

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Конструювання і технологія електронних
приладів та пристроїв»
для студентів спеціальності
«Електронні прилади та пристрої»**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Конструювання і технологія електронних
приладів та пристроїв»
для студентів спеціальності
«Електронні прилади та пристрої»**

Вінниця
ВНТУ
2017

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 23.10.2014 р.)

Рецензенти:

Т. Б. Мартинюк, доктор технічних наук, професор

С. Т. Барась, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Конструювання і технологія електронних приладів та пристроїв» для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої» / Уклад. Осадчук О. В., Крилик Л. В. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 56 с.

У методичних вказівках наведено основні теоретичні дані, вимоги до структури та захисту лабораторних робіт з дисципліни «Конструювання і технологія електронних приладів та пристроїв» та рекомендована література. Методичні вказівки розроблено відповідно до навчальної програми дисципліни «Конструювання і технологія електронних приладів та пристроїв».

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Лабораторна робота 1. Конструктивний розрахунок плівкових резисторів..... | 4 |
| Лабораторна робота 2. Конструктивний розрахунок плівкових конденсаторів..... | 17 |
| Лабораторна робота 3. Конструктивний розрахунок плівкових індуктивностей..... | 29 |
| Лабораторна робота 4. Розрахунок теплових режимів гібридної інтегральної мікросхеми | 35 |
| Лабораторна робота 5. Розрахунок вологозахисту гібридних інтегральних мікросхем..... | 41 |
| Лабораторна робота 6. Розробка топології гібридних інтегральних мікросхем..... | 45 |
| Література..... | 49 |
| Додаток А..... | 51 |
| Додаток Б..... | 52 |
| Додаток В..... | 53 |

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК ПЛІВКОВИХ РЕЗИСТОРІВ

Мета роботи: визначити геометричні розміри плівкового резистора, використовуючи його номінали та електрофізичні характеристики матеріалу.

Теоретичні відомості

Конструкції тонкоплівкових резисторів. Резистивні елементи плівкових гібридних мікросхем одержують нанесенням на підкладку резистивних смужок *1* різної конфігурації, які закінчуються контактними переходами *2*, утвореними резистивною смужкою й контактною площадкою *3* (рис. 1.1).

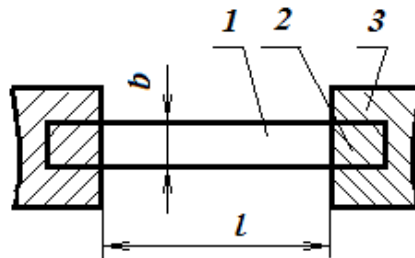


Рисунок 1.1 – Лінійчастий резистор

Якщо розрахункова довжина резистора виявляється надмірно великою і не може бути розміщена на підкладці в одну лінію, його виконують у вигляді вигнутих смужок (рис. 1.2, 1.3).

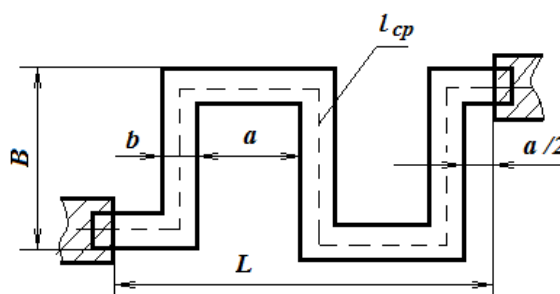


Рисунок 1.2 – Резистор типу меандр

Конструкція резистора, показаного на рис. 1.3, має більш високу точність порівняно з конструкцією, зображеною на рис. 1.2, однак займає більшу площу [1 – 8].

При масковому методі виготовлення резисторів відношення довжини смужки *l* до її ширини *b* (див. рис. 1.1 і 1.3) не повинно перевищувати 10.

Для резисторів форми меандр (див. рис. 1.2) відношення амплітуди меандра до відстані між смужками a також не повинно перевищувати 10. Ця вимога пояснюється необхідністю достатньої твердості маски для уникнення потрапляння пилу під неї, що може призвести до зменшення опору. При фотолітографічному методі ці співвідношення не критичні й залежать від площі, відведеної для резистора.

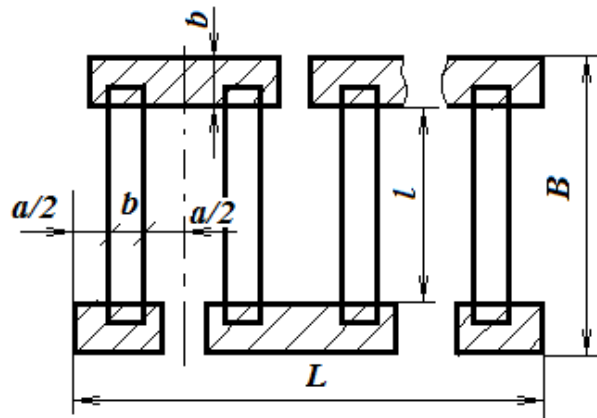


Рисунок 1.3 – Резистор типу меандр із провідними перемичками

Матеріали плівкових резисторів. Матеріали, застосовувані для виготовлення плівкових резисторів, повинні забезпечувати можливість одержання широкого діапазону стабільних у часі опорів, що мають низький температурний коефіцієнт опору й високу корозійну стійкість. Тонкоплівкові резистори можна виготовляти з металів, сплавів, напівпровідників і сумішей металів і неметалів (кермети).

Конструктивний розрахунок плівкових резисторів прямокутної форми (див. рис. 1.1). Конструктивний розрахунок резистора прямокутної форми зводиться до визначення розмірів його довжини l й ширини b . При цьому необхідно, щоб отриманий резистор при заданій величині опору забезпечив розсіювання заданої потужності P_a при забезпеченні необхідної точності γ_R в умовах існуючих технологічних можливостей [1 – 8].

Основним параметром плівкового резистора є коефіцієнт форми k_ϕ , що є відношенням довжини резистора l до його ширини b або відповідно опору R до питомого поверхневого опору $\rho_{кв}$:

$$k_\phi = \frac{l}{b} = \frac{R}{\rho_{кв}} . \quad (1.1)$$

Питома потужність, яку може розсіяти одиниця площі:

$$P_0 = \frac{P_a}{S}. \quad (1.2)$$

Розв'язуючи відносно b спільно рівняння (1.2) і (1.1) і пам'ятаючи, що $S = lb$, будемо мати:

$$b_P = \sqrt{\frac{\rho_{кв}}{R} \cdot \frac{P_a}{P_0}}, \quad (1.3)$$

де b_P – ширина резистора, розрахована з умови допустимої, питомої потужності P_0 , що розсіюється.

Розміри плівкового резистора виходять трохи відмінними від номінальних, тому що маски (фотошаблони) виготовлено з певною похибкою, яка визначається як [1, 2]:

$$\gamma_{k\phi} = \gamma_l + \gamma_b, \quad (1.4)$$

де $\gamma_{k\phi} = \frac{\Delta k_{\phi}}{k_{\phi}}$ – відносна похибка коефіцієнта форми;

$\gamma_l = \frac{\Delta l}{l}$ – відносна похибка відтворення довжини резистора;

γ_b – відносна похибка відтворення ширини резистора;

$\Delta l, \Delta b$ – абсолютні технологічні похибки відтворення розмірів резистора.

При масковому методі Δl й Δb мають порядок $\pm 0,01 \div 0,02$ мм. Плівка, нанесена на підкладку, виявляється нерівномірної за товщиною, що призводить до появи похибки відтворення питомого поверхневого опору $\gamma_{\rho_{кв}}$, який має величину $\pm 4 \div 5\%$. Аналізуючи формулу (1.1) можна показати, що

$$\gamma_R = \gamma_{\rho_{кв}} + \gamma_{k\phi}.$$

При зменшенні розмірів резистора похибка $\gamma_{k\phi}$ може досягти такої величини, що похибка резистора вийде за межі заданої похибки γ_R . Тому необхідно дотримувати співвідношення:

$$\gamma_{k\phi \text{ доп}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_{кв}}.$$

Звідки випливає

$$b_{\Delta \min} = \frac{\Delta b + \frac{\Delta l}{k_{\phi}}}{\gamma_{k_{\phi} \text{доп}}}, \quad (1.5)$$

де $b_{\Delta \min}$ – мінімальна ширина резистора, при якій забезпечується задана похибка.

Розрахункова ширина резистора $b_{\text{розрах}}$ повинна бути не менше тієї, яка може бути виконана при сучасному стані технології $b_{\text{техн}}$:

$$b_{\text{розрах}} \geq \max \{b_P, b_{\Delta}, b_{\text{техн}}\}. \quad (1.6)$$

За ширину резистора b беруть найближче до $b_{\text{розрах}}$ більше ціле значення, кратне кроку координатної сітки, прийнятому для креслення топології. Після остаточного вибору b визначається довжина резистора l , якщо $k_{\phi} > 1$:

$$l = b \cdot k_{\phi}.$$

Якщо $k_{\phi} < 1$, спочатку визначаються розміри $b_{\text{розрах}}$ за формулами [1, 2]:

$$l_P = \sqrt{\frac{R}{\rho_{\text{кв}}} \cdot \frac{P_a}{P_0}}, \quad (1.7)$$

$$l_{\Delta \min} = \frac{\Delta l + \Delta b k_{\phi}}{\gamma_{k_{\phi} \text{доп}}}, \quad (1.8)$$

$$l_{\text{розрах}} \geq \max \{l_P, l_{\Delta}, l_{\text{техн}}\}. \quad (1.9)$$

При масковому методі $b_{\text{техн}} = 0,2$ мм і $l_{\text{техн}} = 0,3$ мм. При фотолітографічному методі $l_{\text{техн}} = b_{\text{техн}} = 0,1$ мм.

При розрахунках плівкових резисторів необхідно враховувати зміни опору за рахунок температури γ_{R_T} й старіння $\gamma_{R_{\text{ст}}}$, а також за рахунок похибки, внесеної контактами γ_{R_k} . Таким чином, загальна похибка резистора

$$\gamma_R = \gamma_{\rho_{\text{кв}}} + \gamma_{k_{\phi}} + \gamma_{R_T} + \gamma_{R_{\text{ст}}} + \gamma_{R_k},$$

а допустима похибка k_ϕ

$$\gamma_{k_\phi \text{ доп}} = \gamma_R - \gamma_{\rho_{кв}} - \gamma_{R_T} - \gamma_{R_{cm}} - \gamma_{R_k}. \quad (1.10)$$

Величина $\gamma_{R_{cm}}$ береться з табл. 1.1 (див. додаток А). Величину γ_{R_k} для розрахунків можна взяти $1 \div 2\%$.

Температурна похибка $\gamma_{R_{cm}}$

$$\gamma_{R_T} = \alpha_R (t - 20^\circ \text{C}). \quad (1.11)$$

Вибір питомого поверхневого опору $\rho_{кв}$ може бути зроблений за графіком рис. 1.4.

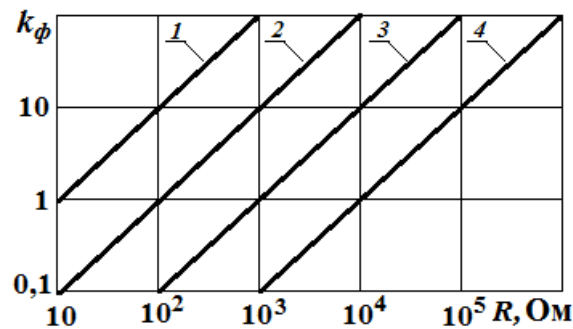


Рисунок 1.4 – Графік для вибору питомого поверхневого опору плівки:
 1 – $\rho_{кв} = 10$ Ом/кВ; 2 – $\rho_{кв} = 100$; 3 – $\rho_{кв} = 1000$; $\rho_{кв} = 10000$ Ом/кВ

Конструктивний розрахунок плівкових резисторів типу меандр. Проектування резисторів складної форми проводиться в тих випадках, коли коефіцієнт форми $k_\phi > 10$.

Вважаючи, що довжина резистора дорівнює довжині його середньої лінії (це допущення дає трохи завищений опір), маємо [1, 2]:

$$k_\phi = \frac{l_{cp}}{b}.$$

З рис. 1.2 випливає:

$$l_{cp} = n(a + b),$$

де n – число Z-подібних елементів,

$$L = n(a + b), \quad (1.12)$$

$$B = \frac{l_{cp} - an}{n}. \quad (1.13)$$

Площа, займана резистором разом з ізолювальною зоною, мінімальна, якщо резистор має квадратну форму, тобто $L = B$. Прирівнюючи вирази (1.12) та (1.13) і, розв'язуючи отримані співвідношення відносно n , одержимо

$$n = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 + \frac{l_{cp}}{2(a+b)}} - \frac{a}{2(a+b)}.$$

Позначимо $\frac{a}{b} = m$, тоді

$$n = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{m}{m+1} \right)^2 + \frac{l_{cp}}{b(m+1)}} - \frac{m}{2(m+1)}.$$

Величинами $\frac{1}{4} \left(\frac{m}{m+1} \right)^2$ й $\frac{m}{2(m+1)}$ порівняно з відношенням $\frac{l_{cp}}{b}$ можна зневажити, тоді

$$n = \sqrt{\frac{k_{\phi}}{m+1}}. \quad (1.14)$$

Зазвичай n у формулі (1.14) буває числом із дробовим залишком. Округляючи до найближчого цілого, визначаємо розміри резистора L' й B' за формулами (1.12) і (1.13).

На завершення необхідно перевірити умову забезпечення твердості маски [1, 2]:

$$\frac{B-b}{a} \leq 10. \quad (1.15)$$

Для фотолітографічного методу ця умова не критична.

