

1. Будова і принцип дії польових транзисторів з керуючим p - n -переходом

Польовим транзистором називається напівпровідниковий пристрій, в якому струм створюється тільки основними носіями зарядів під дією поздовжнього електричного поля, а керування цим струмом здійснюється поперечним електричним полем, яке створюється напругою, прикладеною до керуючого електрода. Структура польових транзисторів подана на рис. 9.1.

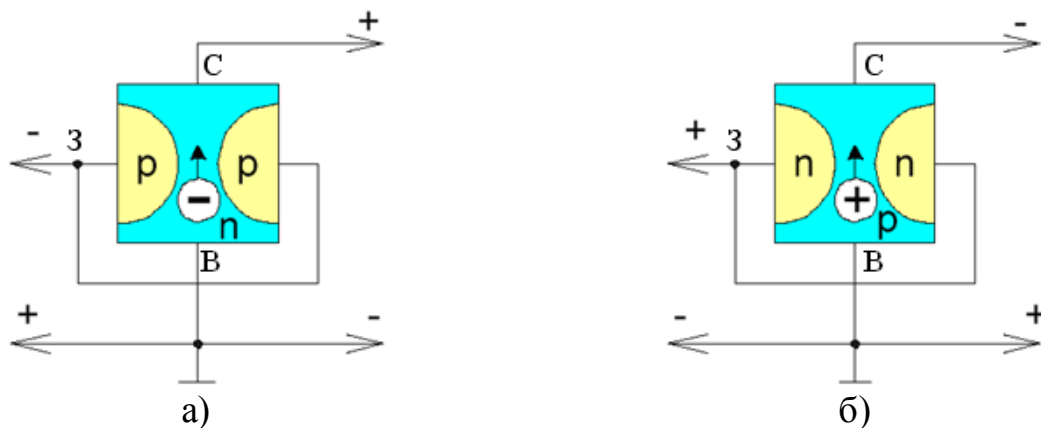


Рис. 9.1. Структура польових транзисторів з каналом n - (а) і p -типу провідності.

Означення:

- вивід польового транзистора, від якого витікають основні носії заряду, називається **витоком**.
- вивід польового транзистора, до якого стікають основні носії заряду, називається **стоком**.
- вивід польового транзистора, до якого прикладається керуюча напруга, яка створює поперечне електричне поле, називається **затвором**.
- ділянка напівпровідника, по якій рухаються основні носії зарядів, між p - n -переходом, називається **каналом** полевого транзистора.

На затвор завжди подається така напруга, щоб переходи закривалися. Напруга між стоком і витоком створює поздовжнє електричне поле, за рахунок якого через канал рухаються основні носії зарядів, створюючи струм стоку.

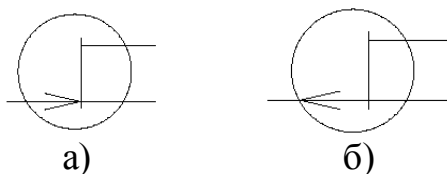


Рис. 9.2. Умовне графічне позначення польових транзисторів з каналом: а) n -типу; б) p -типу.

Тому польові транзистори поділяються на транзистори з каналом p -типу або n -типу. Умовне графічне зображення польового транзистора з каналом n -типу подано на рис. 9.2, а, а з каналом p -типу – на рис. 9.2, б.

Розглянемо принцип дії на прикладі транзистора з каналом n -типу (рис. 9.3).

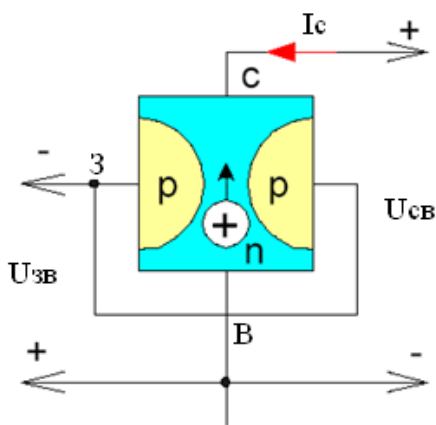


Рис. 9.3. До принципу дії польового транзистора з каналом n -типу.

