

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ПЛІВКОВІ ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕГРОВАНИХ МІКРОСХЕМ:
РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

Магістрант групи ЕП.м-02



Р. В. Шкарупа

Науковий керівник,
канд. фіз.-мат. наук, ст. викладач



Ю. М. Шабельник

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д-р фіз.-мат. наук, професор



І. Ю. Проценко

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної кваліфікаційної роботи є плівкові елементи інтегрованих мікросхем.

Мета роботи полягає у вивченні принципів дії, конструкції, технологічних параметрів плівкових елементів інтегрованих мікросхем, аналізі областей і специфіці їх використання.

У цій роботі розглядається поточний стан елементів інтегральних мікросхем та наведено приклад розрахунку основних параметрів цих елементів, оскільки усі електронні системи сьогодні вимагають низької потужності, малошумної передньої частини та високої потужності та високої ефективності, які є суто аналоговими системами.

З еволюцією пристроїв, аналогові схеми мігрували від вакуумних ламп до біполярних транзисторів [BJT] до MOSFET, які можуть бути замінені новими пристроями майбутнього. Однак такі будівельні блоки, як операційні підсилювачі, помножувачі та компаратори, завжди залишаться такими основні функціональні блоки конструкції системи, незалежно від використовуваної для них технології пристрою.

Робота викладена на 34 сторінках, у тому числі включає 12 рисунків, 5 таблиць, список цитованої літератури із 24 джерел.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИСТОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	6
1.1 Використання тонкоплівкових елементів в електроніці.....	6
1.2 Конструкція та характеристика плівкових резисторів.....	8
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ ТА ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	14
2.1 Плівкові конденсатори.....	14
2.2 Тонкоплівкові індуктивні елементи.....	18
2.3 Характеристики тонкоплівкових матеріалів провідників та контактних площадок.....	22
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ	24
3.1 Розрахунок плівкових резисторів.....	24
3.2 Порядок розрахунку плівкових конденсаторів.....	28
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	32

ВСТУП

Розвиток технології одержання матеріалів у вигляді тонких плівок можна віднести до найбільш пріоритетних напрямів матеріалознавства. Цей факт зумовлений тим, що в тонких плівках властивості матеріалів часто значно відрізняються від тих, які були типові для тих самих матеріалів у вихідному стані.

Тонкі плівки, що наносяться у вакуумі, широко застосовуються у виробництві дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем (ІМС), а також при виготовленні фотошаблонів – основного технологічного інструменту мікроелектроніки. Сьогодні тонкоплівкові елементи займають до 80 % площі напівпровідникових кристалів, що зумовлено постійним функціональним ускладненням ІМС.

Постійний прогрес у розробці та виробництві інтегральних мікросхем (ІМС) дозволив інтегрувати понад два мільярди транзисторів на одному кристалі з тактовою частотою значно вище кількох гігагерц. Ці вдосконалення поклали початок ери «система на чіпі» (SoC) і система в пакеті (SiP), різко змінивши класичне розуміння шуму в складних мікросхемах.

Одержання високоякісних і відтворюваних за електрофізичними параметрами тонкоплівкових шарів є одним з найважливіших технологічних процесів формування структур дискретних діодів і транзисторів, а також активних і пасивних елементів ІМС. Тонкі плівки наносяться також під час заключних технологічних операцій виготовлення напівпровідникових приладів та ІМС, тобто після виконання безлічі інших операцій

На даний час в мікро- та наноелектроніці все частіше використовуються елементи інтегрованих мікросхем на основі тонких плівок різних матеріалів. Це можуть бути як мультишари, так і багат шарові плівки різних металів, їх оксиди тощо. Саме вивченню фізичних та розрахунку технологічних параметрів тонкоплівкових резисторів, конденсаторів та елементів індуктивності присвячена дана робота.

РОЗДІЛ 1

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИСТОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1 Використання тонкоплівкових елементів в електроніці

Для електроніки все більше і більше використовують елементи виготовлені на основі тонких плівок металів. Це можуть бути тонкоплівкові резистори, електроди або струмопроводи (електроди для тонкоплівкових конденсаторів, для елементів індуктивності, контактні площадки, провідники для монтажу, елементи транзисторів тощо), а також допоміжні елементи (наприклад, підшари струмопровідних плівок або маски) [1-4].

Найбільше поширення і застосування у мікроелектроніці набули перший і другий типи металевих тонкоплівкових елементів.

Звичайно, до матеріалів (металевих плівок), з яких виготовляються електроди та струмопроводи, пред'являються певні вимоги. Так, вони повинні мати достатньо високу питому провідність, володіти високою здатністю до адгезії з поверхнею підкладки або з нижнім шаром плівки, малий коефіцієнт теплового розширення тощо. Товщина таких металевих плівок, що застосовуються для побудови тонкоплівкових елементів змінюється в межах 2000 – 10 000 Å.

Мінімальна ширина елементів визначається роздільною здатністю процесу фотолітографії. Для сучасних інтегральних мікросхем роздільна здатність може складати лише 4-20 мкм. Здебільшого для покращення адгезії металевих плівок з діелектричною підкладкою на останню наносять тонкий підшар Cu, Ti або Mn товщиною лише 100 - 300 Å. Як матеріали для виготовлення металевих тонкоплівкових елементів, які зазначені вище, використовують Au, Ni, Cu, Al, Mo, Pd, Ta тощо. Параметри деяких таких

матеріалів наведені в таблиці 1.1.

Тонкі металеві плівки для резисторів, конденсаторів, чи елементів ємності виготовляють методами термовакуумного напылення та іонно-плазмового розпылення. Першим методом отримують плівки металів з товщиною, яка змінюється в досить широких межах. Як правило, такі плівки не містять сторонніх домішок, тому процес повинен проводитися у високому та надвисокому вакуумі. Метод іонно-плазмового розпылення використовується для отримання плівок будь-яких металів, у тому числі – тугоплавких. Одержані таким методом тонкі плівки характеризуються підвищеною адгезійною стійкістю та високою стабільністю параметрів [5]. Електрофізичні властивості тонких плівок найбільше залежать від їхньої товщини, що не залежать від способу отримання.

Як відмічалось вище, питома провідність таких тонких плівок металів зменшується зі зменшенням товщини. Це можна пояснити тим, що довжина вільного пробігу електронів у металевій плівці менша, ніж у масивному матеріалі. Через це електрони в плівці зазнають додаткових зіткнень з межами поверхонь. Електропровідність металів зумовлена тим, що вільні електрони всередині металів рухаються неупорядковано між атомами кристалічних ґраток.

Таблиця 1.1 – Приклади електрофізичних параметрів плівкових матеріалів [5]

Матеріал плівки	$\rho \times 10^{-8}$, Ом \times м	$\beta \times 10^{-3}$, К ⁻¹
Al	2,8	4,2
Au	2,4	3,8
Ag	1,6	4,0
Cu	1,7	4,3
Ni	7,3	6,5
Cd	10,0	4,0
Ni-Cr	100,0	1,7
Pd	10,7	3,8
In	2,8	4,2

1.2 Конструкція та характеристика плівкових резисторів

Тонкоплівкові резистори, які створюються на діелектричній основі або діелектричній плівці, що, в свою чергу, наноситься на металеву, напівпровідникову або діелектричну основу. Під час виготовлення тонкоплівкових резисторів на підкладку осаджують резистивні плівки. При цьому плівка робиться зі сплаву високого опору, якщо опір резистора не повинний бути занадто великим. Це може бути, наприклад, ніхром.

У той час, для резисторів з високим електричним опором використовується сплав металу з керамікою, що отримала назву кермет. На межах резистивної тонкої плівки роблять контакти у вигляді металевих плівок, які, разом з тим, є електродами, що з'єднують резистор з іншими тонкоплівковими елементами на електричній платі. Конфігурація резисторів, що зображена на рис. 1.1 визначається їх точністю, номінальним значенням, матеріалом резистивної смужки, методом формування геометричних розмірів, активною площею, що відводиться під резистор на платі, а також її питомим опором.