Уточнений розрахунок резистора меандричної форми. Як вже відзначали, орієнтовний розрахунок дає трохи завищені значення опору, тому що через нерівномірність густини струму на вигинах дійсна довжина середньої лінії скорочується. Розглянемо Z -подібний елемент (рис. 1.5). Він складається із двох трапецієподібних елементів і одного паралелограма.

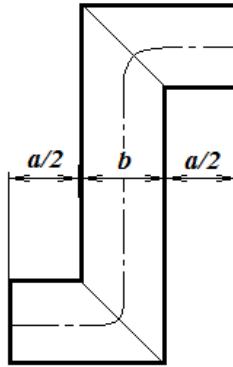


Рисунок 1.5 – Ланка резистора типу меандр

Коефіцієнт форми Z-подібного елемента

$$k_{\phi Z} = 2k_{\phi Tp} + k_{\phi \Pi}.$$

Коефіцієнт форми трапеції

$$k_{\phi Tp} = \frac{a}{2b} + \sigma_{Tp},$$

де σ_{Tp} для $\frac{a}{2b} < 0,4$ визначається із графіка рис. 1.6, а для $\frac{a}{2b} > 0,4$ береться рівним 0,29.

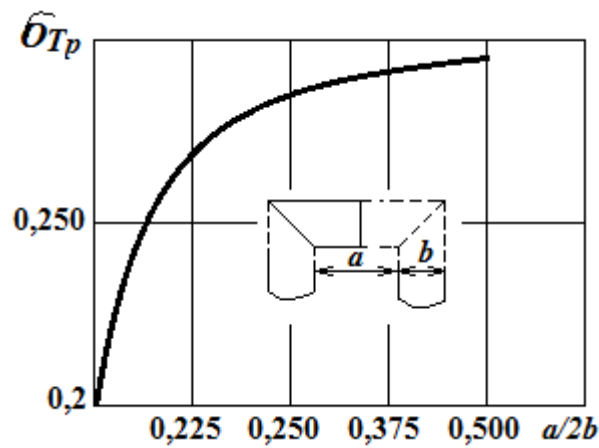


Рисунок 1.6 – Графік для визначення поправкового коефіцієнта σ_{Tp}

Коефіцієнт форми паралелограма [1, 2]:

$$k_{\phi \Pi} = \frac{B-b}{b} - \sigma_{\Pi},$$

де σ_{II} для $\frac{B-b}{b} < 3$ визначається із графіка рис. 1.7, а для $\frac{B-b}{b} > 3$ береться рівним 0,5. Таким чином, коефіцієнт форми Z-подібного елемента

$$k_{\phi Z} = \left(\frac{a}{b} + \frac{B}{b} \right) - (1 + \sigma_{II} - 2\sigma_{Tp}).$$

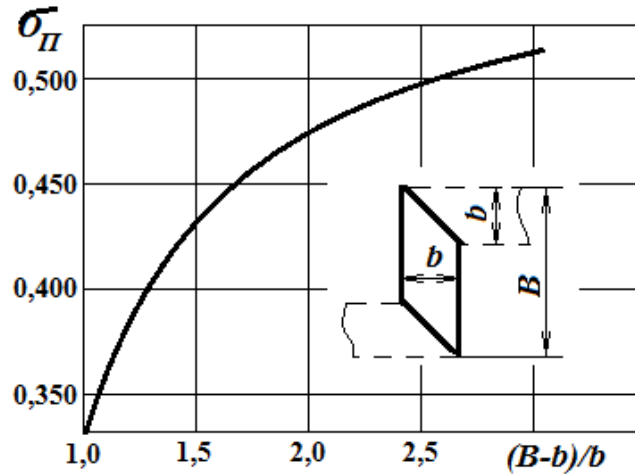


Рисунок 1.7 – Графік для визначення поправкового коефіцієнта σ_{II}

Опір резистора меандричної форми [1, 2]:

$$R_M = \rho_{кв} k_{\phi} n,$$

де $n = \frac{L}{a+b}$;

$$R_M = \frac{L}{a+b} \rho_{кв} \left[\frac{a}{b} + \frac{B}{b} - 1 + 2\sigma_{Tp} - \sigma_{II} \right].$$

Беручи $L=B$ і розв'язуючи останнє рівняння відносно L , при $m = \frac{a}{b}$ одержимо

$$L = -\frac{b(m-1+2\sigma_{Tp}-\sigma_{II})}{2} + \sqrt{\frac{b^2(m-1+2\sigma_{Tp}-\sigma_{II})^2}{4} + b^2 k_{\phi} (m+1)}. \quad (1.16)$$

Для більшості практичних випадків у меандричних резисторів $\frac{a}{2b} > 0,4$ і $\frac{B-b}{b} > 3$, тому можна вважаючи, що $\sigma_{Tp} = 0,29$ й $\sigma_{II} = 0,5$.

Тоді формула (2.16) спроститься й набуде вигляду [1, 2]:

$$L = b \left[\sqrt{\left(\frac{m-0,92}{2}\right)^2 + k_{\phi}(m+1)} - \frac{m-0,92}{2} \right].$$

Ширина резистора b визначається за формулами (1.3) і (1.5).

Розрахувавши L , визначаємо n за формулою (1.12). Якщо n виявиться із дробовим залишком, округляємо до найближчого цілого n' , після чого уточнюємо за тією ж формулою L' , а за формулою (1.13) визначаємо B . На завершення перевіримо умову (1.15).

Розрахунки резистора, що складається із прямокутних смужок, з'єднаних провідними перемичками (див. рис. 1.3). Як і в попередньому випадку, розглядаємо Z -подібний елемент, що складається із резистивної смужки шириною b та довжиною, що дорівнює $B - 2b$, і перемичок довжиною $\frac{a}{2}$ кожна.

Число елементів n визначається за формулою (1.12):

$$n = \frac{L}{a+b}.$$

Позначимо відношення $\frac{a}{b} = m$. Тоді опір складного резистора визначається як

$$R = n \rho_{кв} \frac{B-2b}{b}. \quad (1.17)$$

Підставивши у формулу (1.17) вираз (1.12) і взявши форму резистора у вигляді квадрата, визначимо довжину сторони резистора:

$$L = B = b \left[1 + \sqrt{1 + k_{\phi}(m+1)} \right].$$

Подальший розрахунок ведемо аналогічно попередньому випадку.

Конструювання плівкових резисторів підгону.

Наявність технологічних похибок ($\gamma_{\rho_{кв}}, \gamma_{k_{ф}}$) не дозволяє одержати плівкові резистори з точністю, що перевищує 10%. Тому в тих випадках, коли потрібна більш висока точність, необхідне підстроювання резистора за допомогою елементів підгону.

Найбільше застосування одержали конструкції, що дозволяють робити підгін за довжиною (для резисторів, що мають коефіцієнт форми більший одиниці) (рис. 1.8) і за шириною (для резисторів, що мають коефіцієнт форми менший одиниці) (рис. 1.9). В обох варіантах зміна опору резистора відбувається у бік збільшення. У першому випадку перерізуються провідні перемички, у другому – електронним або лазерним променем віддаляється резистивна плівка на ділянці b_p [1, 2].

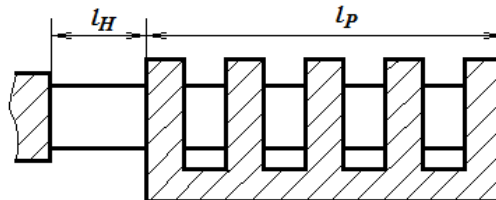


Рисунок 1.8 – Резистор, що підганяється за довжиною:
 l_H – нерегульована ділянка резистора; l_p – регульована ділянка підгону

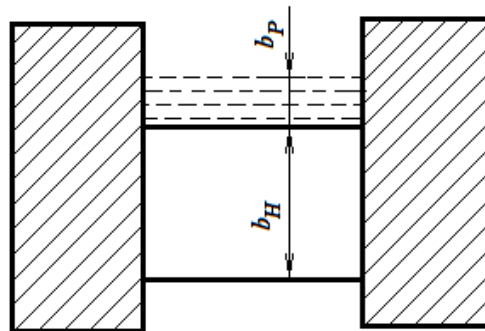


Рисунок 1.9 – Резистор, що підганяється за шириною:
 b_H – нерегульована ділянка; b_p – ділянка підгону

Конструктивний розрахунок плівкового резистора підгону за довжиною (див. рис. 1.8). Довжина нерегульованої ділянки l_H розраховується з умови одержання найбільшого можливого опору R_{max} при найбільшому питомому опорі $\rho_{кв max}$ й найменшій ширині b_{min} . При виготовленні резистора зазначені геометричні й технологічні параметри можуть виявитися

оберненими, тобто $\rho_{кв\min}$, b_{\max} . У цьому випадку опір резистора буде менший припустимої величини. Підгонка в допуск проводиться шляхом послідовного включення підгінних секцій.

Оскільки опір резистора повинен знаходитись в межах допуску в процесі старіння й у діапазоні температур, то найбільші й найменші значення опору розраховуються за формулами [1, 2]:

$$R_{\max} \approx R \left(1 + \frac{\gamma_R - \gamma_{R_T} - \gamma_{R_{cm}}}{100} \right), \quad (1.18)$$

$$R_{\min} \approx R \left(1 - \frac{\gamma_R - \gamma_{R_T} - \gamma_{R_{cm}}}{100} \right), \quad (1.19)$$

якщо при старінні опір може змінюватися в будь-яку сторону і набуває значення

$$R_{\min} = R \left(1 - \frac{\gamma_R + \gamma_{R_T}}{100} \right), \quad (1.20)$$

то в даному випадку при старінні опір резистора збільшується.

Кількість секцій підгону, кожна з яких має опір не більше абсолютного допуску, виражається такими формулами.

Для симетричного $\gamma_{R_{cm}}$

$$n = \frac{\gamma_{\rho_{кв}} + \gamma_{k_{\phi}}}{\gamma_R - \gamma_{R_{cm}}}. \quad (1.21)$$

Для позитивного $\gamma_{R_{cm}}$

$$n = \frac{2(\gamma_{\rho_{кв}} + \gamma_{k_{\phi}})}{2R - \gamma_{R_{cm}}}, \quad (1.22)$$

де $\gamma_{k_{\phi}}$ – відносна похибка k_{ϕ} :

$$\gamma_{k_{\phi}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}.$$

Довжина нерегульованої частини резистора

$$l_H = \frac{R_{\max} b_{\min}}{\rho_{кв\max}} - \Delta l. \quad (1.23)$$

Найменше значення опору резистора при довжині l_H

$$R'_{\min} = \frac{\rho_{\kappa\epsilon \min} l_H}{b_{\max}}. \quad (1.24)$$

Для підгону опору резистора в допуск необхідно компенсувати (збільшити) опір отриманого резистора на величину

$$\Delta R = R_{\min} - R'_{\min}. \quad (1.25)$$

Опір кожної підгінної секції

$$r_{\text{нидг}} = \frac{\Delta R}{n}. \quad (1.26)$$

Довжина однієї підгінної секції

$$l_{\text{нидг}} = \frac{r_{\text{нидг}} b_{\max}}{\rho_{\kappa\epsilon \min}}. \quad (1.27)$$

Загальна (електрична) довжина резистора

$$l_{\text{заг}} = l_H + l_{\text{нидг}} n. \quad (1.28)$$

Конструктивний розрахунок плівкового резистора підгону за шириною (див. рис. 1.10). Вихідна ширина резистора b_0 визначається з умови одержання максимального опору R_{\max} при максимальних $\rho_{\kappa\epsilon \max}$ і l_{\max} :

$$b_0 = \frac{l_{\max} \rho_{\kappa\epsilon \max}}{R_{\max}}. \quad (1.29)$$

При виготовленні резистора може виявитися, що отримано $\rho_{\kappa\epsilon \min}$ й l_{\min} . Тоді опір резистора [1, 2]:

$$R'_{\min} = \frac{l_{\min} \rho_{\kappa\epsilon \min}}{b_0}$$

виявиться менше заданого R_{\min} . Різницю

$$\Delta R = R_{\min} - R'_{\min}$$

необхідно компенсувати сходинками, де опір кожної сходинки набуває значення

$$r = \frac{\Delta R}{n}, \quad (1.30)$$

n визначається за формулою (1.21) або (1.22).

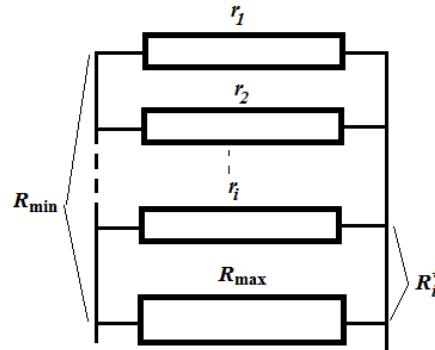


Рисунок 1.10 – Еквівалентна схема резистора підгону за шириною

При паралельному з'єднанні підгінних секцій опір i -ої секції (див. рис. 1.9) визначається за формулою [1, 2]:

$$r_i = R_i^* \left(1 + \frac{R_i^*}{r} \right), \quad (1.31)$$

де R_i^* – опір резистора після видалення чергової підгінної секції:

$$R_i^* = R'_{\min} + nr; \quad (1.32)$$

n – кількість підгінних секцій, що визначається за формулою (1.21) або (1.22)

$$\Delta b_i = \frac{\rho_{\text{кв min}} l_{\text{min}}}{r_i}. \quad (1.33)$$

Ширина регульованої зони

$$b_p = \sum_{i=1}^n b_i. \quad (1.34)$$

Завдання

Використовуючи номінали резисторів електричної схеми, що підлягає розробленню, та електрофізичні характеристики матеріалу (див. табл. 1.1,

додаток А), розрахувати геометричні розміри тонкоплівкових резисторів як прямокутної, так і меандричної форми та провести їх уточнення і підгін.