Розглянемо наступні умови:

$$1) U_{зв} = 0, I_{C1} = \max.$$

$$2) |U_{зв}| > 0, I_{C2} < I_{C1}.$$

$$3) |U_{зв}| \gg 0, I_{C3} = 0.$$

1) при відсутності напруги на затворі p - n -переходи закриті власним внутрішнім полем, ширина їх мінімальна, а ширина каналу максимальна і струм стоку буде максимальним.

2) при збільшенні запірної напруги на затворі ширина p - n -переходів збільшується, а ширина каналу і струм стоку зменшуються.

3) при достатньо великих наругах на затворі ширина p - n -переходів може збільшуватися настільки, що вони зіллються, струм стоку стане рівним нулю.

Напруга на затворі, при якій струм стоку рівний нулю, називається **напругою відсічки**.

Таким чином, польовий транзистор представляє собою керуючий напівпровідниковий пристрій, так як, змінюючи напругу на затворі, можна зменшити струм стоку. Тому прийнято говорити, що польові транзистори з керуючим p - n -переходами працюють тільки в режимі збіднення каналу.

2. Характеристики і параметри польових транзисторів

До **основних характеристик** польових транзисторів належать:

1. Стік-затворна характеристика – це залежність струму стоку I_c від напруги на затворі $U_{зв}$ при фіксованій напрузі U_{cb} : $I_c = f U_{зв}$ при $U_{cb} = const$. Вигляд стік-затворної характеристики польового транзистора подано на рис. 9.4.

2. Стокова характеристика – це залежність струму стоку I_c від напруги U_{cb} при постійній напрузі на затворі (рис. 9.5): $I_c = f U_{cb}$ при $U_{зв} = const$.

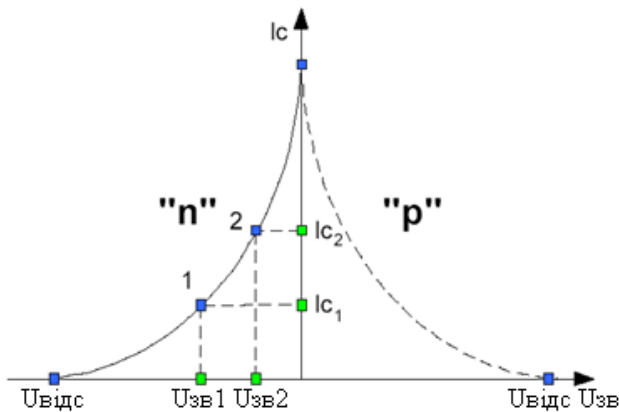


Рис. 9.4. Стік-затворна характеристика.

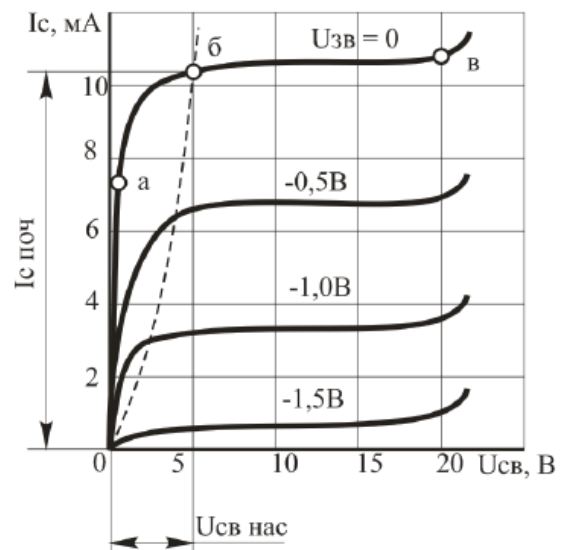


Рис. 9.5. Стокові характеристики.