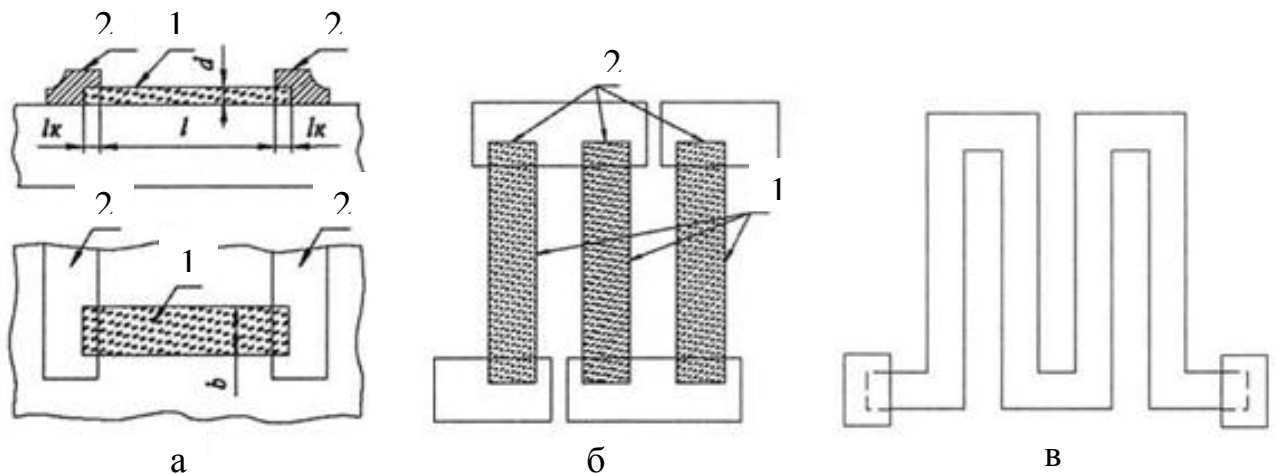


Рисунок 1.1 – Зразки резисторів інтегрованих мікросхем: 1 – чутливий елемент – резисторна смужка, 2 – контакти-виводи. Із роботи [5]

Такі тонкоплівкові резистори (рис. 1.1) складаються з резистивної смужки 1 (може бути простої або складної форми) та двох або більше виводів 2 для приєднання резистора до інших елементів мікросхеми. Найтехнологічнішими і найрозповсюдженішими конструкціями резистора є прямокутна (рис. 1.1, а) форма, у вигляді послідовно з'єднаних резистивних смужок (рис. 1.1, б) або щось на зразок меандру (рис. 1.1, в).

Опір плівки резистора, що позначається літерою R визначається конструктивно каналом провідності, який утворюється внаслідок випадкових декількох переходів носіїв електронів між окремими острівцями (рис. 1.2).

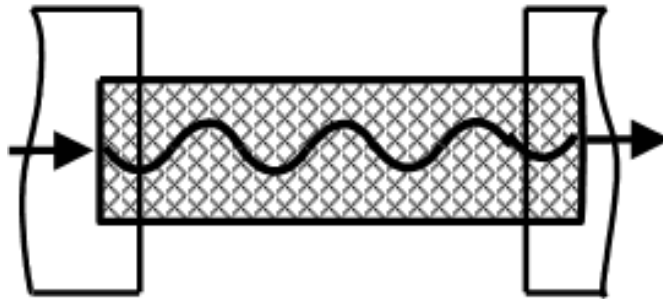


Рисунок 1.2 – Канал провідності тонкої резистивної плівки. Із роботи [6]

Питомий опір тонкоплівкових резисторів визначається в омах на квадрат (Ом/□). Таке визначення є можливим так як опір такої плівки у формі квадрата зовсім не залежить від розмірів цього самого квадрата. Справді, якщо зробити сторону квадрата, наприклад, у два, чи три рази більше, то довжина шляху, який проходить електричний струм збільшиться вдвічі або втричі. При цьому і площа поперечного перерізу струмопровідної плівки також зросте вдвічі або втричі, а, отже, опір залишиться без змін.

Опір тонкоплівкової резистивної смужки 1 для однакової по товщині резистивної плівки визначається за співвідношенням 1.1:

$$R = \rho \frac{l}{db} = \left(\frac{\rho}{d} \right) \left(\frac{l}{b} \right) = R \cdot k_{\phi} \quad (1.1)$$

де p – питомий опір матеріалу плівки; d – товщина плівки; l , b – довжина і ширина резистивної смужки відповідно; $R = p/d$ – опір квадрату резистивної плівки, Ом/□; $k_\phi = l/b$ – коефіцієнт форми або число квадратів резистивної смужки.

Виводи 2 є контактними площадками, з допомогою яких тонкоплівковий елемент під'єднується до інших елементів. Контакти будь-яких типів і форм мають кінцевий опір R_k , що залежить від опору резистивної смужки R_r , ширини плівки b , питомої електропровідності контактного переходу та величини перекриття резистивної і провідникової плівок I_k (рис. 1.2, а).

У свою чергу, для низькоомних тонкоплівкових резисторів при розрахунку опору резистора потрібно враховувати також опір двох контактних переходів. Співвідношення для визначення опору плівкового резистора у цьому випадку буде мати вигляд 1.2:

$$R = R_0 k_\phi + 2R_k \quad (1.2)$$

Резистивні смужки, так само, як і тонкоплівкові провідники можна отримати вакуумними методами з різних вище зазначених металів, резистивних сплавів, керметів тощо. Основні характеристики матеріалів та металів, що використовуються для виготовлення плівкових резисторів, приведено в табл. 1.2.

Можливості таких матеріалів дають змогу отримувати опір шару R_{Tl} від десятків омів до сотень кілоомів на квадрат і, таким чином, формувати резистори у широкому діапазоні опорів з досить високою точністю (близько 10%). На одній підкладці можна отримати відхилення значень опорів резисторів приблизно 1%. Плівкові резистори, що створюються на діелектричній основі, мають малу паразитну ємність і надійну добру ізоляцію.

Важливим параметром для тонкоплівкових резисторів є термічний

коефіцієнт опору β . Зазвичай, його визначають для стабільних плівок, що пройшли термообробку. Установлено, що термічний коефіцієнт опору β залежить від товщини плівки. Причому із зменшенням товщини β зменшується також, а при збільшенні – наближається до значення, яке характерне для масивного металу. Хоча для окремих типів металевих плівок ТКО має від’ємне

Таблиця 1.2 – Характеристики матеріалів плівкових резисторів [5]

Матеріал резистора	Матеріал контактних площинок	R_0 , Ом/D	$\beta \times 10^{-4}$ град ⁻¹	P_0 , мВт/мм ²
Хром	Мідь	500	0,6	10
Ніхром	Мідь	300	1,0	20
Тантал ТВЧ	Алюміній з підшаром ванадію (ніхрому)	100	-2,0	30
Сплав РС-3001	Золото з підшаром хрому (ніхрому)	1000...2000	-0,2	20
Сплав РС-3710	Те саме	3000	-3	20
Кермет К-50С	— » —	3000...10 000	3...-5	20
Полісиліцій /7-типу	Алюміній	50...250	+0,5...25	4,8
ПоліСИЛІЦІЙ 77 -	Алюміній	2...5	+1,0	4,8
Паста ПР-5, 100,500,	Паста ПП - 1,2, 3,4	5 - 1 000 000	+9... -20	30
1К, 3К, 6К, 20К, 50К, 100К, 500К, ЇМ	Паста ПП - 1,2,3,4	6000- 10 000 000	-10	50
Паста ОРП-ЮК, 20К, 50К, 100К,300К, ЇМ, 3М, 10М			>	