Звіт повинен містити

1. Вихідні дані.
2. Конструктивний розрахунок плівкових резисторів.
3. Креслення резистора.
4. Лістинг програми.
5. Результати тестування.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Навести конструкції тонкоплівкових резисторів.
2. Яка технологія використовується для виготовлення тонкоплівкових резисторів ?
3. Які матеріали використовуються для виготовлення тонкоплівкових резисторів і які вимоги висуваються до них ?
4. В якому випадку проводиться уточнений розрахунок резистора меандричної форми ?
5. Наведіть методику конструктивного розрахунку плівкового резистора, що підганяється за довжиною.
6. Наведіть методику конструктивного розрахунку плівкового резистора, що підганяється за шириною.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК ПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ

Мета роботи: визначити геометричні розміри плівкового конденсатора, використовуючи його номінали та електрофізичні характеристики матеріалу.

Теоретичні відомості

В тонкоплівкових мікросхемах конденсатори утворюються у вигляді тришарової структури: дві провідні плівки й одна діелектрична. Принципово можливо конструювати конденсатори й у вигляді багатошарової структури, у цьому випадку ємність збільшується в $(n - 1)$ раз, де n – чис-

ло провідних обкладинок, однак при цьому зростають імовірність виходу бракованих конденсаторів і їх вартість. Електрофізичні параметри плівкового конденсатора повністю визначаються властивостями матеріалів діелектрика й обкладинок.

Матеріали діелектрика й обкладинок разом з геометричними розмірами визначають ємність і його втрати:

$$C = 0,0884\varepsilon \frac{S}{d}, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_D + \frac{2}{3} \omega CR. \quad (2.2)$$

У формулі (2.2) другий доданок являє собою втрати конденсатора за рахунок втрат в обкладинках.

На дуже високих частотах ємність конденсатора спадає, при різносторонньому включенні (рис. 2.1) – у p раз:

$$C_B = \frac{C}{p},$$

де C – ємність, розрахована за формулою (2.1);
 p – характеристика конденсатора:

$$p = \sqrt{\omega CR};$$

при однобічному включенні (рис. 2.2) його ємність спадає в $2p$ раз:

$$C_B = \frac{C}{2p}.$$

Тому плівкові конденсатори великої ємності на частотах понад 10^8 Гц ($p > 5$) застосовувати не слід, крім випадків, коли втрати не відіграють помітної ролі [1 – 8].

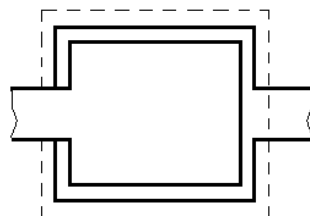


Рисунок 2.1 – Плівковий конденсатор з різностороннім включенням

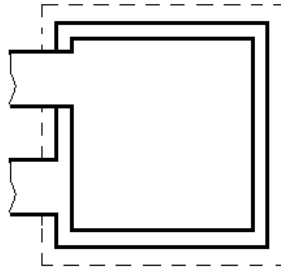


Рисунок 2.2 – Плівковий конденсатор з однобічним включенням

Матеріали плівкових конденсаторів. До матеріалів, використовуваних як діелектрик плівкових конденсаторів, висуваються такі вимоги:

- 1) під час процесу напилювання він не повинен розкладатись;
- 2) випар повинний відбуватися при температурі від 1000 до 1800 °С, тому що при дуже низькій температурі висока рухливість атомів, а при високій виникають технологічні утруднення;
- 3) матеріал не повинен бути гігроскопічним або розчинним у воді;
- 4) матеріал діелектрика повинен мати хорошу адгезію з діелектричною підкладкою і металевими обкладинками, бути щільним і не піддаватися механічному руйнуванню при впливі температурних циклів.

Ці вимоги майже повністю виключають органічні діелектрики.

Найбільш часто застосовують моноокис кремнію SiO_2 , трисірчасту сурму Sb_2S_3 , моноокис германію GeO_2 . Для одержання конденсаторів великої ємності використовують анодовані плівки танталу Ta_2O_5 , а також анодований алюміній Al_2O_3 . Можливе застосування плівок титанату барію ($\epsilon \approx 1000$), а також рідкісноземельних боросилікатів. Найкращим матеріалом для обкладинок плівкового конденсатора є алюміній. Порівняно з іншими металами (мідь, нікель, золото) алюміній дає менше число коротких замикань. Матеріалом обкладинок конденсаторів з Ta_2O_5 є металевий тантал. Характеристики матеріалів плівкових конденсаторів наведені в табл. 2.1 (див. додаток Б).

Конструкції плівкових конденсаторів. Як вже відзначали, плівкові конденсатори можуть бути багатошаровими й одношаровими. Багатошарові конденсатори виконуються для розрахункової площі $> 1 \div 2 \text{ мм}^2$. Конденсатори, що мають розрахункову площу понад 5 мм^2 , виконуються згідно з рис. 2.1 і 2.3. При розрахунковій площі від 1 до 5 мм^2 вони виконуються у вигляді двох взаємопересічних смужок, причому для врахування крайового ефекту площа повинна бути зменшена в k раз згідно з рис. 2.4 [1 – 8]:

$$C = 0,0844\epsilon \frac{S}{kd}.$$

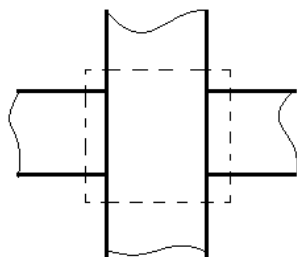


Рисунок 2.3 – Конструкція конденсатора з розрахунковою площею від 1 до 5 мм²

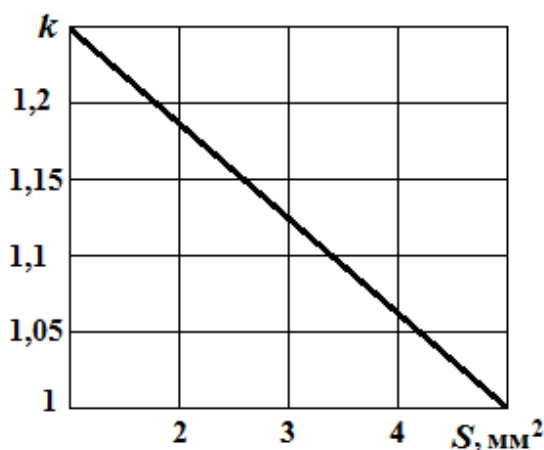


Рисунок 2.4 – Залежність поправкового коефіцієнта від площі конденсатора

Якщо розрахункова площа менша 1 мм², можна виконувати конденсатор у вигляді послідовно з'єднаних конденсаторів (рис. 2.5 і 2.6).

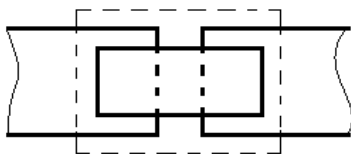


Рисунок 2.5 – Конструкція конденсатора, що складається з двох послідовно з'єднаних конденсаторів

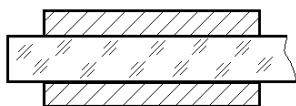


Рисунок 2.6 – Конденсатор, що створений двома обкладинками і підкладкою як діелектрик

Якщо розрахункова площа занадто мала й не дозволяє виконати конденсатор у прийнятних розмірах, можна використовувати як діелектрик підкладку мікросхеми, і при цьому виконати один конденсатор заданої ємності або послідовне з'єднання двох або більше конденсаторів (рис. 2.7 і 2.8). Така конструкція дозволяє одержати ємність близько декількох пікофарадів на 1 см^2 площі [1, 2].

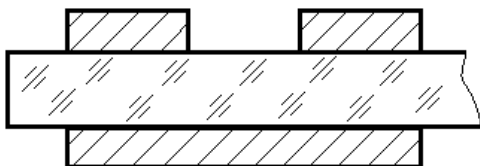


Рисунок 2.7 – Конденсатор, складений з двох послідовно з'єднаних конденсаторів, що використовують підкладку як діелектрик

Для одержання ще менших значень ємності (частки пікофарада) можна виконати гребінчасті конденсатори (рис. 2.8) або конденсатори у вигляді двох паралельних смужок (рис. 2.9).

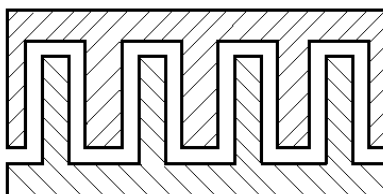


Рисунок 2.8 – Гребінчастий конденсатор

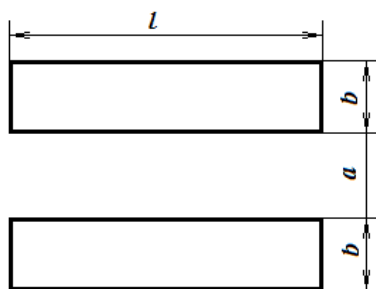


Рисунок 2.9 – Конденсатор у вигляді двох паралельних смужок

Ємність гребінчастого конденсатора визначається за формулою:

$$C = \beta \epsilon_p l,$$

де β – коефіцієнт, що визначається за графіком, наведеним на рис. 2.10;

l – довжина загальної границі двох гребінок;
 ε_p – результувальна проникність підкладки й середовища (повітря або заливання) [1, 2]:

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{II} + \varepsilon_C}{2},$$

де ε_{II} – проникність підкладки;
 ε_C – проникність середовища.

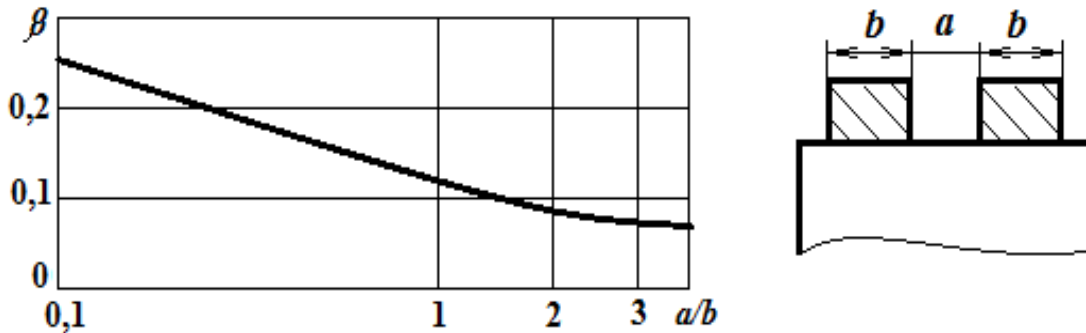


Рисунок 2.10 – Поправковий коефіцієнт для розрахунків гребінчастого конденсатора різної структури

Конструктивний розрахунок пліткових конденсаторів. Конструктивний розрахунок конденсатора зводиться до визначення його геометричних розмірів S , d і питомої ємності C_0 . Розрахований конденсатор повинен задовольняти вимогу електричної міцності U_p й заданої точності γ_C .

Похибка конденсатора (див. рис. 2.1) визначається за формулою:

$$\gamma_C = \gamma_S + \gamma_{C_0} + \gamma_{CT} + \gamma_{CCT},$$

де γ_C – відносна похибка конденсатора, що задається при розрахунках;
 γ_S – відносна похибка відтворення площі конденсатора:

$$\gamma_S = \frac{\Delta A}{\sqrt{S}} \left(\sqrt{k_\phi} + \frac{1}{\sqrt{k_\phi}} \right),$$

ΔA – абсолютна похибка відтворення розмірів контуру конденсатора;
 γ_{CT} – відносна похибка конденсатора за рахунок зміни температури навколишнього середовища [1, 2]:

$$\gamma_{CT} = \alpha_C (t - 20^\circ C), \quad (2.3)$$

α_C – температурний коефіцієнт ємності, 1/град. (див. див. додаток Б);

γ_{CCT} – відносна похибка конденсатора, обумовлена його старінням, % (див. додаток Б).

Для забезпечення заданої точності ємності при виготовленні конденсатора необхідно, щоб виконувалася умова [1, 2]:

$$\frac{\Delta A}{\sqrt{S}} \left(\sqrt{k_\phi} + \frac{1}{\sqrt{k_\phi}} \right) \leq \gamma_{S_{\text{дон}}}, \quad (2.4)$$

де

$$\gamma_{S_{\text{дон}}} = \gamma_C + \gamma_\omega - \gamma_{CT} - \gamma_{CCT}. \quad (2.5)$$

Зазначимо, що $S = \frac{C}{C_0}$. Розв'язавши вираз (2.4) відносно C_0 , одержимо

$$C'_{0\text{max}} \leq C \left(\frac{\gamma_{S_{\text{дон}}}}{\Delta A} \right)^2 \frac{k_\phi}{(1+k_\phi)^2}. \quad (2.6)$$

де $C'_{0\text{max}}$ – максимальне значення питомої ємності, яке може бути прийняте при заданих γ_S ;

ΔA – абсолютна похибка відтворення розмірів верхньої обкладинки конденсатора.

В окремому випадку, коли $k_\phi = 1$, (2.6) набуває вигляду:

$$C'_{0\text{max}} \leq C \left(\frac{\gamma_{S_{\text{дон}}}}{2\Delta A} \right)^2. \quad (2.7)$$

Конденсатор, крім критерію заданої похибки, повинен витримувати задану робочу напругу U_p :

$$U_p = \frac{E_{\text{ПП}d}}{k}, \quad (2.8)$$

де U_p – робоча напруга, В;

$E_{\text{ПП}}$ – пробивна напруга В/см;

k – коефіцієнт запасу, рівний $2 \div 4$.

