

2.2. Уніполярні (польові) транзистори

2.2.1. Загальні відомості

До класу уніполярних належать транзистори, принцип дії яких ґрунтується на використанні носіїв заряду лише одного знаку (електронів або дірок). Керування струмом в силовому колі уніполярних транзисторів здійснюється зміною під впливом електричного поля провідності каналу, через який протікає струм. Тому уніполярні транзистори ще називаються польовими (ПТ).

Розрізняють ПТ з керуючим *p-n* переходом (із затвором у вигляді *p-n* переходу) та з ізольованим затвором. Останні, в свою чергу, поділяються на ПТ із вбудованим каналом та з індукованим каналом. ПТ з ізольованим затвором належать до різновиду МДН-транзисторів: конструкція «метал – діелектрик – НП». Якщо як діелектрик використовують оксид кремнію: конструкція «метал – оксид – НП», ПТ називають відповідно МОН-транзистором.

Характерною рисою ПТ є великий вхідний опір ($10^8 \div 10^{14}$ Ом).

Широкого розповсюдження ПТ набули завдяки високій технологічності у виробництві, стабільності характеристик і невеликій вартості за масового виробництва.

2.2.2. Польові транзистори з керуючим *p-n* переходом

Конструкція та принцип дії ПТ з керуючим *p-n* переходом пояснюється на моделі, наведеній на рис. 2.15.

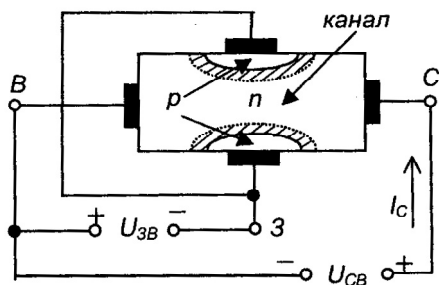


Рис. 2.15 - ПТ з керуючим p - n переходом

У такого ПТ канал протікання струму являє собою шар НП, наприклад, n -типу, розміщений між двома p - n переходами. Канал має контакти із зовнішніми електродами. Електрод, від якого починають рух носії заряду (у даному разі – електрони), називається витоком B , а електрод, до якого вони рухаються – стоком C .

НП шари p -типу, що створюють із n -шаром два p - n переходи, виконані з більш високою концентрацією основних носіїв, ніж n -шар. Обидва p -шари електрично з'єднані і мають зовнішній електрод, що називається затвором $З$.

Вихідна напруга підключається між стоком і витоком (U_{CB}), а вхідна напруга (керуюча) – між витоком та затвором ($U_{ЗВ}$), причому на затвор подається зворотна відносно витоку напруга.

Принцип дії такого ПТ полягає у тому, що зі змінами вхідної напруги $U_{ЗВ}$ змінюється ширина p - n переходів, що являють собою ділянки НП, збіднені носіями зарядів (запірний шар). Оскільки p -шар має більшу концентрацію домішки, зміна ширини p - n переходів відбувається, головним чином, за рахунок більш високоомного n -шару. При цьому змінюється переріз струмопровідного каналу, а отже і його провідність і відповідно вихідний струм I_C приладу.

Особливість польового транзистора полягає у тому, що на провідність каналу впливає як керуюча напруга $U_{зв}$, так і напруга $U_{св}$. Вплив напруг на провідність каналу ілюструє рис. 2.26, на якому заради спрощення не показані ділянки n -шару, розміщені поза p - n переходами.

На рис. 2.16, а зовнішню напругу прикладено лише у вхідному колі транзистора. Збільшення зворотної напруги на p - n переході призводить до зменшення провідності каналу за рахунок зменшення його перерізу (вздовж усього каналу). Та оскільки $U_{св} = 0$, вихідний струм $I_C = 0$.

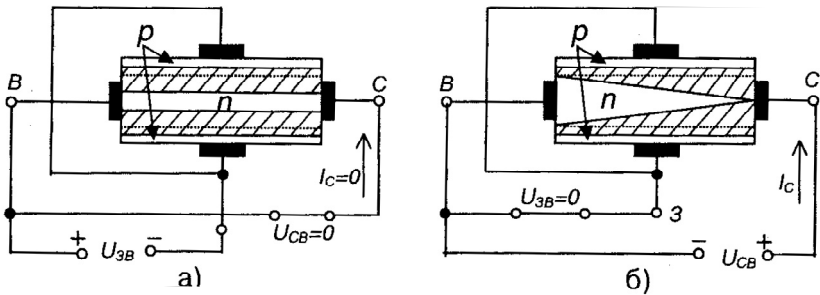


Рис. 2.16 - Вплив напруг на провідність каналу ПТ з керуючим p - n переходом: а) за $U_{св}=0$; б) за $U_{зв}=0$

Рис. 2.16, б ілюструє зміну перерізу каналу під впливом лише напруги $U_{св}$ ($U_{зв} = 0$). Коли $U_{св} > 0$, через канал протікає струм, внаслідок якого виникає розподілений по каналу спад напруги, що зростає у напрямку стоку. Сумарний спад напруги ділянки стік-витік дорівнює $U_{св}$. Відповідно, потенціали точок каналу вздовж нього неоднакові: зростають у напрямку стоку від нуля до $U_{св}$.

