОЗДІЛ 1	3
РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУЮВАННЯ ПЛІВКОВИХ РЕЗИСТОРІВ	4
1.1. Плівкові резистори	4
1.2. Вибір матеріалів резистора	6
1.3. Вибір методів нанесення шарів і формотворення	7
1.4. Розрахунки резистора	9
1.5. Визначення конфігурації резистора	11
1.6. Розрахунок ідентифікованих плівкових резисторів	14
1.6.1. Підстроювання високочастотного резистора	14
1.6.2. Підстроювання низькочастотного резистора	16
1.7. Особливості розрахунку товстошарових плівкових резисторів	17
1.8. Розрахунок контактної мережі плівкового резистивного смужка - контактиа цювання	17
1.9. Завачі	18
РОЗДІЛ 2	22
РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУЮВАННЯ ПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ	22
2.1. Плівкові конденсатори	22
За умов розміщення виводів з протилежних сторін конструкції конденсатора	25
2.2. Вибір матеріалів конденсатора	26
2.3. Вибір методів нанесення шарів і формотворення	27
2.4. Розрахунки конденсатора	28
2.5. Вибір форми конденсаторів	33
2.6. Завачі	34
РОЗДІЛ 3	38
РОЗРАХУНКИ І КОНСТРУЮВАННЯ ПЛІВКОВИХ ОДНОРІДНИХ РС-СТРУКТУР ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ	38
3.1. Плівкові РС – структури	38
3.2. Розрахунки однорідних РС-структур	40
3.3. Завачі	42
РОЗДІЛ 4	44
4.1. Плівкові індуктивні елементи	44
4.2. Розрахунки і конструювання індуктивних елементів	47
4.3. Завачі	51
РОЗДІЛ 5	52
РОЗРОБКА ТОПОЛОГІЇ	52
5.1. Етапи розроблення топології	52
5.2. Завачі	54
Додаток 1	63
Додаток 2	66
Додаток 3	68
ЛІТЕРАТУРА	69