Зі співвідношення (2.8) випливає

$$d = \frac{U_p k}{E_{ПР}}. \quad (2.9)$$

Питома ємність конденсатора

$$C_0'' = 0,0884 \varepsilon \frac{1}{d}. \quad (2.10)$$

Випливає, що для відповідності $C_{0\text{розрах}}$ умові [1, 2]:

$$C_0' > C_{0\text{розрах}} < C_{0\text{max}}'', \quad (2.11)$$

необхідно, щоб розрахункове $C_{0\text{розрах}}$ було менше розрахованих за формулами (2.7) і (2.10).

Уточнена товщина діелектрика

$$d_{\text{розрах}} \geq 0,0884 \frac{1}{C_{0\text{розрах}}}.$$

З міркувань електричної міцності d повинно бути не менше 0,3 ÷ 0,5 мкм, але не більше 1 мкм. Більш товсті плівки відшаровуються від підкладки. Після остаточного вибору d уточнюється $C_{0\text{розрах}}$ за формулою (2.10).

Розміри верхньої обкладинки конденсатора визначаються за формулами:

$$A_B = \sqrt{S k_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma S_{\text{дон}}} (1 + k_\phi);$$

$$B_B = \frac{A}{k_\phi} = \frac{A}{\gamma S_{\text{дон}}} \cdot \frac{1 + k_\phi}{k_\phi}.$$

Розміри нижньої обкладинки не повинні виходити за межі верхньої через похибки базування, абсолютну похибку і похибки виготовлення обкладинок конденсатора ΔA , тобто:

$$A_H = A_B + 2(\Delta A + \eta); \quad (2.12)$$

$$B_H = B_B + 2(\Delta A + \eta). \quad (2.13)$$

Діелектрик також повинен перекривати нижню обкладинку на ту ж величину:

$$A_D = A_H + 2(\Delta A + \eta), \quad (2.14)$$

$$B_D = I_H + 2(\Delta A + \eta). \quad (2.15)$$

Конструювання плівкових конденсаторів підвищеної точності. При серійному виробництві конденсаторів точність, що досягається, становить $15 \div 20\%$. У тих випадках, коли необхідно мати конденсатори більш високої точності, їх конструюють із елементами підгону. Можливі варіанти конденсаторів, що підганяються, наведені на рис. 2.11.

У конструкціях, зображених на рис. 2.11, *а* й *б*, підгін ведеться у бік зменшення ємності. У конструкції рис. 2.11, *в* можливі регулювання в обидва боки. Конденсатор розраховується таким чином, щоб після напильювання його повна ємність могла перевищувати найбільше граничне значення, а підгін ємності в заданий допуск здійснювався від'єднанням підгінних секцій [1, 2].

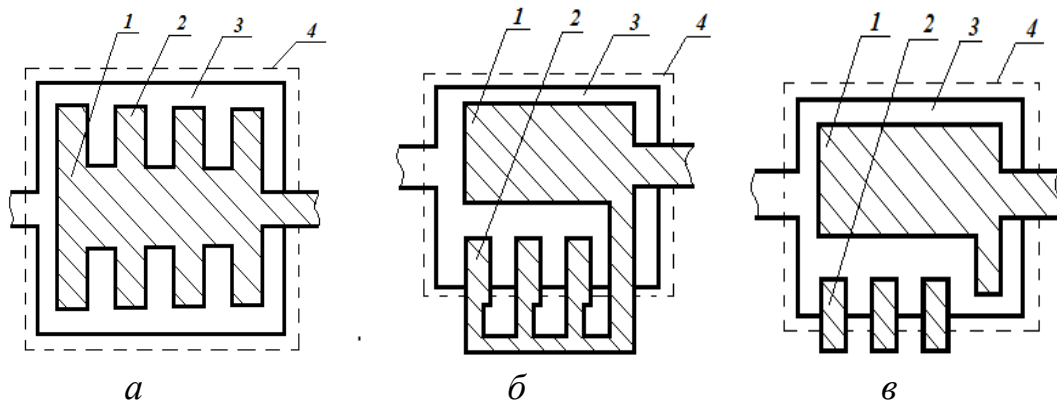


Рисунок 2.11 – Конструкції підгінних конденсаторів: *а, б* – підгін шляхом відрізання підгінних елементів; *в* – підгін шляхом перепаювання підгінних секцій: 1 – верхня обкладинка; 2 – підгінні секції; 3 – нижня обкладинка; 4 – діелектрик

Вихідними даними при розрахунках конденсаторів, що підганяються, є: C – номінальна ємність; U_p – робоча напруга; γ_C – відносна похибка; f – робоча частота; $tg\delta$ – тангенс втрат.

Як і при розрахунках резисторів, що підганяються, визначаються найбільше й найменше значення ємності:

$$C_{\max} = C \left(1 + \frac{\gamma_C - \gamma_{CT} - \gamma_{CCT}}{100} \right), \quad (2.16)$$

$$C_{\min} = C \left(1 - \frac{\gamma_C + \gamma_{CT} - \gamma_{CCT}}{100} \right). \quad (2.17)$$

Кількість підгінних секцій

$$n = \frac{\gamma_{C_0} + \gamma_S}{\gamma_C - \gamma_{CCT}}. \quad (2.18)$$

де γ_{CT} – відносна похибка ємності конденсатора за рахунок зміни температури навколишнього середовища, розрахована за формулою (2.3); γ_{CCT} – похибка старіння, береться з табл. 2.1 (див. додаток Б).

Максимальне й мінімальне значення питомої ємності [1, 2]:

$$C_{\max} = C_0 \left(1 + \frac{\gamma_{C_0}}{100} \right), \quad (2.19)$$

$$C_{\min} = C_0 \left(1 - \frac{\gamma_{C_0}}{100} \right). \quad (2.20)$$

Вибір матеріалу діелектрика, визначення товщини діелектрика й C_0 проводиться за співвідношеннями (2.9) – (2.10).

Найбільша можлива площа конденсатора визначається при C_{\min} й $C_{0\min}$:

$$S_{\max} = \frac{C_{\min}}{C_{0\min}}. \quad (2.21)$$

Максимально можлива ємність при цій площі

$$C'_{\max} = S_{\max} C_{0\max} \quad (2.22)$$

буде більша за C_{\max} , розраховану за формулою (2.16).

Ємність, яку необхідно компенсувати в процесі підгону,

$$\Delta C = C'_{\max} - C_{\max}. \quad (2.23)$$

Площа нерегульованої (основної) частини конденсатора

$$S_{осн} = \frac{C_{\max}}{C_{0\max}}. \quad (2.24)$$

Площа однієї регулювальної секції

$$S_{секц} = \frac{\Delta C}{nC_{0\max}}. \quad (2.25)$$

Розміри основної (нерегульованої) частини конденсатора визначаються за формулами [1, 2]:

$$L_B = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{2}\right)^2 (1+k_\phi)^2 + S_{осн}k_\phi} - \frac{\Delta L}{2}(1+k_\phi);$$

$$B_B = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{2}\right)^2 \left(\frac{1+k_\phi}{k_\phi}\right)^2 + \frac{S_{осн}}{k_\phi}} - \frac{\Delta L}{2} \left(\frac{1+k_\phi}{k_\phi}\right).$$

У конденсаторах досить великої ємності першим доданком під коренем можна зневажити, тоді

$$L_B = \sqrt{S_{осн}k_\phi} - \frac{\Delta L}{2}(1+k_\phi);$$

$$B_B = \sqrt{\frac{S_{осн}}{k_\phi}} - \frac{\Delta L}{2} \left(\frac{1+k_\phi}{k_\phi}\right).$$

Для конденсаторів квадратної форми $k_\phi = 1$.

У цьому випадку розміри верхньої обкладки

$$L_B = B_B = \sqrt{S_{осн}} - \Delta L. \quad (2.26)$$

Прийнявши квадратну форму секції, розміри регулювальної секції можна розрахувати за формулою

$$h = b = \sqrt{S_{секц}}. \quad (2.27)$$

Габаритні розміри верхньої обкладинки конденсатора, що підганяється, визначаються виразами:

якщо підгінні секції розташовуються по обидва боки обкладинки:

$$\begin{aligned}L'_B &= L_B + h; \\ B'_B &= B_B + 2h;\end{aligned}$$

якщо підгінні секції розташовуються по одній стороні,

$$B'_B = B_B + h.$$

Розміри нижньої обкладки й діелектрика визначаються за формулами (2.12) – (2.15).

Завдання

Використовуючи номінали конденсаторів електричної схеми, що підлягає розробці, та електрофізичні характеристики матеріалу (див. додаток Б), розрахувати геометричні розміри тонкоплівкових конденсаторів.

Звіт повинен містити

1. Вихідні дані.
2. Конструктивний розрахунок плівкових конденсаторів.
3. Креслення конденсатора.
4. Лістинг програми.
5. Результати тестування.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Навести конструкції тонкоплівкових конденсаторів.
2. Яка технологія використовується для виготовлення тонкоплівкових конденсаторів ?
3. Які матеріали використовуються для виготовлення тонкоплівкових конденсаторів і які вимоги висуваються до них ?
4. В якому випадку проводиться конструювання плівкових конденсаторів підвищеної точності? Яка їх особливість?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК ПЛІВКОВИХ ІНДУКТИВНОСТЕЙ

Мета роботи: визначити геометричні розміри плівкової індуктивності, використовуючи її номінали та електрофізичні характеристики матеріалу.

Теоретичні відомості

Для комплексної мініатюризації радіоелектронної апаратури поряд із плівковими резисторами й конденсаторами необхідно мати й плівкові індуктивні елементи. Зменшення розмірів індуктивних елементів веде до зменшення їх самоіндукції, тому що остання залежить від площі, охопленої елементом. Реально на площі 1 см^2 можна виконати елемент із індуктивністю не більше 1 мкГн , використовуваний на частотах не нижче $40 - 50 \text{ МГц}$. При більших значеннях індуктивності слід застосовувати навісні котушки індуктивності з феромагнітними сердечниками.

Конструкції плівкових елементів індуктивності. Можливими конструктивними рішеннями плівкових індуктивних елементів можуть бути: лінійчаста смужка (див. рис. 3.1, а), одновиткова кругла петля (див. рис. 3.1, б), одновиткова квадратна петля (див. рис. 3.1, в), багатовиткова кругла спіраль (див. рис. 3.1, г), багатовиткова квадратна спіраль (див. рис. 3.1, д) [1, 2].

Формули для розрахунків індуктивності. Розглянемо формули, які використовуються для розрахунків зазначених вище конструкцій елементів. Формули ці напівемпіричні й забезпечують точність у кілька відсотків. При користуванні ними слід ураховувати таке:

- головним фактором, що визначає одновиткову петлю, є площа, укладена в площині петлі;
- для заданої площі кругла петля відповідає найменшій довжині провідника й, отже, найбільш високій добротності Q ;
- у багатовитковій спіралі, якщо зв'язок між витками досить сильний, індуктивність зростає пропорційно квадрату числа витків;
- у формулах, що наводяться, усі розміри подано в сантиметрах, індуктивність – у мікрогенрі, логарифми натуральні.

Самоіндукція лінійчастої смужки визначається за формулою [1, 2]:

$$L = 0,002l \left(\ln 2 \frac{l}{b} + 0,5 + 0,224 \frac{b}{l} \right). \quad (3.1)$$

Смужка довжиною 1 мм і шириною 0,1 мм має індуктивність близько 0,7 нГн.

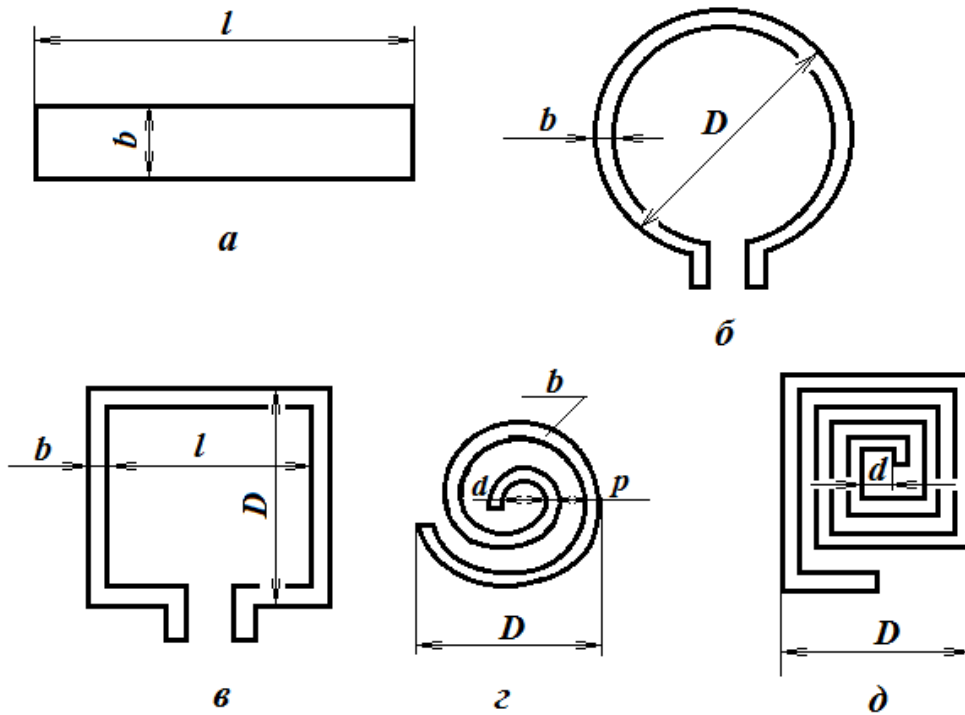


Рисунок 3.1 – Плівкові елементи індуктивності

Одновиткові петлі будь-якої конфігурації можуть бути розраховані за виразом:

$$L = 0,002l(\ln A - B), \quad (3.2)$$

де $A = 2\frac{l}{b}$ для прямокутних провідників шириною b , причому $b \gg t$,

t – товщина провідника;

$B = 2,451$ – для кола; $B = 2,561$ – для правильного восьмикутника; $B = 2,636$ – для правильного шестикутника; $B = 2,712$ – для правильного п'ятикутника; $B = 2,853$ – для квадрата; $B = 3,197$ – для рівностороннього трикутника.