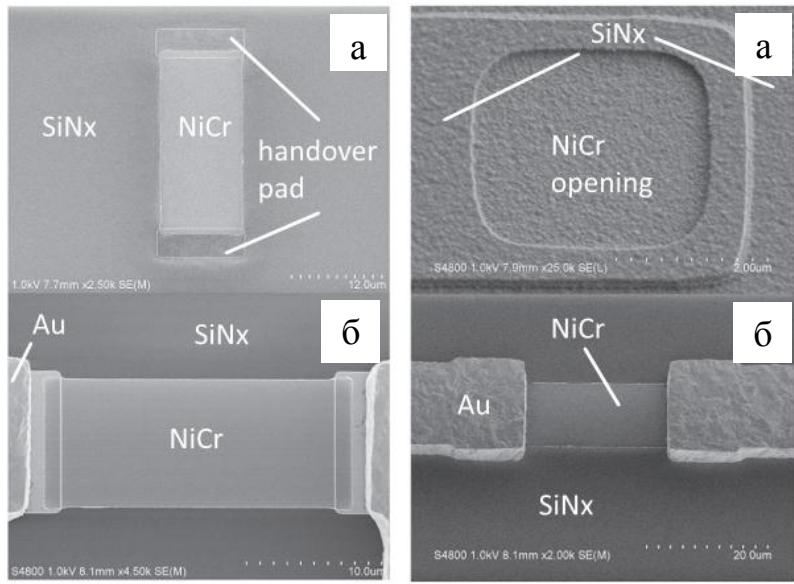


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд резистора до (а) і після (б) під'єднання до металевих контактних майданчиків. Адаптовано із роботи [13]

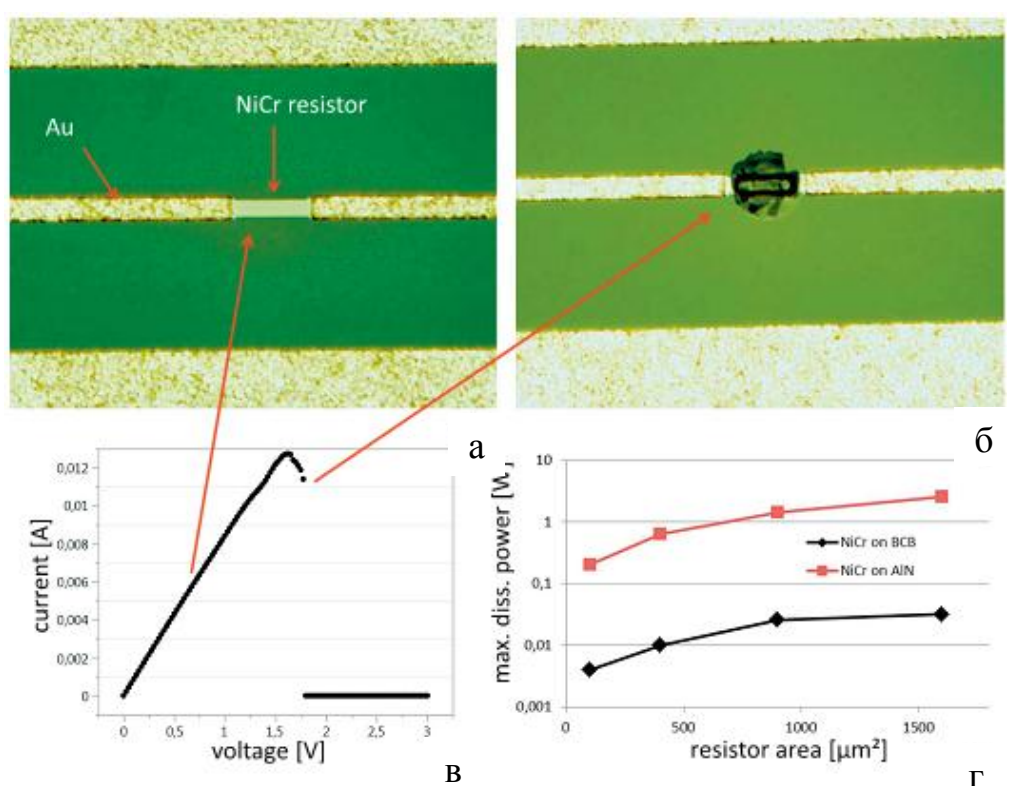


Рисунок 1.4 – Результати стрес-тесту резистора: а) зовнішній вигляд до проведення вимірювань; б) зовнішній вигляд після проведення вимірювань; в) залежність сили струма та напруги; г) максимальна потужність резистора. Адаптовано із [13]

значення і може навіть бути різним в залежності від технології та методів отримання плівок. Тому однією із важливих задач при розробці резисторів інтегральних мікросхем є отримання найменшого значення ТКО в діапазоні робочих температур.

Для виготовлення товстоплівкових резисторів для електричних мікросхем використовують пасти на основі металів Au, Pt, Pd тощо. Пасти наносяться на поверхню діелектричної основи з допомогою трафарету. Товщина шарів при нанесенні таким методом становить близько 20 мкм. Відносна похибка опору виготовленого резистора може бути $\pm 0,4$. Для зменшення похибки опору товстоплівкового резистора застосовують індивідуальну підгонку [7-10].

У роботах [11-13] представлена розробка тонкоплівкового резистора у вигляді плівки NiCr (рис. 1.3). Дана структура характеризується порівняно низьким опором контактних майданчиків, що становить $8 \cdot 10^{-10}$ Ом/□. Стрестести (рис. 1.4) показують високий термічний опір і високу робочу температуру NiCr. Автори роботи розробляли даний прилад для використання у високочастотних приладах терагерцового класу.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТОРІВ ТА ІНДУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Плівкові конденсатори

Тонкоплівкові конденсатори (рис. 2.1, а) складаються з трьох основних частин. Це дві провідникові обкладинки – 1, 2 (переважно з Al), що розділені діелектриком 3, які перекриваються. В залежності від товщини діелектрика плівкові конденсатори бувають тонко- або товстоплівковими [14-16].

Шар діелектрику тонкоплівкового конденсатора повинен відповідати ряду вимог: мати високу адгезію до матеріалу підкладки; бути ізолюючим непровідним матеріалом, який здатний утворювати непористі плівки; бути стійким до зміни температури середовища; мати пробивну напругу, що становить 100-200 В; температура випаровування при цьому – 1000 - 1200 °С; також бути сумісним з матеріалом обкладинок конденсатора [17-18].

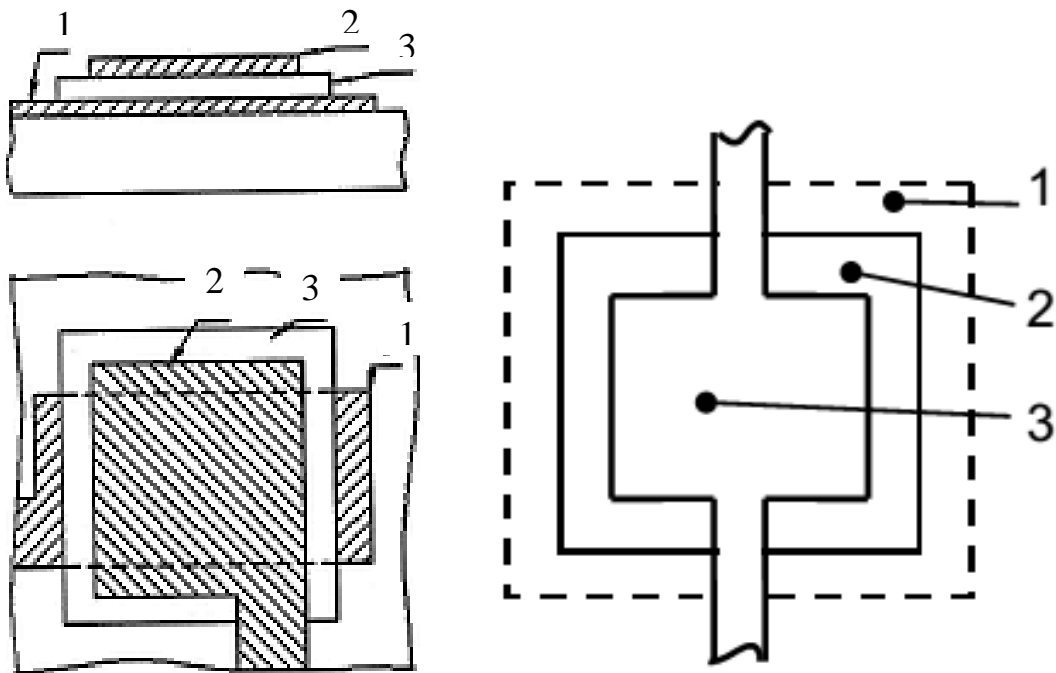


Рисунок 2.1 – Структура тонкоплівкового конденсатора: 1 – діелектрик; 2 та 3 – верхня і нижня обкладинки відповідно [5]

