

### 3. Інтегральні конденсатори

*Інтегральні конденсатори* є елементами ІС, що складаються з провідних електродів (обкладок), розділених діелектриком, і призначені для використання в електричних колах для забезпечення необхідного розподілу струму і напруги між окремими елементами кола.

В ІС роль конденсаторів відіграють оборотно-зміщені  $p$ – $n$ -переходи, виконані на основі транзисторної структури в єдиному технологічному процесі.

У біполярних транзисторних структурах в конструкції інтегрального транзистора використовують один з переходів: “емітер-база”, “база-колектор”, “колектор-підкладка”. Ці переходи формуються дифузійною і тому часто називаються *дифузійними конденсаторами*.

Ємність конденсатора визначається ємністю переходу, що має дифузійну і бар’єрну складові. Основну роль грає бар’єрна ємність. Бар’єрна ємність пов’язана з утворенням області об’ємного заряду і потенціального бар’єру між  $n$ - і  $p$ -областями переходу. Область об’ємного заряду  $p$ – $n$ -переходу можна інтерпретувати як аналог діелектрика звичайного конденсатора, якщо вважати, що в ньому відсутні рухомі носії зарядів.

Ширина цієї області і густина об’ємних зарядів нерухомих іонів донорних і акцепторних домішок залежать від напруги зворотного зміщення, а також від контактного потенціалу  $\varphi_k \geq 10 \frac{kT}{q}$ .

З підвищенням напруги зворотного зміщення ширина області об’ємного заряду збільшується, що приводить до зменшення бар’єрної ємності. Величина бар’єрної ємності може бути визначена із співвідношення:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{x_n - x_p}, \quad (10.2)$$

де  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність,  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність,  $S$  – площа  $p$ – $n$ -переходу,  $x_n$  і  $x_p$  – межі області об’ємного заряду в матеріалах  $n$ - і  $p$ -типів. Величина  $x_n - x_p$  для  $p$ – $n$ -переходу зі ступінчастим розподілом концентрації домішкових атомів може бути обчислена із співвідношення:

$$x_n - x_p = \left[ \frac{2 \varepsilon \varepsilon_0}{q} \frac{N_a - N_d}{N_a N_d} (U_{зв} + \varphi_k) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Тоді питома бар’єрна ємність переходу запишеться у вигляді:

$$C_0 = \left[ \frac{\varepsilon \varepsilon_0 q}{2 (U_{зв} + \varphi_k) (N_a - N_d)} \frac{N_a N_d}{N_a N_d} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10.3)$$

Якщо перехід несиметричний і концентрація по одну сторону переходу набагато більша, ніж по іншу, наприклад,  $N_a \gg N_d$ , то

$$C_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_q}{2(U_{зб} + \varphi_k)}}. \quad (10.4)$$

У загальному вигляді при будь-якому розподілі концентрації домішок можна записати:

$$C_0 \sim K(1/U)^m. \quad (2.5)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від закону розподілу концентрації домішкових атомів в околі  $p$ – $n$ -переходу,  $m$  – коефіцієнт, значення якого розташовані в інтервалі:  $1/3 \leq m \leq 1/2$ . Типові значення питомої бар'єрної ємності для різних  $p$ – $n$ -переходів транзисторної структури наведені в табл. 10.3.

Таблиця 10.3

Значення питомої бар'єрної ємності для різних  $p$ – $n$ -переходів транзисторної структури

$U_{зб},$ В	$C_0 = C_{еб},$ пФ/мм <sup>2</sup>	$C_0 = C_{бк},$ пФ/мм <sup>2</sup>	$C_0 = C_{кп},$ (без $n^+$ шару) пФ/мм <sup>2</sup>	$C_0 = C_{кп},$ (з $n^+$ шаром) пФ/мм <sup>2</sup>
0	1400	300	190	260
5	1000	120	60	90
15	–	90	40	55

На рис. 10.6 представлені конструктивні рішення інтегральних конденсаторів, виконаних на основі біполярної структури. Найбільшу питому бар'єрну ємність  $C_0$  має перехід "емітер-база" (рис. 10.6, а). Низька пробивна напруга цього переходу обмежує можливість його широкого використання.

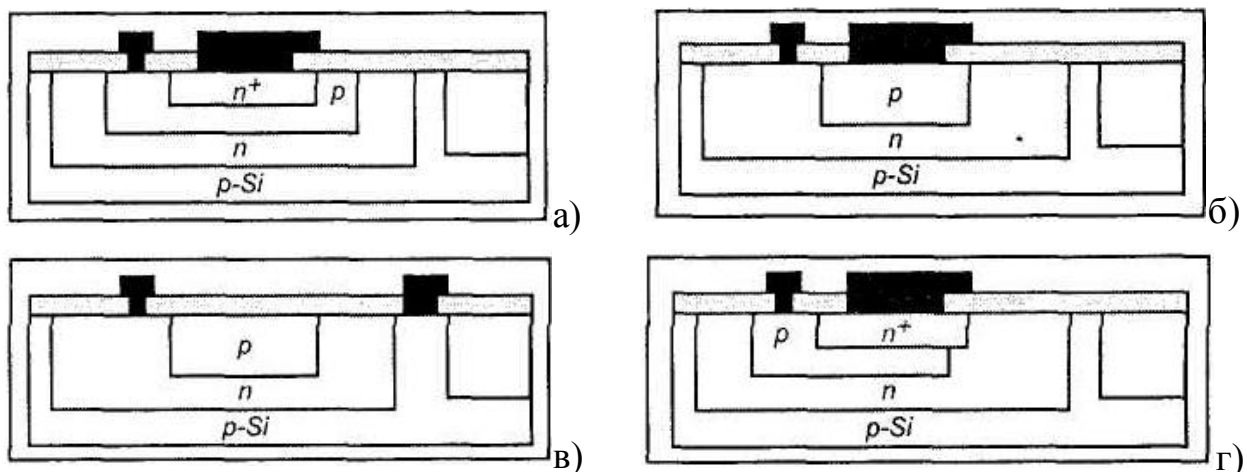


Рис. 10.6. Структури інтегральних біполярних конденсаторів:

а) на основі емітерного переходу; б) на основі базового переходу; в) на основі переходу "колектор-підкладка"; г) на основі паралельно увімкнених ємностей емітерного і колекторного переходів.