Плоска кругова спіраль розраховується за класичною формулою:

$$L = 0,004\pi N^2 a \left\{ \left(\ln \frac{8a}{c} - 0,5 \right) + \frac{1}{24} \left(\ln \frac{8a}{c} + 3,583 \right) \left(\frac{c}{a} \right)^2 \right\}, \quad (3.3)$$

де N – число витків спіралі;

$$a = \frac{1}{4}(D + d); \quad (3.4)$$

$$c = \frac{1}{2}(D - d) \quad (3.5)$$

є середній радіус спіралі.

Для випадку, коли $d = 0$, тобто коли спіраль починається від центра, формула (3.3) спрощується:

$$L = 0,00345DN^2.$$

Однак конструкторові частіше доводиться вирішувати обернене завдання: за заданими індуктивності L , добротності Q й частоти f визначити геометричні розміри – зовнішній діаметр спіралі D , ширину провідника b , його товщину t , крок спіралі h й число витків N .

Орієнтовний розрахунок розмірів індуктивного елемента. Для розрахунків використовують номограму [1]. Задаючись розмірами котушки D й d , за формулами (3.4) і (3.5) розраховуємо параметри a й c . Потім по номограмі визначимо число витків N .

Крок спіралі

$$h = \frac{c}{N}. \quad (3.6)$$

З рис. 3.1, з впливає, що

$$h = b + p,$$

де b – ширина провідника;
 p – відстань між витками.

Добротність котушки

$$Q = \frac{4fLbht}{\rho d^2 \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right)}, \quad (3.7)$$

де f – частота, Гц;

L – індуктивність, Гн;

ρ – питомий опір, Ом·см.

Усі лінійні розміри дані в сантиметрах.

Слід пам'ятати, що розрахунок добротності, виконаний за формулою (3.7), дає її значення, завищене в $2 \div 3$ рази.

Уточнений розрахунок геометричних розмірів індуктивного елемента. Більш точний розрахунок геометричних розмірів плівкової індуктивності

може бути зроблений за класичною формулою (3.3), яка після перетворення набуває вигляду:

$$L = k^2 \frac{d^3}{h^2}, \quad (3.8)$$

де L – індуктивність спіралі, мкГн;

k – коефіцієнт, що залежить від відношення зовнішнього діаметра D спіралі до внутрішнього діаметра d ; визначається із графіка, наведеного на рис. 3.2;

d – внутрішній діаметр спіралі, мм;

h – крок розташування витків спіралі, мм.

Розмір внутрішнього діаметра спіралі обумовлений розмірами контактної площадки, розташованої усередині спіралі, і, як правило, вибирається рівним 0,5 мм [1, 2].

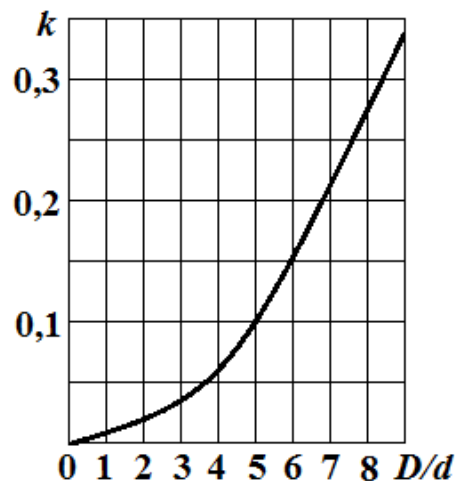


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнта k від відношення діаметрів D/d

Зовнішній діаметр D визначається зі співвідношення $\left(\frac{d}{D}\right)_{opt} = 0,4$ для

круглої спіралі й $\left(\frac{d}{D}\right)_{opt} = 0,362$ для квадратної спіралі.

Визначивши з виразу (3.8) крок спіралі за формулою (3.6) розрахуємо число витків N , з яких складається спіраль.

Потім визначаємо товщину провідної плівки t :

$$t = (2 - 4)y,$$

де y – глибина проникнення електромагнітної хвилі в матеріал плівкового провідника (скін-ефект), мкм:

$$y = k_1 \sqrt{\lambda},$$

де k_1 – коефіцієнт, що залежить від матеріалу плівки (наприклад, для Al $k_1 = 0,51$; для Ag $k_1 = 0,37$; для Cu $k_1 = 0,39$);

λ – довжина хвилі, см.

Ширина провідної плівки b_0 , при якій можливо забезпечити задану добротність Q без врахування скін-ефекту, визначається за формулою:

$$b_0 = \frac{\rho h \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) Q \cdot 10^4}{16t f d k^2},$$

де f – частота, МГц;

ρ – питомий опір матеріалу плівки, Ом·см.

З урахуванням скін-ефекту ширина провідної плівки уточнюється й дорівнює

$$b = (1,5 - 2)b_0.$$

Якщо при розрахунках виявиться, що $b_0 < 0,2$ мм, це значить, що зовнішній діаметр спіралі D обраний занадто великим. Розрахунки слід повторити, взявши менші значення d й D . Після одержання прийнятних геометричних розмірів спіралі слід перевірити отриману величину добротності Q .

Врахування впливу металевих поверхонь на параметри спірального елемента індуктивності. Металеві немагнітні поверхні, близько розташовані до плівкової котушки, зменшують її індуктивність, а за рахунок зменшення індуктивності також значною мірою знижується добротність [1, 2].

Експериментально отримані залежності, наведені на рис. 3.3 і рис. 3.4, дозволяють урахувати зміни L й Q плівкової котушки залежно від H – відстані від котушки до металевої поверхні. У цьому випадку обчислені при розрахунках індуктивність L і добротність Q повинні бути трохи збільшені з урахуванням ефекту розмагнічування металевих поверхонь.

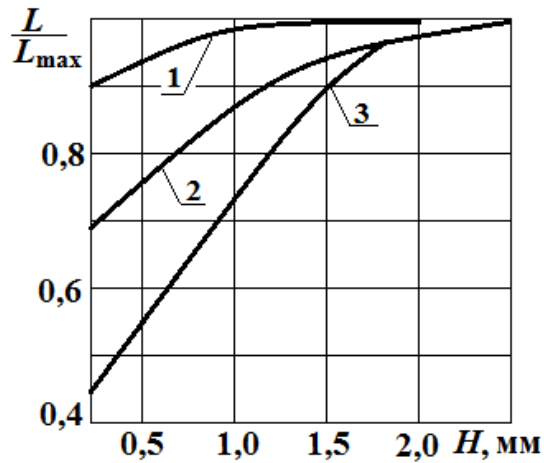


Рисунок 3.3 – Вплив плоских металевих поверхней на індуктивність:
 1 – алюмінієва плівка на частотах 20÷100 МГц;
 2, 3 – латунний лист на частотах 100 і 20 МГц

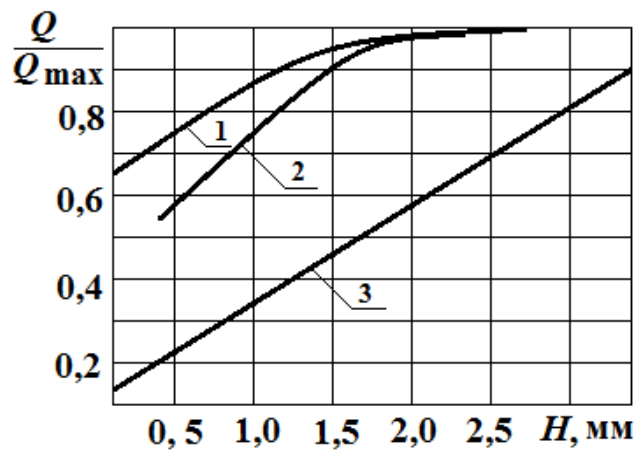


Рисунок 3.4 – Вплив плоских металевих поверхней на добротність:
 1 – алюмінієва плівка на частотах 20÷100 МГц; 2, 3 – латунний лист
 на частотах 20 і 100 МГц

Завдання

За заданими значеннями індуктивності L , добротності Q й частоти f визначити геометричні розміри плівкової індуктивності – зовнішній діаметр спіралі D , ширину провідника b , його товщину t , крок спіралі h й число витків N .

Звіт повинен містити

1. Вихідні дані.
2. Конструктивний розрахунок плівкової індуктивності.

3. Креслення плівкової індуктивності.
4. Лістинг програми.
5. Результати тестування.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Навести конструкції тонкоплівкових елементів індуктивності.
2. Яка технологія використовується для виготовлення тонкоплівкових індуктивностей ?
3. Які матеріали використовуються для виготовлення тонкоплівкових індуктивностей і які вимоги висуваються до них ?
4. Наведіть орієнтовний розрахунок розмірів індуктивного елемента.
5. Наведіть уточнений розрахунок геометричних розмірів індуктивного елемента.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ГІБРИДНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ МІКРОСХЕМИ

Мета роботи: здійснити розрахунок теплових режимів гібридної інтегральної мікросхеми (ГІМС), використовуючи вихідні дані елементів та характеристики конструктивних матеріалів.

Теоретичні відомості

Конструкція ГІМС повинна бути такою, щоб теплота, що виділяється при її функціонуванні, не приводила в найбільш несприятливих умовах експлуатації до відмов елементів у результаті перегріву. До тепловидільних елементів слід віднести насамперед резистори, активні елементи й компоненти. Потужності, що розсіюються конденсаторами й індуктивностями, невеликі. Плівкова комутація ГІМС завдяки малому електричному опору й високій теплопровідності металевих плівок сприяє відведенню теплоти від найбільш нагрітих елементів і вирівнюванню температури плати ГІС або кристалів напівпровідникових ГІМС.

Перегрів елемента або компонента ГІМС (Θ , °C), – різниця між їхньою температурою й середньою температурою поверхні корпусу. *Максимально допустима температура* $T_{\max.\text{доп}}$ – максимальна температура елемента або компонента ГІМС, при якій забезпечуються вимоги до їхньої надійності. *Питома потужність розсіювання* (P_0 , Вт/°C) – щільність

теплогового потоку від елемента ГІМС, кристала або плати ГІМС. *Внутрішній тепловий опір* елемента, кристала або компонента ГІМС ($R_{T.вн}$, °C/Вт) – тепловий опір самого елемента (кристала, компонента) і тепловий опір контакту між елементом (компонентом) і платою (кристалом і корпусом) з урахуванням теплового опору клейового прошарку.

У випадку, коли весь тепловий потік зосереджений під елементом ГІМС і спрямований до підкладки (рис. 4.1), при співвідношенні $l, b \gg h$ тепловий потік плоскопаралельний і тепловий опір визначається за виразом [3, 4]:

$$R_T = \left(\frac{h_n}{\lambda_n} + \frac{h_k}{\lambda_k} \right) \frac{1}{bl}, \quad (4.1)$$

де R_T – тепловий опір;

λ_n і λ_k – коефіцієнти теплопровідності матеріалу підкладки й клею, Вт/(м·°C);

h_n і h_k – їх товщини;

b і l – розміри контакту тепловидільного елемента з підкладкою:

$$h = h_n + h_k .$$

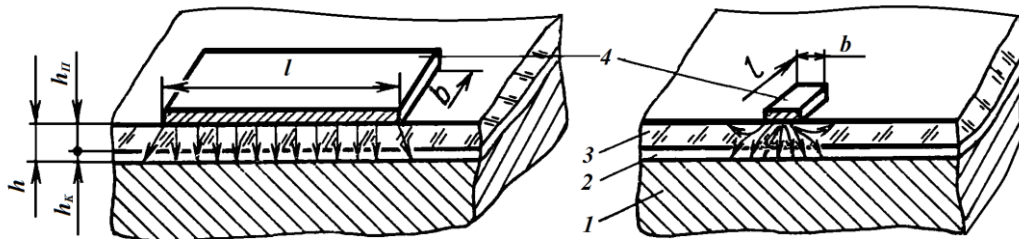


Рисунок 4.1 – Тепловий потік від джерела теплоти при різних співвідношеннях між розмірами тепловидільних елементів і товщиною підкладки: 1 – тепловідвідний шар; 2 – шар клею або компаунда; 3 – підкладка; 4 – тепловидільний елемент

При зменшенні розмірів джерела тепла тепловий потік стає розбіжним (рис. 4.1), ефективність тепловідведення збільшується й відповідно зменшується тепловий опір. Цей факт ураховується функцією $\gamma(q, r)$ [3, 4]:

$$R_{T.еф} = R_T \gamma(q, r), \quad (4.2)$$

де $q = l/2h$, $r = b/2h$, b і l – лінійні розміри плоского джерела теплоти.

Для керамічних, металокерамічних та металоскляних корпусів значення функції $\gamma(q, r)$ подано на рис. 4.2.