Особливістю польового транзистора є те, що на провідність каналу виявляє вплив як керуюча напруга $U_{зв}$, так і напруга U_{cb} . При $U_{cb} = 0$ вихідний струм $I_c = 0$. При $U_{cb} > 0$ ($U_{зв} = 0$) через канал протікає струм стоку I_c , внаслідок чого створюється спад напруги, що зростає у напрямі стоку. Сумарний спад напруги ділянки витік-стік дорівнює U_{cb} . Підвищення напруги U_{cb} викликає збільшення спаду напруги в каналі і зменшення його перерізу, а отже, зменшення провідності каналу. При деякій напрузі U_{cb} відбувається звуження каналу, при якому межі обох p - n -переходів змикаються і опір каналу

стає високим. Таку напруг U_{CB} називають напругою перекриття або напругою насичення $U_{CB\text{ нас}}$. При подачі на затвор зворотної напруги U_{3B} відбувається додаткове звуження каналу, і його перекриття настає при меншому значенні напруги $U_{CB\text{ нас}}$. У робочому режимі використовуються пологі (лінійні) ділянки вихідних характеристик.

Основні параметри польового транзистора.

1. Максимальний струм стоку $I_{C\text{ max}}$ при $U_{3B} = 0$.
2. Максимальна напруга стік-витік $U_{CB\text{ max}}$.
3. Напруга відсічки $U_{ВДС}$.
4. Крутизна стік-затворної характеристики, яка показує, на скільки міліампер зміниться струм стоку при зміні напруги на затворі на 1 В:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \text{ при } U_{CB} = \text{const}, S = \frac{I_{C2} - I_{C1}}{|U_{3B2} - U_{3B1}|} \text{ (рис. 9.4).}$$

5. Внутрішній (вихідний) опір представляє собою опір польового транзистора між стоком і витіком (опір каналу) для змінного струму:

$$R_i = \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} = \frac{U_{CB2} - U_{CB1}}{I_{C2} - I_{C1}} \text{ при } U_{3B} = \text{const} \text{ (рис. 9.6).}$$

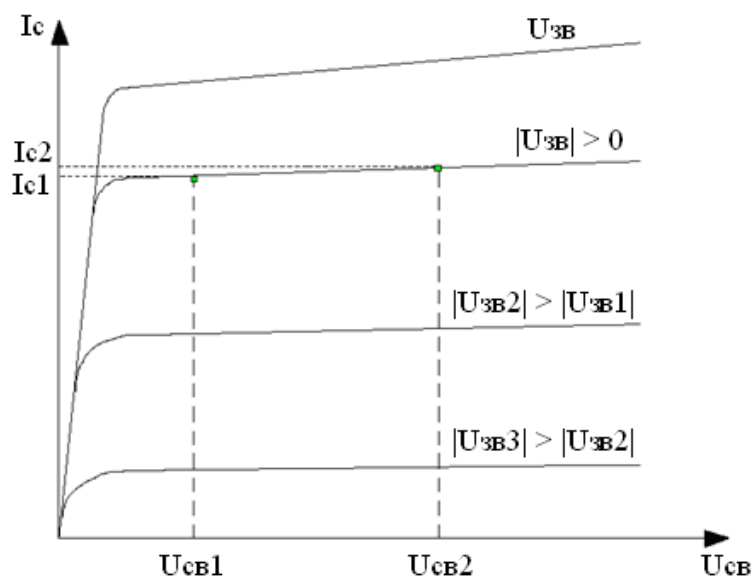


Рис. 9.6. До визначення внутрішнього опору.