Ємність плоского плівкового конденсатора визначається за співвідношенням 2.1:

$$C = C_0 S + C_p P = (\varepsilon \varepsilon_0 / d) S + C_p P \quad (2.1)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу діелектрика; S – площа перекриття обкладинок; d – товщина діелектрика (0,2-0,3 мкм); $C_0 = (\varepsilon \varepsilon_0 / d)$ – питома ємність діелектрика; C_p – питома периметрична ємність, спричинена крайовим ефектом; P – периметр перекриття обкладинок.

Якщо площа перекриття обкладинок S більше 5 мм², то крайовими ефектами можна знехтувати. У такому випадку ємність конденсатора розраховують за спрощеною формулою 2.2:

$$C = C_0 S = (\varepsilon \varepsilon_0 / d) S \quad (2.2)$$

Тонкоплівковий конденсатор зазвичай формується на діелектричній основі або на ізоляційному шарі. У якості діелектрика для плівкових конденсаторів використовують різні діелектричні матеріали з питомою ємністю 10 - 1000 пФ/мм², що конденсують вакуумними методами.

Така методика дає можливість сформувати конденсатори ємністю від 20 до 1000 пФ з достатньо гарною добротністю і робочою напругою від 6 до 50 В. Ємність конденсатора понад 1000 пФ можна отримати використовуючи багат шарові структури конденсаторів за допомогою почергового нанесення провідникових і діелектричних плівок металів або використовуючи діелектричні плівки з великим значенням ε .

У мікросхемах, які виконані за танталовою технологією, у якості діелектрика використовують пентаоксид танталу. Він створюється електрохімічним анодуванням нижньої танталової обкладинки конденсатора. Ємність таких плівкових конденсаторів може досягати 0,1 мкФ.

Тонкоплівкові конденсатори, що мають ємність менше, ніж 30 пФ створюють за допомогою спеціальних конструкцій, наприклад, гребінчастої маски.

Ємність такого гребінчатого плівкового конденсатора може бути розрахована за співвідношенням 2.3:

$$C = \beta_c \varepsilon_1 L \quad (2.3)$$

де β_c – коефіцієнт, що залежить від ширини плівкових провідників та відстані між ними. Для випадку $b_1 = b_2 = b$, $a = 0,3b$, $\beta_c = 0,023$; $\varepsilon_1 = (\varepsilon_\beta + \varepsilon_{pr})/2$ розрахункове значення діелектричної проникності ε з урахуванням діелектричної проникності основи ε_β і діелектричної проникності захисного шару ε_{pr} ; L – довжина периметра перекриття обкладинок.

Товщина діелектричної плівки d визначається з умови забезпечення необхідної електричної стійкості конденсатора:

$$d = (Uk)/\xi_{max} \quad (2.4)$$

де k – коефіцієнт запасу електричної стійкості ($k = 2-10$); ξ_{max} – максимальна електрична стійкість діелектрика.

Товщину шару діелектрика вибирають в діапазоні від 0,05 до 1,0 мкм. Для виготовлення тонкоплівкових конденсаторів використовують наступні сполуки: SiO, SiO₂, MgF₂, GeO, ZnS, CrTiO₃, BaTiO₃, Al₂O₃, TaO тощо. Електричні параметри деяких діелектричних матеріалів тонкоплівкових конденсаторів наведені в таблиці 2.1.

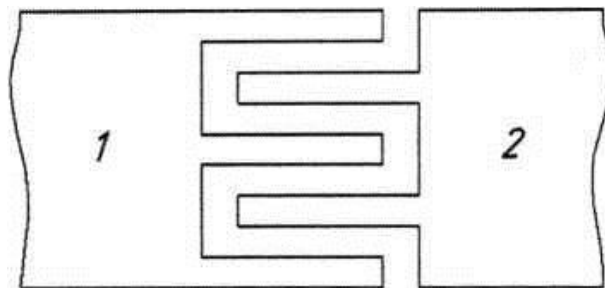


Рисунок 2.2 – Конденсатори інтегрованих мікросхем [4]

Таблиця 2.1 – Електричні характеристики діелектричних матеріалів, які використовуються для виробництва тонкоплівкових конденсаторів [4]

Матеріал	E	$\text{tg}\delta,$ $F=1\text{кГц}$	$\xi_{\text{max}} 10^{-3}$ В/мм	C_0 пФ/мм ²	$U, \text{В}$
Монооксид Si	5...6	0,0015	2...3	50	60
				100	30
Монооксид Ge	11...12	0,005	1,0	50	10
				100	7
				1500	5
Боросилікатне скло	4	0,001	3...4	25	24
				50	15
				100	10
Трисульфід Sb	13...14	0,01	1...2	50	10
				100	5
				600	15
Пентаоксид Ta	23	0,02	2,0	1000	10
				50	
Діоксид Si	4	0,02	1,5...10	50	
				100	

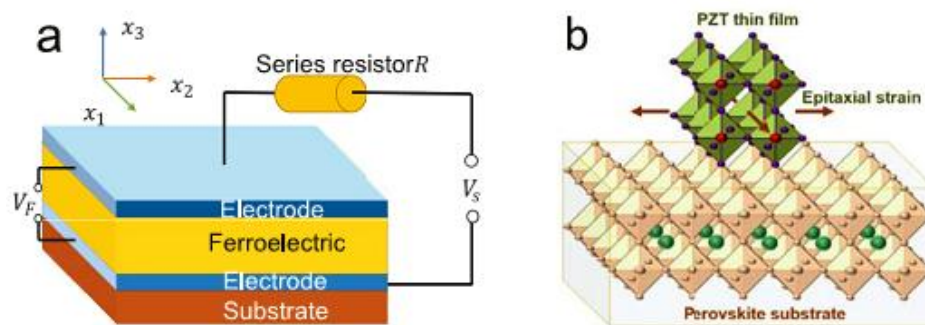


Рисунок 2.3 – Схема підключення ферроелектричної тонкої плівки в коло резистор-конденсатор (а) та епітаксійно вирощена на підкладці перовскиду плівка PZT (б). Із роботи [19]

Тонкоплівкові конденсатори мають досить високу добротність та широкий частотний діапазон. Відносна похибка ємності таких плівкових конденсаторів досягає лише величини 0,1 - 0,15. Для формування товстоплівкових конденсаторів використовують, як і у випадку резисторів, діелектричні пасти, які мають $\varepsilon > 500$ (це може бути титанат барію). Використовуючи такі діелектрики, створюються товстоплівкові конденсатори з питомою ємністю 150 - 200 пФ/мм². Шари обкладок (верхній та нижній) товстоплівкових конденсаторів виготовляють із провідникових паст.

У роботі [19] представлені результати досліджень застосувань тонкоплівкових конденсаторів, особливо у терагерцовому діапазоні. У роботі моделюється поведінка таких приладів у різних умовах, а також приділена увага до методів та методик отримання плівкових структур для таких приладів. На рис. 2.3 представлена схема підключення ферроелектричної тонкої плівки в коло резистор-конденсатор (а) та епітаксійно вирощена на підкладці перовскиду плівка PZT (б).