Знаючи значення R_T або $R_{T.ef}$ для кожного елемента ГІМС, легко розрахувати перегрів елементів за рахунок потужності, що *розсіюється*, P_e :

$$\Theta_e = P_e R_{T.ef}. \quad (4.3)$$

Температура елемента:

$$T_e = T_k + \Theta_e, \quad T_e = T_c + \Theta_k + \Theta_e, \quad (4.4)$$

де T_c – температура навколишнього середовища;

Θ_k – перегрів корпусу відносно температури навколишнього середовища.

У навісних дискретних компонентах найбільш чутливі до перегріву області p - n -переходів. Їх перегрів відносно підкладки визначається за виразом [3, 4]:

$$\Theta_{вн} = P_e R_{T.вн}. \quad (4.5)$$

Для навісного провідникового компонента:

$$T_{нк} = T_c + \Theta_k + \Theta_e + \Theta_{вн}. \quad (4.6)$$

Перегрів корпусів Θ_k визначається конструкцією корпусу й потужністю розсіювання поміщених у нього кристала або плати ГІМС, особливостями монтажу ГІМС у складі мікроелектронного вузла або блока, способом охолодження. Тепловий опір корпусу:

$$R_k = \frac{1}{\alpha S_T}, \quad (4.7)$$

де α – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·°С);

S_T – площа теплового контакту корпусу з тепловідвідним шаром.

При охолодженні шляхом природньої конвекції $\alpha = 5 \div 20$, при обдуві $\alpha = 20 \div 100$, при тепловідведенні кондукцією через тонкий (0,1 мм) повітряний проміжок $\alpha \approx 3 \cdot 10^2$, при тепловідведенні кондукцією через шар

епоксидного клею товщиною 0,1 мм $\alpha = 3 \cdot 10^2 \div 3 \cdot 10^3$, при металічному тепловідведенні $\alpha = 10^4 \div 10^5$.

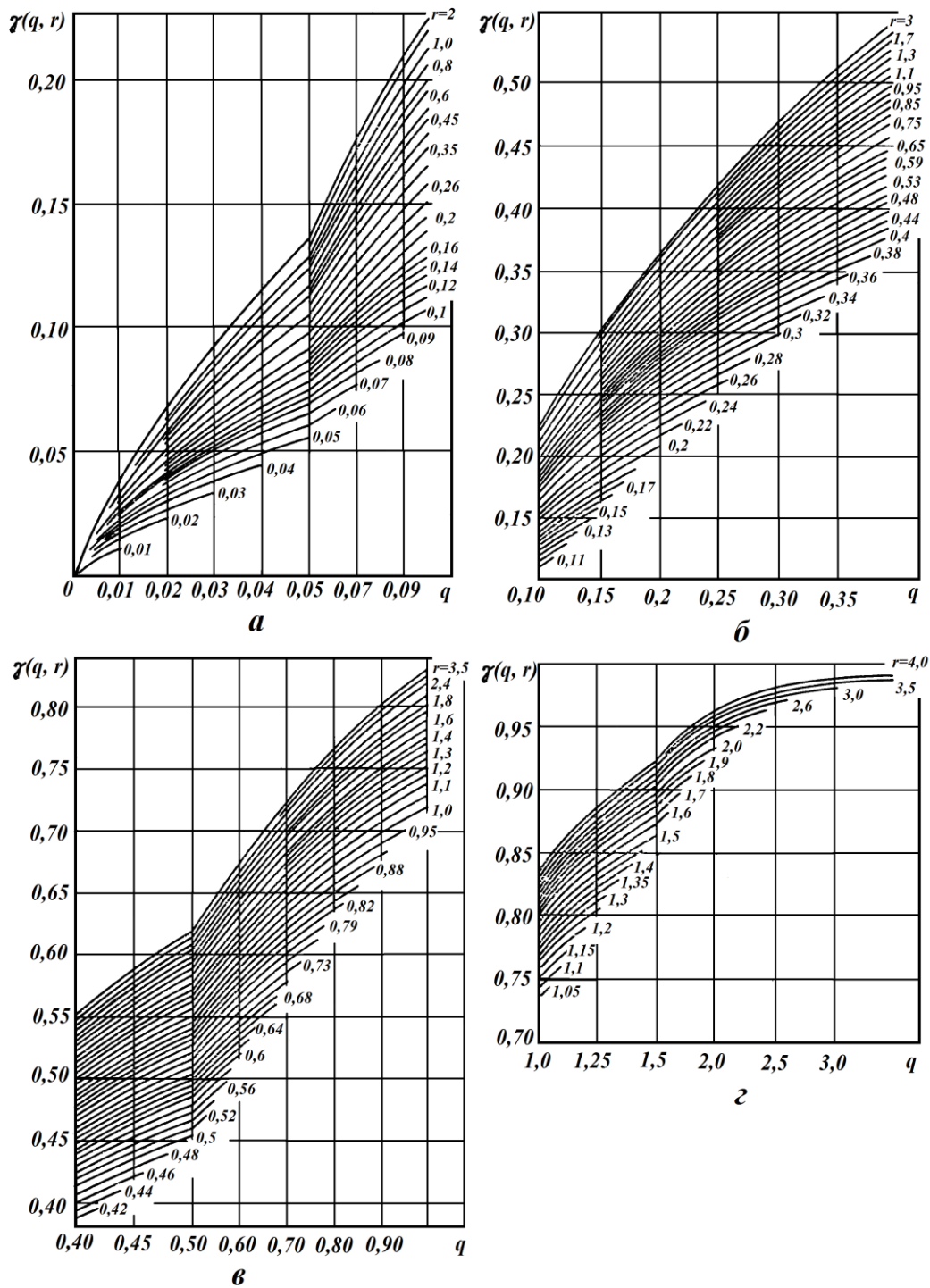


Рисунок 4.2 – Значення функції $\gamma(q, r)$: *a* – при $q = 0 \div 0,1$; *б* – при $q = 0,1 \div 0,4$; *в* – при $q = 0,4 \div 1,0$; *г* – при $q = 1,0 \div 4,0$

Перегрів корпусу Θ_k можна оцінити за формулою:

$$\Theta_k = P_{\Sigma} R_k, \quad (4.8)$$

де P_{Σ} – сумарна потужність, що розсіюється ГІМС.

Формула (4.4) не враховує перегріву за рахунок взаємного впливу тепловідільних елементів, обумовленого накладенням теплових потоків усіх джерел теплоти, що втримуються в ГІМС. Однак цей фоновий перегрів частково враховується значенням Θ_k .

Наведені формули слушні при таких допущеннях: коефіцієнти теплопровідності всіх матеріалів конструкції ГІМС у досліджуваному діапазоні температур постійні; тепловіддачею через газовий прошарок усередині корпусу й через гнучкі дротові виводи можна зневажити; тепловідільні елементи є плоскими джерелами теплоти; температура корпусу однакова у всіх його точках (ізотермічний корпус).

Нормальний тепловий режим елементів і навісних компонентів ГІМС забезпечується при виконанні умов [3, 4]:

$$\begin{aligned} T_e &= T_{c\max} + \Theta_k + \Theta_e \leq T_{\max\text{ доп}}, \\ T_{нк} &= T_{c\max} + \Theta_k + \Theta_e + \Theta_{вн} \leq T_{\max\text{ доп}}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

де $T_{c\max}$ – максимальна температура навколишнього середовища в процесі експлуатації, задана ТУ;

$T_{\max\text{ доп}}$ – максимально допустима робоча температура елемента й компонента, зазвичай вказана в ТУ на компоненти або матеріали плівкових елементів.

Для дискретних напівпровідникових приладів і напівпровідникових ГІМС $T_{\max\text{ доп}} \approx 55, 85$ і 125 °С (табличні дані), для діодів 85 °С, для конденсаторів К10-9, К10-17 – 80 °С, для конденсаторів К53-15, К53-16 – 75 °С.

Нормальний тепловий режим ГІМС забезпечується, якщо температура найтеплонавантаженого елемента ГІМС не перевищує його максимально допустимої робочої температури.

Таким чином, орієнтовний розрахунок забезпечення теплового режиму ГІС зводиться до визначення $T_{нк}$ і T_e всіх навісних компонентів і всіх резисторів ГІС і порівняння її з $T_{\max\text{ доп}}$.

Необхідні дані для розрахунків: товщина підкладки $0,6 \div 0,8$ мм, коефіцієнт теплопровідності матеріалу підкладки – згідно з табличними даними, товщина шару клею $0,1$ мм, його коефіцієнт теплопровідності

0,3 Вт/(м·°С), внутрішній тепловий опір дискретних напівпровідникових приладів залежно від конструктивного виконання 200 ÷ 1600 °С/Вт. Наприклад, для безкорпусних транзисторів КТ331, КТ332 із заливанням герметиком з однієї сторони тепловий опір $R_T = 220$ °С/Вт, а із заливанням герметиком із двох сторін $R_T = 1600$ °С/Вт, для КТ307 $R_T = 630$ °С/Вт, для КТ324 $R_T = 860$ °С/Вт, для діодів КД901, 904, 910, 911 $R_T = 220$ °С/Вт.

При недотриманні нерівностей (4.9) необхідно вжити додаткових конструктивних заходів для забезпечення теплового режиму ГІМС.

У тому випадку, коли тепловий розрахунок покаже необхідність прийняття конструктивних заходів для зниження перегрівання елементів і компонентів ГІМС, у першу чергу зменшують теплові опори за рахунок використання матеріалів з більш високими коефіцієнтами теплопровідності: полікорових підкладок замість ситалових, компаундів з наповнювачами у вигляді пилоподібних кварцу або кремнію, що збільшують коефіцієнт теплопровідності компаундів до 0,5 ÷ 0,8 і до 1,9 ÷ 2,4 Вт/(м·°С), замість клеїв з коефіцієнтами приблизно 0,2 ÷ 0,4. Наступним кроком для полегшення теплових навантажень ГІМС є переміщення потужних тепловідільних елементів з плати на металеву основу корпусу. Результатом такої зміни конструкції ГІМС є вилучення теплового опору підкладки і шару компаунда в колі передачі теплоти потужних елементів. Подальше зменшення теплових навантажень пов'язано із заходами щодо забезпечення більш інтенсивного теплообміну корпусу ГІМС з елементами конструкції вузла або блока, аж до використання рідкого охолодження тепловідвідних шарів і термоелектричних холодильників.

Особливість теплового розрахунку напівпровідникових ГІМС полягає в тому, що напівпровідниковий кристал можна розглядати як єдиний тепловідільний елемент і вважати, що сумарна потужність джерел теплоти в ньому рівномірно розподілена в приповерхневому шарі. Ця особливість викликана в першу чергу високим коефіцієнтом теплопровідності кремнію [80 ÷ 130 Вт/(м·°С)], малими розмірами елементів і невеликими відстанями між елементами напівпровідникової ГІМС. Експериментально встановлено, що розкид температур на поверхні кристала незначний (одиниці або частки градуса) [3, 4].

Температура елементів напівпровідникової ГІМС:

$$T_e = T_c + \Theta_k + \Theta_{kp} + \Theta_{вн}. \quad (4.10)$$

Умова забезпечення нормальних теплових режимів записується у вигляді

$$T_e = T_{c\max} + \Theta_k + \Theta_{kp} + \Theta_{вн} \leq T_{\max\text{ доп}}, \quad (4.11)$$

де Θ_{kr} – перегрів кристала відносно підкладки або основи корпусу.

Завдання

Використовуючи електричні параметри та геометричні розміри резисторів, дискретних діодів та транзисторів, що наведені в електричній принциповій схемі, провести їх орієнтовний тепловий розрахунок.

Звіт повинен містити

1. Вихідні дані.
2. Тепловий розрахунок резисторів, дискретних діодів та транзисторів.
3. Висновки.

Контрольні запитання

1. Які фактори необхідно враховувати для забезпечення надійних теплових режимів ГІМС ?
2. Наведіть орієнтовний тепловий розрахунок резисторів.
3. Наведіть орієнтовний тепловий розрахунок транзисторів.
4. Наведіть орієнтовний тепловий розрахунок діодів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 РОЗРАХУНОК ВОЛОГОЗАХИСТУ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

Мета роботи: здійснити розрахунок вологозахисту гібридної інтегральної мікросхеми на основі значень коефіцієнтів вологості різних полімерних матеріалів для герметизації та геометрії корпусу.

Теоретичні відомості

Необхідність вологозахисту ГІМС виникає при використанні герметичних конструкцій, виготовлених із застосуванням органічних полімерних матеріалів. На відміну від неорганічних ці матеріали мають підвищені значення вологовбирання й вологонепроникності.

Навколишнє повітря практично завжди являє собою пароповітряну суміш. Вміст пари води в повітрі при різних температурах визначається з рис. 5.1 [3].

Кількість поглиненої герметичною конструкцією з повітря вологи M збільшується з підвищенням парціального тиску пари води p_{H_2O} (закон Генрі):

$$M = \Gamma p_{H_2O} , \quad (5.1)$$

де Γ – коефіцієнт розчинності.

Коефіцієнт Γ ($\text{с}^2/\text{м}^2$) визначає кількість вологи, яку здатен поглинути матеріал у даних кліматичних умовах. Швидкість процесу поглинання вологи матеріалом визначається коефіцієнтом дифузії молекул води D ($\text{м}^2/\text{с}$) у матеріалі. Коефіцієнт вологонепроникності B (с) характеризує здатність матеріалу пропускати вологу й визначається кількістю води, що пройшла через мембрану із цього матеріалу при наявності різниці тисків пари води по обидві сторони мембрани. Коефіцієнт B показує процес вирівнювання концентрацій вологи у двох об'ємах, розділених мембраною з випробуваного матеріалу, що мають у початковий момент різні концентрації вологи [3].