6. Вхідний опір транзистора визначається опором p – n -переходів, увімкнених у зворотному напрямі:

$$R_{BX} = \frac{\Delta U_{3B}}{\Delta I_3} \leq 10^9 \text{ Ом}.$$

Оскільки на затвор подається тільки запірна напруга, то струм затвору буде представляти собою оборотний струм закритого p – n -переходу і буде дуже малий. Величина вхідного опору R_{BX} буде дуже великою і досягати 10^9 Ом.

3. Полеві транзистори з ізолюваним затвором

Полевий транзистор з ізолюваним затвором (МДН-транзистор) – це полевий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу шаром діелектрика.

МДН-транзистори (структура метал-діелектрик-напівпровідник) виготовляють з кремнію. Як діелектрик використовують діоксин кремнію SiO_2 . Звідси інша назва цих транзисторів – МОН-транзистори (структура метал-оксид-напівпровідник). Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір даних транзисторів ($10^{12} \div 10^{14}$ Ом).

Принцип дії МОН-транзисторів базується на ефекті зміни провідності приповерхневого шару напівпровідника на межі з діелектриком під впливом поперечного електричного поля. Приповерхневий шар напівпровідника є струмопровідним каналом цих транзисторів.

МОН-транзистори можуть бути двох видів:

- а) транзистори із вбудованим каналом;
- б) транзистори з індукованим каналом.

Транзистор із вбудованим каналом.

Основою такого транзистора є кристал кремнію p - або n -типу провідності (рис. 9.7).

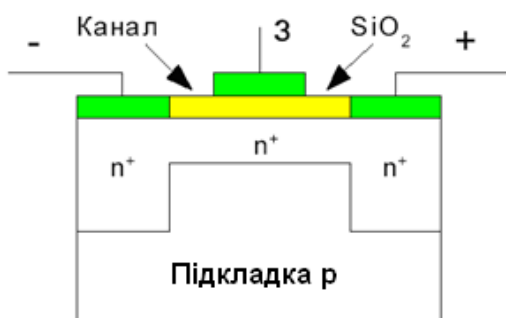


Рис. 9.7. МОН-транзистор із вбудованим каналом.

Для транзисторів з n -типом провідності мають місце наступні умови:

- 1) $U_{3B} = 0, I_{C1}$.
- 2) $U_{3B} > 0, I_{C2} > I_{C1}$.
- 3) $U_{3B} < 0, I_{C3} < I_{C1}$.
- 4) $U_{3B} \ll 0, I_{C4} = 0$.

При відсутності наруги на затворі ($U_{3B} = 0$) під дією електричного поля між стоком і виток через канал будуть протікати основні носії заряду, тобто

буде існувати струм стоку I_{C1} . При подачі на затвор додатної напруги ($U_{зв} > 0$) електрони як неосновні носії підкладки будуть притягуватися в канал, в результаті чого канал збагатиться носіями заряду і струм стоку збільшиться ($I_{C2} > I_{C1}$). При подачі на затвор від'ємної напруги ($U_{зв} < 0$) електрони з каналу будуть тікати в підкладку, канал збідниться носіями заряду, і струм стоку зменшиться ($I_{C3} < I_{C1}$). При достатньо великих напругах на затворі ($U_{зв} \ll 0$) всі носії заряду можуть виходити з каналу в підкладку, і струм стоку стане рівним нулю ($I_{C4} = 0$).

Таким чином, МОН-транзистор із вбудованим каналом може працювати як в режимі збагачення, так і в режимі збіднення зарядів.

Стік-затворна характеристика такого транзистора подана на рис. 9.8, а стокові – на рис. 9.9.

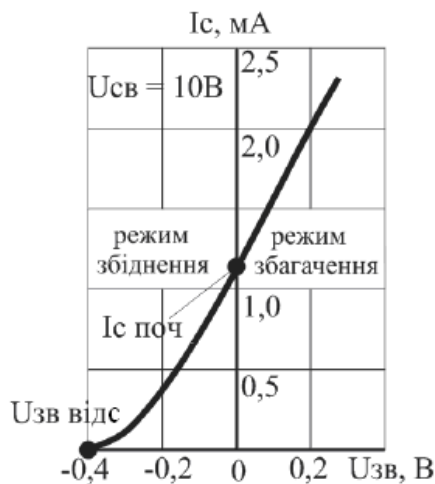


Рис. 9.8. Стік-затворна характеристика.