2.2 Тонкоплівкові індуктивні елементи

Тонкоплівкові індуктивні елементи – котушки, які застосовуються у гібридних інтегральних мікросхемах поділяються на два типи: перший – мікрокатушки, що монтуються на плату ПМС, другий тип – індуктивні елементи, які виконуються у вигляді плоских квадратних або круглих спіралей (рис. 2.4, а, б), окремих витків (рис. 2.4, в) та прямокутних відрізків тонкоплівкових провідників (рис. 2.4, г), які наносяться на діелектричну або магнітну основу або плівку металу [20-23].

Основними параметрами тонкоплівкових індуктивних елементів є індуктивність L , добротність Q , власна резонансна частота f_0 та ін. Усі ці параметри залежать від конструкції та розмірів спіралі, питомого опору провідникового матеріалу, а також фізичних умов середовища, у якому

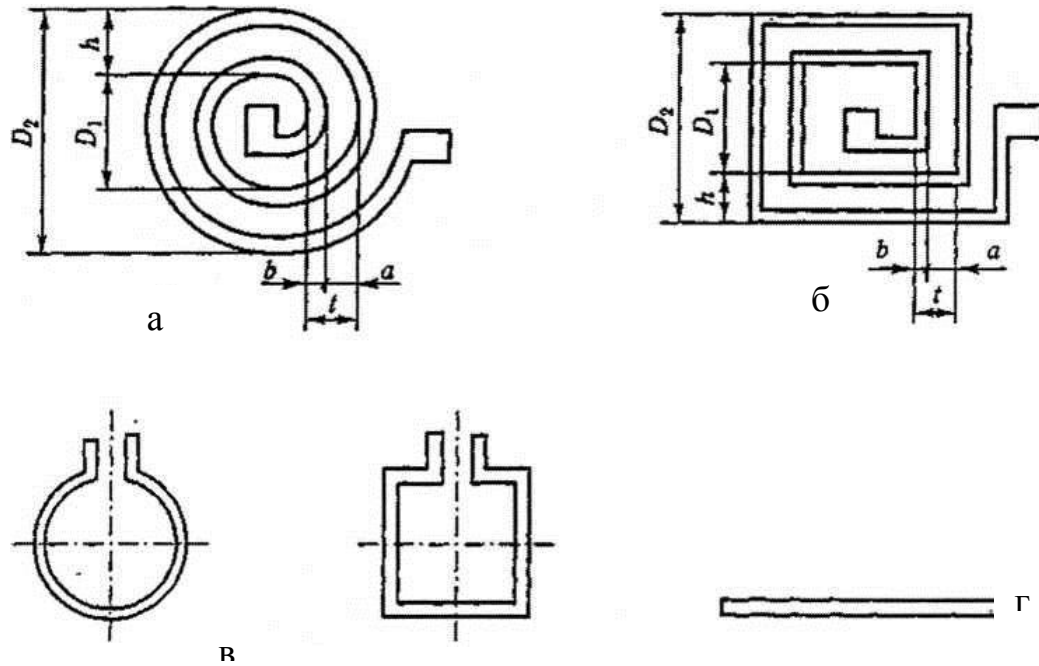


Рисунок 2.4 – Індуктивні елементи інтегрованих мікросхем, виконані у вигляді плоских квадратних або круглих спіралей (рис. 2.4, а, б), окремих витків (рис. 2.4, в) або прямокутних відрізків плівкових провідників (рис. 2.4, г). Із роботи [5]

знаходиться індуктивний елемент. Індуктивність визначається зовнішнім діаметром спіралі P_2 , що обмежується розмірами 15-20 мм. Якщо не використовувати магнітних сплавів або мультишарів, то значення індуктивності не перевищує одиниць мікрогенрі.

Індуктивність плоскої спіралі круглої форми розраховують за співвідношенням 2.5:

$$L=5 \frac{(D_2+D_1)W^2}{15D_2-7D_1}, \quad (2.5)$$

а індуктивність плоскої спіралі квадратної форми можна визначити за іншою формулою:

$$L=6 \frac{(D_2+D_1)W^2}{15D_2-7D_1} \quad (2.6)$$

де D_1 , D_2 – внутрішній та зовнішній діаметри спіралі відповідно, мм; W – число витків (індуктивність L вимірюється в нГн).

Для збільшення індуктивності спіралей, що складають індуктивний елемент, застосовують матеріали з підвищеною магнітною проникністю μ або покривають чутливі елементи (спіралі) плівками з підвищеним значенням μ .

Тонкоплівкові спіралі квадратної форми мають за таких самих значеннях D_1 , D_2 , та W більшу індуктивність, ніж спіралі круглої форми.

Через те, що елемент, з якого виготовлена спіраль має дуже велику довжину, його опір досягає одиниць Ом. Це знижує добротність тонкоплівкових індуктивних елементів.

Максимальне значення добротності досягається для круглої спіралі при умові $D_1/D_2 = 0,4$, а для квадратної спіралі – $D_1/D_2 = 0,36$. Проте квадратну конструкцію майбутнього індуктивного елемента порівняно легше виконати. При цьому, вона займатиме меншу площу, ніж кругла.

Мінімальна площа, що займають індуктивні елементи з внутрішнім діаметром D_1 , що дорівнює нулю співвідношення $D_1/D_2 = 0$.

Значення добротності для круглої спіралі індуктивного елемента розраховують за співвідношенням 2.7:

$$Q = 2 \times 10^3 \frac{Wb(D_2 + D_1)\sqrt{f}}{15D_2 - 7D_1} \quad (2.7)$$

а для квадратної – за співвідношенням 2.8:

$$Q = 1.6 \times 10^3 \frac{Wb(D_2 + D_1)\sqrt{f}}{15D_2 - 7D_1} \quad (2.8)$$

де b – ширина провідника, мм; f – частота, ГГц.

Тонкоплівкові індуктивні елементи надвисоких частот характеризуються значенням індуктивності, що досягає 10-20 нГн. Їх зазвичай виконують у вигляді плоского прямокутного провідника, рідше круглого або квадратного витка (рис. 2.4, в, г). Індуктивність такого плоского прямокутного провідника розраховують за співвідношенням 2.9:

$$L = 0,2 l \left[\ln \left(\frac{l}{b} + d \right) + 1,19 + 0,22 \frac{(b+d)}{l} \right] \quad (2.9)$$

де l – індуктивність, нГн; l, b, d – довжина, ширина і товщина прямокутного провідника відповідно, мм.

За допомогою наведеного нижче співвідношення 2.10 розраховують індуктивність плоских виводів компонентів. Індуктивність круглого витка обчислюють за формулою:

$$L = 0,2 l \left[\ln \left(\frac{2l}{b+d} \right) - 2,451 \right] \quad (2.10)$$

де L – індуктивність, нГн; l, b, d – периметр, ширина і товщина провідника витка відповідно, мм. При цьому індуктивність квадратного витка визначають за співвідношенням 2.11:

$$L = 0,2 l \left[\ln \left(\frac{2l}{b+d} \right) - 2,853 \right] \quad (2.11)$$

де L – індуктивність, нГн; l, b, d – сторона квадрата, ширина і товщина провідника витка відповідно, мм.

Тонка плівка у вигляді циліндричного провідника може також використовуватись як індуктивний елемент ІМС. При цьому її індуктивність буде розраховуватися за співвідношенням 2.12:

$$L = 0,2 l [\ln(l/d) + 0.386] \quad (2.12)$$

де L – індуктивність, нГн; l, d – довжина і діаметр провідника відповідно, мм.

Але частіше це співвідношення використовують для розрахунків індуктивності виводів компонентів ГІС. Індуктивні елементи ІМС НВЧ повинні мати довжину провідника набагато меншу, ніж довжина хвилі.