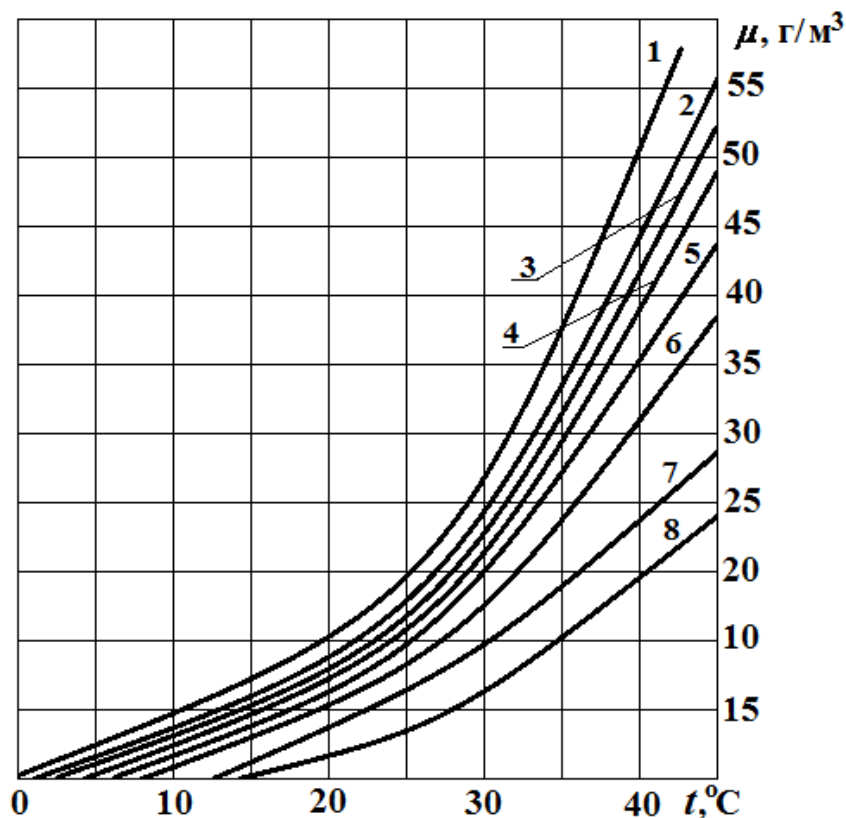


Рисунок 5.1 – Вміст пари води у повітрі при різних температурах і відносній вологості: (1 – 100%; 2 – 90%; 3 – 85%; 4 – 80%; 5 – 70%; 6 – 65%; 7 – 50%; 8 – 40%)

Коефіцієнти B , D і Γ пов'язані між собою співвідношенням

$$B = D\Gamma. \quad (5.2)$$

Значення коефіцієнтів B , D і Γ різних полімерних герметизувальних матеріалів, є табличними даними (див. табл. В.1, додаток В).

Знаючи значення коефіцієнтів вологості, можна розрахунковим шляхом оцінити вологозахисні властивості герметизувальних матеріалів і конструкцій на їхній основі.

Вихідні дані для забезпечення вологозахисту ГІМС. Вихідні дані для розрахунків вологозахисту мікросхем: T_c – температура навколишнього середовища, K ; φ – відносна вологість навколишнього середовища, %; p_0 – парціальний тиск пари води навколишнього середовища, Па; p_{kp} – критичний тиск пари води, що призводить до відмови ГІМС, Па; S – площа герметизувальної оболонки, яку волога дифундує в корпус, m^2 ; d – товщина герметизувальної оболонки, m ; V – внутрішній об'єм корпусу, у якому відбувається розчинення вологи, m^3 ; B – коефіцієнт вологонепроникності герметизувальної оболонки, s ; D – коефіцієнт дифузії молекул вологи в герметизувальній оболонці, m^2/s , Γ – коефіцієнт розчинності вологи в матеріалі, що оточує ГІМС, s^2/m^2 .

Розраховують час вологозахисту ГІМС τ , (с), протягом якого забезпечується безвідмовна робота ГІМС. Вологостійкість ГІМС оцінюють із розрахунку впливу вологи на найчутливіший до її впливу елемент або компонент ГІМС.

Вологостійкість порожніх корпусів. Корпуси, що мають вільний внутрішній об'єм, називаються порожніми. Вологозахист таких корпусів оцінюється часом τ , протягом якого тиск парів води усередині корпусу досягає критичного значення p_{kp} , при якому настає відмова ГІМС [3]:

$$\tau = \tau_0 + \tau_1, \quad (5.3)$$

де τ_0 – час зволоження матеріалу оболонки;

τ_1 – час натікання вологи у внутрішній об'єм корпусу.

Значення τ_0 залежить від товщини оболонки d і коефіцієнта дифузії D молекул води в матеріалі оболонки:

$$\tau_0 = \frac{d^2}{6D}. \quad (5.4)$$

Формула припускає, що насичення матеріалу вологою здійснюється тільки шляхом молекулярної дифузії в оболонку корпусу. Звичайно τ_0 слід ураховувати при товщині оболонки корпусу $d > 0,1$ мм.

Час натікання води

$$\tau_1 = \frac{V\Gamma d}{BS} \ln \left(\frac{p_0}{p_0 - p_{kp}} \right). \quad (5.5)$$

Тоді час τ становитиме

$$\tau = \frac{V\Gamma d}{BS} \ln \left(\frac{p_0}{p_0 - p_{kp}} \right) + \frac{d^2}{6D}. \quad (5.6)$$

У більшості випадків усередині порожніх корпусів перебуває повітря, яке має певну вологість. Якщо в початковий момент часу в корпусі ГІМС є волога з парціальним тиском p_H , то τ зменшується:

$$\tau = \frac{V\Gamma d}{BS} \ln \left(\frac{p_0(p_{kp} - p_H)}{(p_0 - p_{kp})(p_0 - p_H)} \right) + \frac{d^2}{6D}. \quad (5.7)$$

У формулах (5.5) – (5.7) Γ – коефіцієнт розчинності води в повітрі, дорівнює $7,4 \cdot 10^{-6}$ с²/м².

Якщо для герметизації ГІМС обрано стандартний пластмасовий або металополімерний корпус, то час вологозахисту розраховують, виходячи з вологості зовнішнього середовища в умовах зберігання й експлуатації ГІМС і тиску p_{kp} . Залежно від чутливості до води елементів ГІМС значення p_{kp} можна вважати рівним $0,85 \div 0,95 p_0$, тому що при цих значеннях p_{kp} волога призводить до раптової або до поступової відмови ГІМС.

Вологостійкість монолітних корпусів. Втрата робоздатності ГІМС, герметизованих у монолітні корпуси, викликається поглинанням матеріалом-герметиком води й зволоженням поверхні ГІМС. При досягненні критичної концентрації, відповідної критичному тиску p_{kp} парів води, настає відмова ГІМС. Час, протягом якого на поверхні ГІМС досягається критична концентрація води, визначають за виразом [3]:

$$\tau = -\frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{p_{kp}}{p_0} \right) \right]. \quad (5.8)$$

Як видно, він визначається товщиною матеріала-герметика, коефіцієнтом дифузії молекул води в ньому й відношенням p_{kp} / p_0 . Формула (5.8) припускає, що з поверхнею ГІМС полімер має слабку адгезію.

Завдання

Використовуючи значення коефіцієнтів B , D і Γ різних полімерних матеріалів, що є табличними даними (додаток В), здійснити розрахунок вологозахисту гібридної інтегральної мікросхеми. Залежно від чутливості до вологи елементів ГІМС значення p_{kp} можна взяти рівним $0,85 \div 0,95 p_0$.

Звіт повинен містити

1. Вихідні дані.
2. Розрахунок вологозахисту ГІМС.
3. Висновки.

Контрольні запитання

1. Які фактори необхідно враховувати для забезпечення надійного вологозахисту ГІМС ?
2. Наведіть орієнтовний розрахунок вологостійкості порожніх корпусів.
3. Наведіть орієнтовний розрахунок вологостійкості монолітних корпусів.
4. Які різновиди корпусів використовуються на практиці для герметизації ГІМС ?
5. Які існують технічні умови на ГІМС ?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 РОЗРОБКА ТОПОЛОГІЇ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

Мета роботи: розробити топологію гібридної інтегральної мікросхеми, використовуючи електричну схему, вимоги до електричних параметрів і до параметрів активних і пасивних елементів, конструктивно-технологічні вимоги й обмеження.

Теоретичні відомості

Розробку топології рекомендується проводити в такій послідовності: складання схеми з'єднання елементів на платі; розрахунки конструкцій плівкових елементів; визначення необхідної площі плати й узгодження з типорозміром корпусу, обраного для ГІС; розробка ескізу топології; оцінення якості розробленої топології й за необхідності її коректування.

Для складання схеми з'єднань на принциповій електричній схемі виділяють плівкові елементи й навісні компоненти, намічають порядок їх розташування й проводять спрощення схеми з'єднань із метою зменшення числа перетинів провідників і скорочення їх довжини.

Роблять вибір матеріалів і розрахунки геометричних розмірів плівкових елементів. Потім приступають до визначення необхідної площі плати. З технологічних міркувань елементи мікросхеми розташовують на деякій відстані від її краю [3, 4]. Проміжки між елементами визначаються технологічними обмеженнями й умовами тепловідведення.

Орієнтовну площу плати визначають за формулою:

$$S = K(S_{\Sigma R} + S_{\Sigma C} + S_{\Sigma K} + S_{\Sigma HK}),$$

де K – коефіцієнт запасу за площею, обумовлений кількістю елементів у схемі, їх типом і складністю зв'язків між ними (для орієнтовних розрахунків можна взяти $K = 2 \div 3$);

$S_{\Sigma R}, S_{\Sigma C}, S_{\Sigma K}$ – площі, займані всіма резисторами, конденсаторами, контактними площадками;

$S_{\Sigma HK}$ – сумарна площа навісних компонентів, які не можуть бути розташованими над плівковими елементами та займають площу на платі.

Після обчислення орієнтовної площі плати вибирають її типорозмір відповідно до табличних даних. Одночасно вибирають спосіб захисту ГІС і у випадку використання корпусів – типорозмір корпусу. Рекомендовані розміри плат: 20×24 , 20×16 , 15×16 , 15×8 мм і так далі.

Потім приступають до розробки ескізу топології. На цьому етапі вирішують задачу оптимального розміщення на платі плівкових елементів, навісних компонентів і з'єднань між ними, а також між зовнішніми контактними площадками на платі й виводами корпусу.

Для розробки ескізних топологічних креслень необхідно знати: схему електричну принципову й схему з'єднання елементів; форму й геометричні розміри плівкових елементів і навісних компонентів; орієнтовні розміри й матеріал плати, попередньо обраний метод індивідуа-

льної герметизації, вид і розміри корпусу або метод установлення плати в блоці при груповій герметизації; можливості виробничої бази, призначеної для виготовлення розроблювальної ГІС.

Початковий етап розроблення топології полягає у виготовленні ескізних креслень, виконаних на міліметровому папері в масштабі 10:1 або 20:1. Масштаб вибирають, виходячи зі зручності роботи, наочності й точності. Ескізне креслення варіанта топології ГІС виконують суміщеним для всіх шарів.

Навісні компоненти зображають із дотриманням порядку розташування виводів. Грані навісних компонентів розташовують уздовж осей координатної сітки. Якщо використовуються навісні компоненти із жорсткими выводами, то в кресленні топології виконують контактні площадки, які відповідають їх цоколівці й мають стандартні розміри (є табличними даним [3, 4]). Одночасно з розміщенням елементів і компонентів проводять лінії електричного зв'язку (провідники). Для економії часу на початковій стадії провідники попередньо злегка намічають олівцем в одну лінію по осі провідника. Відстань між паралельними лініями, що зображають провідники, беруть із урахуванням ширини провідників і відстаней між ними. Лінії проводять паралельно осям координат. При кресленні необхідно стежити за тим, щоб плівкові провідники відрізнялися від дровових виводів навісних компонентів, навісних перемичок, місця з'єднання їх позначають контактними площадками. Слід уникати перетинів з накресленими раніше провідниками. Після того, як виконана комутаційна схема й забезпечені мінімальні довжини провідників, а також мінімальне число перетинів, провідники зображають у дві лінії.

Елементи ГІС, що належать різним шарам, у першому ескізі рекомендується зображати різними кольорами.

При створенні креслення топології необхідно звертати увагу на використання найбільш простих форм елементів, рівномірність розміщення елементів на платі, забезпечення зручностей при використанні складальних операцій, збільшення розмірів контактних площадок, розширення допусків на суміщення шарів тощо.

При кресленні елементів слід економно використовувати площу, що досягається вибором відповідної конфігурації (якщо це допускається) розташовуваних плівкових елементів.

При розробленні топології потрібно враховувати забезпечення можливості вимірювання електричних параметрів плівкових елементів (резисторів, конденсаторів тощо). Якщо структура електричної схеми не дозволяє цього зробити (наприклад, паралельне з'єднання конденсатора й резистора), методика перевірки вузлів і вимоги до топології, пов'язані із цією перевіркою, повинні бути визначені до початку розробки топології.

При розробленні топології необхідно забезпечити можливість виконання вимог до монтажу застосовуваних навісних компонентів, а також вимоги до складання й захисту мікросхеми.

При опрацюванні першого варіанта топології зазвичай не вдається одержати прийнятну конфігурацію шарів. Робота над наступними варіантами топології зводиться до усунення недоліків першого варіанта для того, щоб креслення відповідало всім конструктивно-технологічним вимогам і обмеженням [3 – 13].