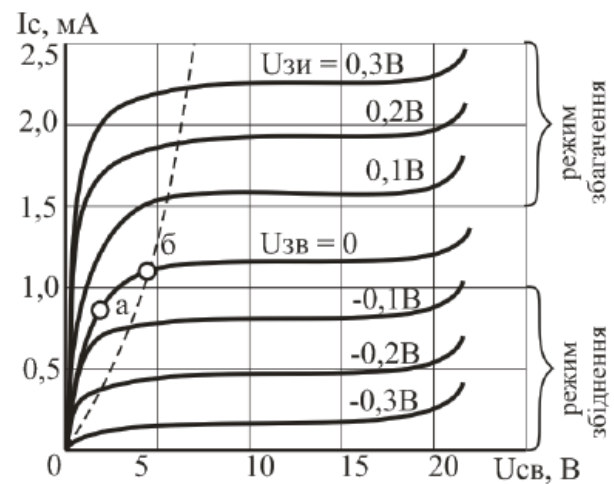


Рис. 9.9. Стокові характеристики.

Транзистори з індукованим каналом.

Структура такого транзистора подана на рис. 9.10.

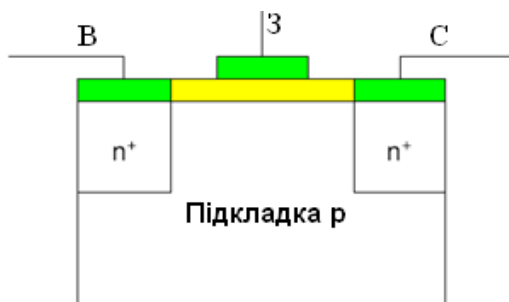


Рис. 9.10. МОН-транзистор з індукованим каналом.

У даному випадку мають місце наступні умови:

- 1) $U_{зв} = 0$, $I_{C1} = 0$.
- 2) $U_{зв} < 0$, $I_{C2} = 0$.
- 3) $0 < U_{зв} < U_{зв\text{ ПОР}}$, $I_{C3} \approx 0$.
- 4) $U_{зв} > U_{зв\text{ ПОР}}$, $I_{C4} > 0$.

При напругах на затворі, рівних чи менших нуля, канал відсутній, і струм стоку буде рівний нулю (умови 1 і 2). Коли напруга затвору перевищить деяке відмикаючі (порогове) значення $U_{зв\text{пор}}$, електрони, як неосновні носії заряду підкладки p -типу, будуть притягуватися до затвору, а дірки будуть тікати вглиб підкладки. У результаті в тонкому шарі під затвором концентрація електронів перевищить концентрацію дірок, тобто в цьому шарі напівпровідник змінить тип провідності. Утвориться (індукується) канал, і в колі стоку потече струм. Чим більша додатна напруга затвору, тим більша провідність каналу і струм стоку.

Таким чином, МОН-транзистор з індукованим каналом може працювати тільки в режимі збагачення.

Стік-затворна характеристика такого транзистора подана на рис. 9.11, а стокові – на рис. 9.12.