Серед недоліків індуктивних елементів можна віднести такі: нижча добротність порівняно з дискретними, великі габаритні розміри, більша відносна похибка індуктивності, що становить 0,2 - 0,3, а також неможливість простого підстроювання параметрів.

Якщо розмістити дві плоскі котушки з протилежних боків підкладки, то можна отримати тонкоплівковий трансформатор. Товщина підкладки буде визначати величину взаємної індукції. При цьому коефіцієнт взаємної індукції буде низьким, так як матеріалом підкладки є не магнетик.

2.3 Характеристики тонкоплівкових матеріалів провідників та контактних площадок

У гібридних інтегральних мікросхемах з'єднання між тонко плівковими елементами також виготовляють з тонких металевих плівок, які повинні забезпечувати наступні властивості: високу електропровідність; достатньо високу адгезію до діелектричної підкладки, на якій розташовані елементи; корозійну стійкість та забезпечувати можливість приєднання контактів з дроту.

Жоден з існуючих металів не відповідає всім цим вимогам, через це все ширше застосування в мікроелектроніці знаходять багат шарові плівкові структури (мультишари, тверді розчини тощо). Як приклад, розглянемо тришарову плівку, як паралельне з'єднання трьох окремих шарів - резисторів (співвідношення 2.13, 2.14):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.13)$$

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} \quad (2.14)$$

Достатньою умовою є те, що один із шарів повинен мати великий опір. При цьому нижній шар багат шарової плівки виготовляють з матеріалів, які мають високу адгезію до підкладки. Це можуть бути Cr, Mn, V, Ni-Cr. При

Таблиця 2.2 – Характеристики матеріалів для виготовлення міжелементних з'єднань та контактних площадок [14]

Матеріал	Товщина, А	Питомий опір, Ом×м	Спосіб приєднання зовнішніх виводів
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Си Шар 3 Ni	100-300 4000 - 10000 500 - 700	0,02 - 0,04	зварювання непрямым імпульсним нагрівом
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Си Шар 3 Ag	100-300 4000- 10000 800- 1000	0,02 - 0,04	пайка мікропаяльником; зварювання непрямым імпульсним нагрівом
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Си Шар 3 Au	100-300 6000 - 8000 500 - 600	0,02 - 0,04	пайка мікропаяльником; зварювання непрямым імпульсним нагрівом
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Al Шар 3 Ni	400 - 500 2500 - 3500 500 - 700	0,10 - 0,20	зварювання подвійним електродом

певних умовах плівки вищевказаних металів можуть утворювати оксиди з фазовим складом Me (метал) + MeO. Саме наявність оксиду у такому випадку буде забезпечувати високу адгезію плівок. Товщина адгезійного шару становить 300–500 А. З метою забезпечення високої електропровідності використовують плівки Ni, Си, Au, Al.

В таблиці 2.2 представлені типові параметри найбільш поширених плівкових матеріалів, які використовують для виготовлення міжелементних з'єднань та контактних площадок мікросхем. В ІМС часто відбувається перехреснування провідників один одним. Для цього використовують конденсацію діелектричного шару. Ємність такого шару не повинна перевищувати 2 пФ. У якості матеріалів для діелектричного шару використовують оксиди SiO, SiO₂ або Al₂O₃. Мінімальна товщина таких діелектричних плівок становить 0,5 мкм, пробивна напруга приблизно 106 В. При використанні міжшарової ізоляції у структурі метал-діелектрик-метал також виникають гальванодифузійні ефекти.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛІВКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Розрахунок плівкових резисторів

Для отримання тонкоплівкових резисторів використовують напилення у вакуумі на підкладку плівкових смужок металів необхідних конфігурацій. Схема тонкоплівкового резистора представлена на рис. 3.1. Найбільше поширення отримали конфігурації плівкових резисторів типу «прямокутний» та «меандр». Для них достатньо просто виготовити фотооригінали і тим самим почати серійне виробництво. Найкращий варіант та чіткі контури досягається при використанні прямокутної конфігурації. Однак зі збільшенням опору резистора зростає площа, займана плівкою. У цьому випадку застосовується меандр.

При конструюванні плівкових прямокутних резисторів необхідно враховувати величину питомого об'ємного електричного опору плівки S_n , що залежить від товщини плівки d . На практиці користуються питомим електричним опором $S_0 = r_n/d$, що є постійним для будь-якого квадрату поверхні плівки.

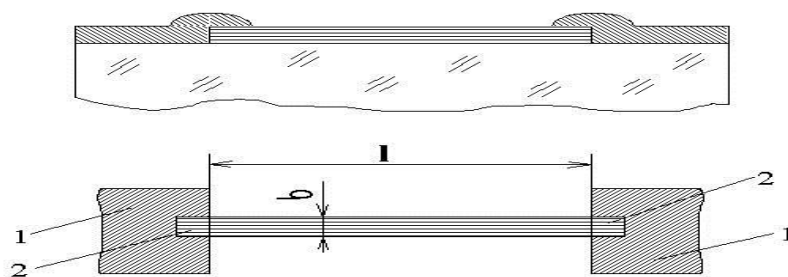


Рисунок 3.1 – Розміри плівкового резистора прямокутної форми, де 1 – комутаційний провідник, 2 – контактний перехід, 3 – резистивна плівка [16]

Порядок розрахунку плівкових резисторів прямокутної форми

Вхідні дані для розрахунку тонкоплівкового резистора:

$$R, \gamma_R, t_{max}, \gamma_{Rk} = 1 - 3\%, \gamma_{ct} = 0,5 - 2\%$$

А також технологічні дані: $\gamma_{p_0}, \Delta b, \Delta l$.

Далі, по наведеним вище формулам виконуємо розрахунки плівкового резистора. Після того, як знайдена площа резистора $S = b \times l$, визначається дійсна питома потужність розсіювання:

$$P'_0 = \frac{P}{S} < P_0 \quad (3.1)$$

а також нове значення $\gamma'_{K\phi}$. При цьому:

$$\gamma'_R = \gamma_{p_0} + \gamma_{K\phi} + \gamma_{Rt} + \gamma_{Rct} + \gamma_{Rk} < \gamma_R \quad (3.2)$$

Якщо нерівності (2.21) і (2.22) не виконуються, необхідно повторити розрахунок, вибравши інший матеріал плівки, або змінити в межах допустимого значення R_{cm}, g_{Rk} .

Розрахунок та конструювання плівкових контактних переходів

Мінімальна довжина перекриття плівок контактного переходу визначається наступним чином:

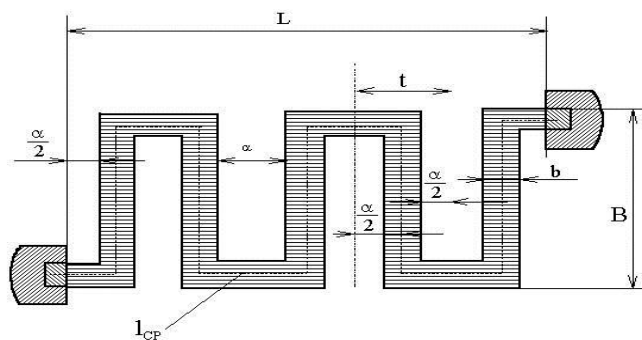


Рисунок 3.2 – Розміри плівкового резистора типу меандр [20]

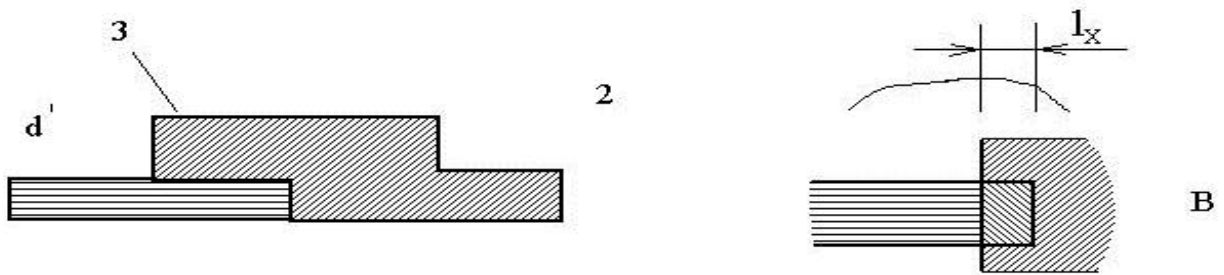


Рисунок 3.3 – Контактний перехід плівкового резистора [21]