При масковому методі виготовлення після остаточного розміщення елементів рекомендується зробити розфарбування шарів у різні кольори, щоб оцінити можливість виготовлення масок. Маски не повинні містити провисаючих ділянок. У випадку складної конфігурації маски проводять розподіл провідників на два шари або частину провідників переносять у шар нижніх обкладинок конденсаторів, якщо це не порушує жорсткості маски для формування нижніх обкладинок.

Після того як остаточно обрано варіант топології, приступають до виготовлення креслень шарів мікросхеми по елементах (резистори, провідники й контактні площадки, нижні обкладинки конденсаторів, діелектрики тощо). Ці креслення – основа для виготовлення комплекту фотошаблонів і масок.

Спосіб і послідовність роботи з розміщення й вибору форми плівкових елементів можуть бути різними: ця робота багато в чому визначається досвідом розроблювача й носить індивідуальний характер. Для знаходження оптимального варіанта розміщення елементів на платі в цей час використовують методи проектування топології за допомогою ЕОМ.

Оцінення якості розробки топології ГІС. Розроблена топологія повинна: відповідати принциповій електричній схемі; задовольняти всі висунуті конструктивні вимоги; бути складена таким чином, щоб для виготовлення мікросхеми була потрібна найбільш проста й дешева технологія; забезпечити заданий тепловий режим й можливість перевірки елементів у процесі виготовлення. Ємнісні й індуктивні зв'язки не повинні порушувати нормальну роботу схеми при заданих умовах експлуатації.

При перевірці правильності розробки топології ГІС ухвалюють такий порядок. Перевіряють відповідність: принциповій електричній схемі; зовнішніх контактних площадок – виводам корпусу; конструктивно-технологічним вимогам і обмеженням [3 – 13]; розрахунковим значенням довжини, ширини й коефіцієнта форми резисторів і за потреби роблять коректування розмірів резисторів. Перевіряють наявність у схемі перетинання плівкових провідників і захист їх діелектриком, можливість контролю елементів, забезпечення нормального функціонування мікросхеми при заданих умовах експлуатації. За необхідності проводять оцінення ємнісних і індуктивних зв'язків.

Завдання

Розробити топологію ГІМС. За основу розробки топології ГІМС взяти електричну принципову схему пристрою. Розробку топології рекомендується проводити в такій послідовності: складання схеми з'єднання елементів на платі; розрахунки конструкцій плівкових елементів; визначення необхідної площі плати й узгодження з типорозміром корпусу, обраного для ГІС; розробка ескізу топології; оцінення якості розробленої топології й за необхідності її корегування.

Звіт повинен містити

1. Електричну принципову схему.
2. Вимоги до електричних параметрів і до параметрів активних та пасивних елементів.
3. Конструктивно-технологічні вимоги й обмеження.
4. Розрахунок геометричних (топологічних) розмірів плівкових елементів.
5. Топологію ГІМС.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що слугує основою розроблення топології ГІМС ?
2. Які існують конструктивно-технологічні обмеження при розробленні топології ГІМС ?
3. Які існують рекомендації щодо розроблення ескізу топології ГІМС ?
4. В чому полягає перевірка правильності розроблення топології ГІМС ?

Література

1. Матсон Э. А. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА : учебн. пособие для радиотехн. спец. вузов / Матсон Э. А., Крыжановский Д. В., Петкевич В. И. – Мн. : Вышэйшая школа, 1979. – 192 с.
2. Матсон Э. А. Конструкции и технология микросхем : учебн. пособие для радиотехн. спец. вузов / Матсон Э. А. – Мн. : Вышэйшая школа, 1985. – 207 с.
3. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование : учебн. пособие для вузов / [Л. А. Коледов, В. А. Волков, Н. И. Докучаев и др.]. – М. : Высш. школа, 1984. – 231 с.
4. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учебник для вузов / Коледов Л. А. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.

5. Пасынков В. В. Материалы электронной техники : учебн. для студ. вузов / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высшая школа, 1986. – 367 с.
6. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посібник / Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. – Львів : «Магнолія 2006», 2008. – 242 с.
7. Пахолук А. П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : посібник / А. П. Пахолук, О. А. Пахолук. – Львів : Світ, 2005. – 172 с.
8. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем : учебн. пособие для вузов / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1983. – 232 с.
9. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник / Готра З. Ю. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
10. Николаев И. М. Интегральные микросхемы и основы их проектирования / И. М. Николаев, Н. А. Филинук. – М. : Радио и связь, 1992. – 424 с.
11. Парфенов О. Д. Технология микросхем : учебн. пособие для вузов по спец. «Конструирование и производство ЭВА» / Парфенов О. Д. – М. : Высшая школа, 1986. – 320 с.
12. Курносов А. И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем : учебн. пособие для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики», «Полупроводниковые приборы» / А. И. Курносов, В. В. Юдин. – М. : Высшая школа, 1986. – 368 с.
13. Волков В. А. Сборка и герметизация микроэлектронных устройств / Волков В. А. – М. : Радио и связь, 1982. – 144 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Електрофізичні характеристики матеріалів для плівкових резисторів

| Резистивний матеріал | Діапазон опорів, кОм | Питомий опір $\rho_{кв}$, Ом/кв | Питома допустима потужність, розсіяна резистивною плівкою, мВт/мм ² | ТКО в діапазоні температур, $\times 10^{-4}$, 1/град. | | Зміна величини опору γ_{RCT} при старінні в нормальних умовах за 5000 год, % |
|-------------------------------|----------------------|----------------------------------|--|--|----------------|---|
| | | | | (-60 ÷ +25) °С | (+25 ÷ 125) °С | |
| Хром ХО, ГОСТ 5905-67 | 0,5 ÷ 30 | 200 ÷ 500 | 10 | +0,6 | +0,6 | 2 |
| Ніхром Х20Н80, ГОСТ 12766-67 | 0,05 ÷ 30 | 100 ÷ 300 | 20 | ±1 | ±1 | 0,4 |
| Сплав МЛТ-3М, О.028.005 ТУ | 0,05 ÷ 50 | 300 ÷ 500 | 20 | ±2 | ±2 | ±0,1 |
| Кермет К50-С, О.021.013 ТУ | 1,0 ÷ 1000 | 3000 ÷ 10000 | 20 | -5 ÷ +3 | -5 ÷ +3 | ±0,3 |
| Тантал ТВЧ, РЭТУ 1244-67 | 0,1 ÷ 100 | 20 ÷ 100 | 30 | 2 | -2 | - |
| | 0,05 ÷ 100 | 100 | | | | |
| | 0,01 ÷ 15 | 10 | | | | |
| Сплав РС-3710, ЕТО.021.034 ТУ | 1,0 ÷ 200 | 3000 | 20 | -3 | -3 | 1 |
| Сплав РС-3001, ЕТО.021.019 ТУ | 0,1 ÷ 50 | 1000 | 20 | -0,2 | -0,2 | 1 |
| | 0,2 ÷ 100 | 2000 | | | | |

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Електрофізичні характеристики діелектричних матеріалів для плівкових конденсаторів

| Матеріал діелектрика | Діапазон ємностей, пФ | Електрична міцність, МВ/см | Найбільша питома ємність C_0 , пФ/мм ² | ϵ на частоті 1 кГц | $tg\delta$ на частоті 1 МГц | ТКС $\times 10^{-4}$, 1/град. в діапазоні температур (-65 ÷ +85) °С | | Рекомендований діапазон C_0 , пФ/мм ² | Зміна ємності після роботи в нормальних умовах протягом 1000 год, λ_{CCT} , % |
|---|-----------------------|----------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|--|---------|--|---|
| | | | | | | максимальне | середнє | | |
| Моноокис кремнію (О.028.004 ТУ) | десятки | 4 ÷ 5 | 100 | 5 ÷ 6 | 0,002 ÷ 0,02 | 3,5 | 2,0 | 50 ÷ 100 | ±6 |
| | сотні | 3 ÷ 4 | | | | | | | ±1,5 |
| | тисячі | 2 ÷ 3 | | | | | | | ±1,5 |
| | десятки тисяч | 1,5 ÷ 2,5 | | | | | | | ±1,5 |
| Моноокис германію (О.021.014 ТУ) | десятки | 1,5 | 150 | 10 ÷ 12 | 0,001 ÷ 0,005 | 5,0 | 3,0 | 50 ÷ 120 | 1 |
| | сотні | 1,5 | | | | | | | |
| | тисячі | 1,0 | | | | | | | |
| | десятки тисяч | 0,5 | | | | | | | |
| Халькогенідне скло (ХГ-44 РМО. 1096-61) | сотні | 2,8 | 200 | 9 ÷ 10 | 0,004 ÷ 0,02 | 28,0 | – | 100 ÷ 150 | 28 |
| | тисячі | 2,3 | | | | | | | |
| Халькогенідне скло (ИКС-24) | десятки | 0,4 | 100 | 5 ÷ 6 | 0,02 | 5 ÷ 9 | – | 100 | – |
| | сотні | | | | | | | | |
| | тисячі | | | | | | | | |
| | десятки тисяч | | | | | | | | |
| Боросилікатне скло (ЕТО.035.015 ТУ) | – | 3 ÷ 4 | 150 | 4 | – | – | 0,35 | 25 ÷ 150 | – |
| Електровакуумне скло (С41-1, НПО.027.600) | – | 3 ÷ 4 | 400 | 5,2 | – | 1,8 | 1,0 | 150 ÷ 400 | – |
| П'ятиокис танталу (електрохімічне анодування) | – | 2 | 2000 | 23 | – | – | 4,0 | 600 ÷ 2000 | – |

Додаток В

Таблиця В.1 – Значення коефіцієнтів вологості різних полімерних матеріалів для герметизації

| Матеріал | Коефіцієнти вологості | | | Призначення матеріалу |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--|
| | B, c | $D, m^2/c$ | $\Gamma, c^2/m^2$ | |
| Фторопласт-4 | $1 \cdot 10^{-16}$ | $8,34 \cdot 10^{-13}$ | $12,0 \cdot 10^{-5}$ | Порожній пластмасовий корпус |
| Поліетилен | $6,27 \cdot 10^{-16}$ | $6,4 \cdot 10^{-13}$ | $9,8 \cdot 10^{-4}$ | |
| Полістирол | $4,22 \cdot 10^{-15}$ | $3,32 \cdot 10^{-11}$ | $12,6 \cdot 10^{-5}$ | |
| Пластмаса К-124-38 | $1,66 \cdot 10^{-16}$ | $8,34 \cdot 10^{-14}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | |
| Пластмаса В4-70 | $2,5 \cdot 10^{-16}$ | $3,06 \cdot 10^{-13}$ | $8,3 \cdot 10^{-4}$ | |
| Компаунд ЭК-16 «Б» | $2,08 \cdot 10^{-16}$ | $6,4 \cdot 10^{-13}$ | $3,25 \cdot 10^{-4}$ | Герметизація заливанням |
| Кремнійорганічний еластомір | $8,2 \cdot 10^{-15}$ | $8,2 \cdot 10^{-12}$ | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | Герметизація заливанням |
| Компаунд ЭКМ | $4,1 \cdot 10^{-16}$ | $7,1 \cdot 10^{-13}$ | $5,77 \cdot 10^{-4}$ | Безкорпусна і корпусна герметизація напівпровідникових ІМС |
| Пресматеріал ЭПФ-63 | $1,83 \cdot 10^{-16}$ | $6,1 \cdot 10^{-13}$ | $3,0 \cdot 10^{-4}$ | Корпусна герметизація |
| Пресматеріал К-81-39с | $3,5 \cdot 10^{-16}$ | $8,0 \cdot 10^{-13}$ | $4,37 \cdot 10^{-4}$ | Корпусна герметизація |
| Компаунд ПЭК-19 | $7,8 \cdot 10^{-16}$ | $2,1 \cdot 10^{-12}$ | $3,7 \cdot 10^{-4}$ | Герметизація заливанням |
| Емаль ЭП-91 | $7,0 \cdot 10^{-16}$ | $1,08 \cdot 10^{-12}$ | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | Безкорпусна герметизація напівпровідникових ІМС |
| Емаль КО-97 | $8,2 \cdot 10^{-16}$ | $1,1 \cdot 10^{-12}$ | $7,45 \cdot 10^{-4}$ | Безкорпусна герметизація напівпровідникових ІМС |

Продовження таблиці В.1

| Матеріал | Коефіцієнти вологості | | | Призначення матеріалу |
|------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---|
| | B, c | $D, m^2/c$ | $\Gamma, c^2/m^2$ | |
| Лак УР-231 | $5,2 \cdot 10^{-16}$ | $3,5 \cdot 10^{-12}$ | $1,48 \cdot 10^{-4}$ | Безкорпусна герметизація тонкоплівкових ГІС |
| Лак ФП-525 | $4,5 \cdot 10^{-16}$ | $1,18 \cdot 10^{-12}$ | $3,8 \cdot 10^{-4}$ | Безкорпусна герметизація тонкоплівкових ГІС |
| Клей ВК-3 | $2,9 \cdot 10^{-16}$ | $8,0 \cdot 10^{-13}$ | $3,6 \cdot 10^{-4}$ | Герметизація корпусів клеєвим швом |
| Клей ВК-9 | $3,3 \cdot 10^{-16}$ | $6,5 \cdot 10^{-13}$ | $5,63 \cdot 10^{-4}$ | Герметизація корпусів клеєвим швом |

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Конструювання і технологія електронних
приладів та пристроїв»
для студентів спеціальності
«Електронні прилади та пристрої»

Редактор Т. Старічек

Укладачі: Осадчук Олександр Володимирович
Крилик Людмила Вікторівна

Оригінал-макет підготовлено Л. Крилик

Підписано до друку
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад пр. Зам. № 2015

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.