Конденсатор, сформований на базі переходу “база-колектор” (рис. 10.6, б) має більш високу пробивну напругу ( $\sim 50$  В). Як правило використовують перехід “база-колектор” при його низькому зворотному зміщенні, але одночасно високому зворотному зміщенні переходу “колектор-підкладка”. У цьому випадку співвідношення  $C_{\text{бк}} / C_{\text{кп}}$  має більше значення.

Конденсатори, сформовані на основі переходу “колектор-підкладка” (рис. 10.6, в), мають обмежене використання, тому що підкладка, як правило, заземлена за змінною складовою струму. Проте, конденсатор цього типу є невід’ємною частиною ІС з ізоляцією за  $p$ - $n$ -переходом. І

Іноді в ІС використовують комбінований конденсатор. На рис. 10.6, г наведена структура конденсатора на основі паралельно увімкнених ємностей емітерного і колекторного переходів.

Оптимальною конфігурацією конденсатора є квадрат. Загальна ємність складається з бічної і даної складових  $p$ - $n$ -переходу. Звичайно бічна складова в десятки разів менше даної і нею нехтують.

При проектуванні ІС задаються умовою, щоб загальна площа всіх конденсаторів ІС не перевищувала 25% площі кристала.

Важливим параметром інтегрального конденсатора є добротність  $Q$ , яка визначається співвідношенням:

$$Q = \frac{1}{2\pi f C R}, \quad (10.6)$$

де  $f$  – робоча частота,  $C$  – ємність конденсатора,  $R$  – опір резистора, послідовно включеного з конденсатором. Звичайно в якості резистора мають на увазі опір дифузної області, безпосередньо прилеглої до області об’ємного заряду переходу.

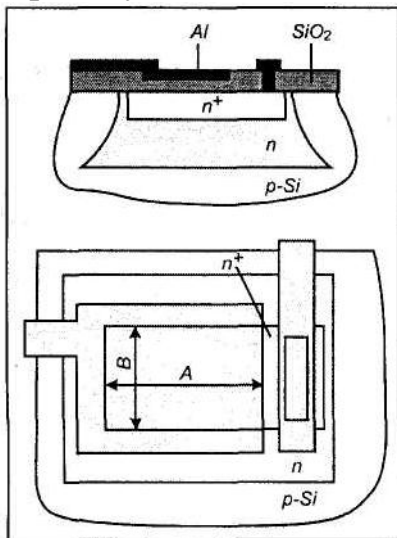


Рис. 10.7. Структура інтегрального МДН-конденсатора та його топологія:  $A$  – довжина обкладки,  $B$  – її ширина.

Добротність характеризує втрату потужності при протіканні ємнісного струму. Добротність зростає із зменшенням частоти та із зменшенням опору нижніх шарів транзисторної структури. Типове значення добротності на частоті 500 Гц складає 50-100.

Інтегральні конденсатори, сформовані на основі біполярної транзисторної структури, мають ряд недоліків. Перш за все, на основі таких структур неможливо створити конденсатор великої ємності. Для цього необхідно використовувати велику площу підкладки. Конденсатори такої конструкції мають малу добротність, і їх ємність істотно залежить від прикладеної напруги.

Недоліки дифузійних конденсаторів можуть бути в схемі усунені, якщо скористатися конструкцією МДН-конденсатора (рис. 10.7). Над емітерним  $n^+$ -шаром, який є нижньою обкладкою

конденсатора, вирощується тонкий шар кремнію  $\text{SiO}_2$ , а потім наноситься верхня металева обкладка.

Важливою перевагою МОН-конденсаторів є можливість їх роботи при будь-якій полярності напруги на обкладках. Іншою важливою особливістю є незалежність номінального значення ємності від прикладеної напруги.

І нарешті, добротність МДН-конденсаторів значно перевершує добротність інтегральних конденсаторів, виконаних в біполярних транзисторних структурах.

У табл. 10.4 наведені типові параметри інтегральних конденсаторів: технологічний розкид  $\delta$ , температурний коефіцієнт ємності  $TKE$ , пробивна напруга  $U_{np}$  і добротність  $Q$ .

Індуктивні елементи в основному плівкові і застосовуються в гібридних інтегральних НВЧ-схемах.

Таблиця 10.4

Типові параметри інтегральних конденсаторів

Тип конденсатора	$C_0$ , пФ/мм <sup>2</sup>	$C_{\max}$ , пФ	$\delta$ , %	$TKE$ , %/градус	$U_{np}$ , В	$Q$ (1 МГц)
Перехід БК	150	300	$\pm 20$	-0,1	50	50 – 100
Перехід БЕ	1000	1200	$\pm 20$	-0,1	7	1 – 20
МОН-структура	300	500	$\pm 25$	0,02	20	200