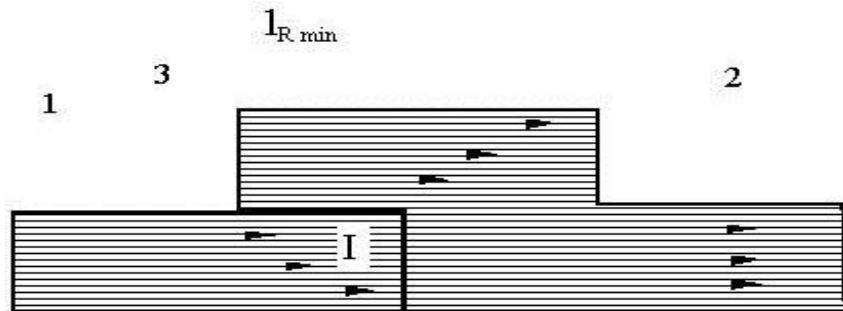


Рисунок 3.4 – Лінії струму на переході [21]

$$l_{K_{min}} \geq 1,5 \times \sqrt{\frac{\rho_K}{\rho_0}}. \quad (3.3)$$

Повна довжина переходу й ширина низькоомної плівки комутаційного провідника B з урахуванням похибок виготовлення масок D_1, D_b , установки та зміщення їх з підложкою D_{1Y} рівні відповідно:

$$l_K \geq l_{K_{min}} + \Delta l + \Delta l_Y, \quad (3.4)$$

$$B \geq b + 2 \times (\Delta b + \Delta l_Y). \quad (3.5)$$

На закінчення визначаємо, що якщо нерівності (3.4-3.5) не виконується, необхідно збільшити ширину b даного резистора та у відповідності з новим значенням b змінити його розміри.

Розрахунок плівкового резистора типа меандр.

Початкові параметри для розрахунку тонкоплівкового резистора типу меандр: $R = 15$ кОм, $g_R = 15\%$, $P = 50$ мВт, $t_{max} = 85^\circ$ С.

Технологічні параметри: $g_{ro} = 5\%$, $D_b = 0,02$ мм, $D_l = 0,04$ мм.

1. Усі резистори повинні бути виготовлені з однакового матеріалу.
2. Обчислюємо коефіцієнт форми резистора по формулі 3.6:

$$K_\Phi = \frac{15000}{250} = 60 \quad (3.6)$$

3. Визначаємо відносну зміну опору при найбільшій робочій температурі мікросхеми за співвідношенням: $g_{Rl} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (85-20) = 0,013 = 1,3\%$.

4. Обчислюємо максимально допустиму відносну похибку коефіцієнта форми тонкоплівкового резистора за співвідношенням, що визначене вище ($g_{Rk} = 2\%$). $g_{K\Phi\text{доп}} = 15 - 5 - 1,3 - 0,5 - 2 = 6,2\%$,

5. Визначаємо ширину резистивної смужки за співвідношеннями:

$$b_{min1} = \frac{0,02 + 0,04/60}{0,062} = 0,333 \text{ мм}; \quad (3.7)$$

$$b_{min2} = \sqrt{\frac{50 \times 250}{10 \times 15000}} = 0,298 \text{ мм}; \quad (3.8)$$

Нехай $b = 0,4$ мм;

6. Визначаємо середню довжину тонкоплівкового резистора типу «меандр»: $l_{CP} = b \cdot K_\Phi = 0,4 \cdot 60 = 24$ мм;

7. Задаєм відстань між резистивними смужками: $a = b = 0,4$ мм.

8. Визначаємо оптимальну кількість ланок меандра за співвідношеннями 3.9-3.10:

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{0,4^2}{4 \times 0,8^2}} + \sqrt{\frac{24}{0,8}} - \frac{0,4}{2 \times 0,8} = 5,23; \quad (3.9)$$

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{24}{0,8}} = 5,48; \quad (3.10)$$

9. Нехай $n = 5$.

10. Визначаємо розміри контура тонкоплівкового резистора:

$$L = n \times (a + b) = 5 \times (0,4 + 0,4) = 4 \text{ мм},$$

$$B = (24 - 0,45) / 5 = 4,4 \text{ мм}.$$

11. Перевіряємо розрахунки – d . Повинна виконуватися умова:

$$\frac{4,4 - 0,4}{10} = 0,4$$

12. Визначаємо площу, що займає резистор: $S_M = 4 \times 4,4 = 17,6 \text{ мм}.$

13. Для перевірки обчислимо дійсну питому потужність тонкоплівкового резистора: $S = l_{CP} * b = 24 * 0,4 = 9,6 \text{ мм}; P_{\zeta_0} = \frac{P}{S} = \frac{50}{9,6} = 5,21 \text{ мВт}.$

3.2 Порядок розрахунку плівкових конденсаторів

Вхідні дані для розрахунку тонкоплівкового конденсатора [24]: $C, g, C, U_P, t_{MAX}.$

Технологічні параметри: $C_0, L, B, l_Y.$

Матеріал діелектрика вибираємо з таблиці 3.1.

Далі, по наведеним вище формулам визначаються параметри конденсатора.

У кінці розрахунку проводять перевірку конденсатора на електричну міцність.

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U_P}{d} > E_P. \quad (3.11)$$

Розрахунок плівкового конденсатора

Початкові параметри для розрахунку тонкоплівкових конденсаторів:

$$C = 5100 \text{ пкФ}, g_C = 15 \%, V_P = 6,3 \text{ В}, t_{MAX} = 85^\circ \text{ С}.$$

Технологічні параметри: $g_{C_0} = 5 \%, DL = DB = 0,05 \text{ мм}, Dl_Y = 0,1 \text{ мм}.$

1. З таблиці 3.1 обираємо матеріал діелектричного шару: це може бути,

наприклад, моноокис кремнію з наступними параметрами: $\varepsilon=5$, $E_{ПР}=200$ В/мкм, $a_2 = 3,5 \times 10^{-4}$ [1/° C], $g_{Ccm} = 1,5\%$.

Таблиця 3.1 – Електричні характеристики діелектриків [20].

Матеріал	Відносна діелектрична проникність, \square	Електрична міцність ЕМ, В/мкм	ТКС $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ в діапазоні температур -65+125 °C	Стабільність %
Моноокис кремнію	5 - 6	200 - 400	3.5	(1.5 - 6)
Моноокис германію	10 - 11	50 - 150	5	-1.0
Трьохсерниста сурма	18 - 21	20 - 100	5	15

2. Із співвідношення для a_{MIN} визначаємо товщину діелектричного шару:

$$a_{MIN} = \frac{4 \cdot 6,3}{200} = 0,126 \text{ мкм.}$$

3. Розраховуємо відносну зміну ємності при максимальній робочій температурі за співвідношенням: $g_{Ct} = 3,5 \times 10^{-4} \times (85-20) \times 100 = 2,28 \%$

4. Визначаємо максимально допустиму похибку активної ділянки конденсатора за співвідношенням для g_S при П: $g_S \text{ при П} = 15-5-2,28-1,5 = 6,62 \%$.