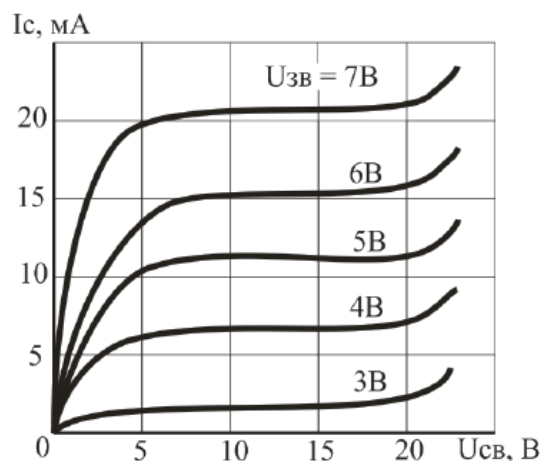
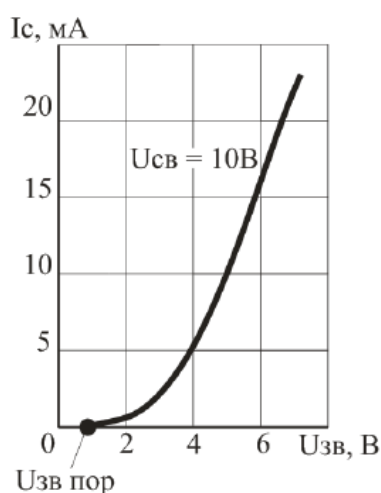


Рис. 9.11. Стік-затворна характеристика. Рис. 9.12. Стокові характеристики.

Параметри МОН-транзисторів аналогічні параметрам польових транзисторів з керованим p – n -переходом.

Умовні позначення МОН-транзисторів наведені на рис. 9.13.

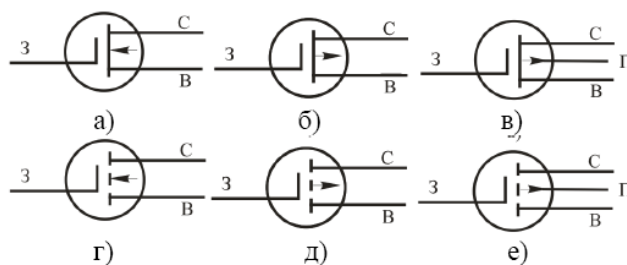


Рис. 9.13. Умовні позначення МОН-транзисторів: а) з вбудованим каналом n -типу; б) з вбудованим каналом p -типу; в) з вбудованим каналом p -типу і виводом від підкладки; г) з індукованим каналом n -типу; д) з індукованим каналом p -типу; е) з індукованим каналом p -типу і виводом від підкладки.

До найважливіших переваг польових транзисторів варто віднести:

1. Високий вхідний опір, що досягає в канальних транзисторах з $p-n$ -переходами величини $10^6 \div 10^9$ Ом, а в транзисторах з ізольованим затвором – $10^{12} \div 10^{14}$ Ом. Таке високе значення вхідного опору пояснюється тим, що в транзисторах з $p-n$ -переходами електронно-дірковий перехід між затвором і витоком увімкнений у зворотному напрямку, а в транзисторах з ізольованим затвором вхідний опір визначається дуже великим опором витоку діелектричного шару.

2. Малий рівень власних шумів, тому що у польових транзисторах, на відміну від біполярних, у переносі струму беруть участь заряди тільки одного знаку, що виключає появу рекомбінаційного шуму.

3. Висока стійкість проти температурних і радіоактивних впливів.

4. Висока густина розташування елементів при використанні приладів в інтегральних схемах.

Із розробкою технології інтегральних схем польові транзистори майже витіснили біполярні транзистори з більшості галузей електроніки. Понад 100 млн транзисторів у процесорі комп'ютера є польовими транзисторами. Вони використовуються також у мікросхемах, які входять до складу більшості радіоелектронних приладів: мобільних телефонів, телевізорів, пральних машин, холодильників тощо. Стрімко розвиваються галузі застосування потужних польових транзисторів. У силовій електроніці потужні польові транзистори успішно замінюють і витісняють потужні біполярні транзистори. В підсилювачах потужності звукових частот класу Hi-Fi і Hi-End потужні польові транзистори успішно замінюють потужні електронні лампи, оскільки мають малі нелінійні і динамічні спотворення.