5. Розраховуємо максимальне значення питомої ємності плівкового конденсатора. Для цього використаємо формули для електричної міцності діелектричного шару та співвідношення для розрахунку заданої точності ємності конденсатора:

$$C_{0MAX1} = \frac{0,0885 \times 5}{0,126 \times 10^{-3}} = 3512 \text{ пкФ/мм}^2 \quad (3.12)$$

$$C_{0MAX2} = \frac{5100 \times 0,0622^2}{4 \times 0,05^2} = 1973 \text{ пкФ/мм}^2 \quad (3.13)$$

6. Оберемо величину C_0 . Для цього повинні враховуватися обидві вище зазначені умови. У нашому випадку $C_0 = 1973 \text{ пкФ/мм}^2$

Якщо обране C_0 відрізняється від розрахованого по формулі, необхідно обчислити нове значення d .

$$d = \frac{0,0885 \times e}{C_0} = \frac{0,0885 \times 5}{1973} = 0,224. \quad (3.14)$$

7. Обчислимо активну ділянку плівкового конденсатора S :

$$S = C/C_0 = 2,6 \text{ мм}^2.$$

8. Обчислимо розміри верхньої обкладки тонкоплівкового конденсатора

$$L_2 = B_2 = \sqrt{2,6} = 1,61 \text{ мм.}$$

9. Визначаємо розміри нижньої обкладки плівкового конденсатора L_1 :

$$L_1 = B_1 = 1,65 + 2 \times (0,05 + 0,1) = 1,65. \text{ Звідси } L_1 = B_1 = 1,65 \text{ мм.}$$

10. Розраховуємо розміри діелектричного шару плівкового конденсатора

$$L_d = B_d = 1,95 + 2 \times (0,05 + 0,1) = 2,25 \text{ мм.}$$

11. Розраховуємо площу, що займає конденсатор на кремнієвій підкладці

$$S = 2,25 \times 2,25 = 5,06 \text{ мм.}$$

Таким чином, розрахований тонкоплівковий конденсатор буде мати ємність, яка дорівнюватиме межі допуску.

ВИСНОВКИ

1. У роботі були розглянуті питання, які стосуються електрофізичних властивостей та параметрів плівкових матеріалів мікроелектроніки (теоретичні моделі розмірного ефекту та температурного коефіцієнту опору одно- та багатошарових плівок); конструктивно-технологічних особливостей і робочих характеристик плівкових елементів гібридних інтегральних мікросхем різних типів (плівкових резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності, *R-C*-структур).

2. Показано, що в мікроелектроніці на основі тонких металевих плівок виконують наступні конструктивні елементи: плівкові резистори; електроди і струмопроводи (електроди плівкових конденсаторів, струмопроводи спіральних індуктивностей, монтажні провідники, контактні площадки, затвори МДН - транзисторів); допоміжні елементи (підшари струмопровідних плівок, масок і ін.).

3. Освоєна методика розрахунку параметрів тонкоплівкових елементів інтегрованих мікросхем – резисторів та конденсаторів. Визначені розміри активної ділянки елементів, розміри діелектричного і активних шарів конденсатора.

4. Експериментальні залежності величини вихідного від вхідного струму і коефіцієнта передачі струму показують, що максимальна величина коефіцієнта становить $\kappa = 0,87$ і відповідає значенню вхідного струму $I_{ex} = 7,2$ мА. Залежність $I_{вих}(I_{вх})$ має майже лінійний характер, що характерно для фотогенераторного режиму роботи оптоелектронної інтегральної схеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Structural and Electrical Characterizations of CuNi Thin Film Resistors / N. K. Yusop, N. M. Shariff, S. C. Chow, A. B. Ismail // *Procedia Chemistry*. – 2016. – V. 19. – P. 619–625.
2. Wafer-scale synthesis of semiconducting SnO monolayers from interfacial oxide layers of metallic liquid tin / T. Daeneke, P. Atkin, R. Orrell-Trigg, [et al.] // *ACS Nano*. – 2017. – V. 11. – ID 10974.
3. Lin. C.-H. A study on the NiCrMnZr thin film resistors prepared using the magnetron sputtering technique / C.-H. Lin, H.-Y. Lee, Y.-T. Tseng, Y.-C. Lee // *Thin Solid Films*. – 2021. – In Press.
4. Cao Hongtao. Tin oxide-based thin-film transistors and their circuits / Hongtao Cao, Lingyan Liang // *Tin Oxide Materials: Synthesis, Properties, and Applications Metal Oxides*. – 2020. – P. 441–476.
5. Прищеп М. М., Погребняк В. П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
6. Лещенко М. Є., Васильєва І. К., Замірець О. М., Овчаренко В. Є. Основи мікроелектроніки: навч. посіб. до лаб. практикуму, Ч. 1. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. Інститут», 2010. – 64 с.
7. Закалик Л. У., Ткачук Р. А. Основи мікроелектроніки. – Тернопіль, 1998. – 380 с.
8. Garzon-Fontecha A. Electrical, optical, and structural characterization of p-type N-doped SnO thin films prepared by thermal oxidation of sputtered SnNx thin films / A. Garzon-Fontecha, W. De La Cruz, M. Quevedo // *SurfaceInterface Analysis*. – 2017. – V. 49. – P. 1225–1231.
9. Борисов О. В., Якименко Ю. І. Твердотільна електроніка: підручник за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 484 с.
10. Reliability and characteristics of magnetron sputter deposited tantalum nitride for thin film resistors / D.-W. Lee, Y.-N. Kim, M.-Y. Cho [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2021. – In Press.

11. A 95 GHz Bandwidth 12 dBm Output Power Distributed Amplifier in InP-DHBT Technology for Optoelectronic Applications / T. Shivan, N. Weimann, M. Hossain [et al.] // 2018 11th German Microwave Conference (GeMiC). – 2018. – ID 17685934.
12. 300-GHz direct and Heterodyne active imagers based on 0.13 um SiGe HBT technology / D. Yoon, J. Kim, J. Yun [et al.] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2017. – V. 7. – P. 536–545.
13. NiCr resistors for terahertz applications in an InP DHBT process / Dimitri Stoppel, Ina Ostermay, Michael Hrobak [et al.] / Microelectronic Engineering. – 2019. – V. 208. – P. 1–6.
14. Сенько В. І., Панасенко М. В., Сенько Є. В. Електроніка і мікросхемотехніка. Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
15. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. – Львів: Новий світ-2000, 2003. – 128 с. (5)
16. Матвієнко М. П. Основи електроніки: підручник – Київ: Видавництво Ліра К, 2017. – 364 с.
17. Enhanced energy-storage density and temperature stability of $\text{Pb}_{0.89}\text{La}_{0.06}\text{Sr}_{0.05}(\text{Zr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05})\text{O}_3$ anti-ferroelectric thin film capacitor / Z. Tang, S. Hu, D. Yao [et al.] // Journal of Materiomics. – 2021. – In Press.
18. Spatially resolved steady-state negative capacitance / A. K. Yadav, K. X. Nguyen, Z. Hong [et al.] // Nature. – 2019. – V. 565. – P. 468–471.
19. Li Xiaohan. Electrical and optical modulation on ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) thin film capacitors / Xiaohan Li, Biaohong Huang, Weijin Hu, Zhidong Zhang // Journal of Materials Science & Technology. – 2019. – V. 35. – P. 2194–2199
20. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є., Чернівчан В. Я., Мусихіна Н. П. Основи електроніки з елементами мікроелектроніки: Навчальний посібник. – Львів: «Магнолія 2006» Видання 2, 2017. – 225 с.
21. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посіб. / за ред.

- Ю. Л.Мазора, Є. А.Мачуського, В. І. Правди. – Київ: Вища школа, 1999. – 838 с.
22. Царенко О. М. Основи фізики напівпровідників і напівпровідникових приладів: навчальний посібник. – Кіровоград: РВВ КДПУ, 2011. – 243 с.
23. Матвійків М. Д., Когут В. М., Матвійків О. В. Елементна база електронних апаратів Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2007. – 428 с.
24. Liu C. Strain engineering of ferroelectric negative capacitance in $\text{PbZr}_{(1-x)}\text{Ti}_x\text{O}_3$ thin films / C. Liu, J. Wang // *Acta Materialia*. – 2021. – V. 206. – ID 116607.