Потенціал точок p -шару відносно витоку визначається потенціалом затвора відносно витоку і у даному випадку дорівнює нулю. У зв'язку із зазначеним, зворотна напруга, що прикладена до p - n

переходів, зростає у напрямку витік-стік і $p-n$ переходи розширюються у напрямку стоку. Це явище призводить до клиновидного зменшення перерізу каналу. Підвищення напруги U_{CB} викликає збільшення спаду напруги у каналі та подальше зменшення його перерізу, а отже, і провідності каналу. За певного значення U_{CB} межі обох $p-n$ переходів змикаються (див. рис. 2.16, б) і опір каналу стає великим.

Очевидно, що за сумарної дії U_{CB} та $U_{зв}$ змикання $p-n$ переходів відбувається швидше. При цьому у приладі діє автоматична система керування, що забезпечує протікання фіксованого значення I_C за подальшого після змикання росту U_{CB} – струм через канал не залежить від U_{CB} .

Аналогічно працюють транзистори з каналом p -типу, лише полярність напруг повинна бути зворотною.

На рис. 2.17 наведені умовні позначення ПТ з керуючим $p-n$ переходом.



Рис. 2.17 -Умовні позначення ПТ з керуючим $p-n$ переходом:

а) з каналом n -типу, б) з каналом p -типу

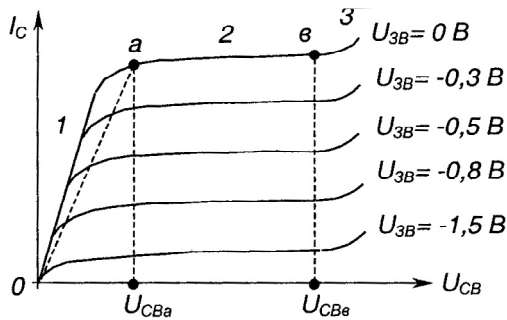


Рис. 2.18 - Стокові ВАХ ПТ з керуваним $p-n$ переходом

На ділянці 1 ($0a$) маємо значну залежність I_C від вихідної напруги U_{CB} . Це неробоча ділянка для випадку використання приладу як підсилюючого елемента. Тут його використовують як керований резистор.

На ділянці 2 (ae) залежність вихідного струму від вихідної напруги мала. Це робоча ділянка у режимі підсилення.

Ділянка 3 відповідає пробою приладу.

Точці a відповідає змиканню $p-n$ переходів (напруга U_{CBa}). Причому, чим вища напруга $U_{ЗВ}$ (абсолютна величина), тим швидше змикаються $p-n$ переходи.

Напруга на затворі, за якою струм вихідного кола $I_C = 0$, називається напругою запирання або напругою відтинання $U_{ЗВ0}$. Числове значення $U_{ЗВ0}$ дорівнює U_{CB} у точці a ВАХ транзистора.

Стік-затворні (передаточні) ВАХ відображають залежність струму стоку від напруги затвор-витік за фіксованої напруги стік-витік: $I_C = f(U_{ЗВ})$, за $U_{CB} = const$.

Передатна ВАХ зображена на рис. 2.19.

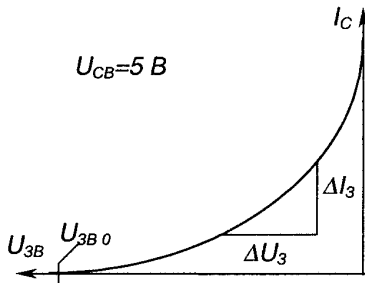


Рис. 2.19 - Передаточна ВАХ ПТ з керуючим *p-n* переходом

Параметри ПТ з керуючим *p-n* переходом:

- максимальне значення струму стоку I_{Cmax} (відповідає його значенню у точці *e* на вихідних ВАХ за $U_{3B} = 0$), сягає від десятків міліампер до одного ампера;

- напруга відтинання U_{3B0} ;

- максимальне значення напруги стік-витік $U_{CB max}$ (задають у 1,2÷1,5 рази меншим за напругу пробою ділянки стік-витік за $U_{3B} = 0$), становить до 100 В;

- крутизна стік-затворної характеристики $S = \frac{dI_C}{dU_{3B}}$, за

$$U_{CB} = const;$$

- вхідний опір $r_{ex} = \frac{dU_{3B}}{dI_3}$, становить десятки мегаом.

2.2.3. Польові транзистори з ізолюваним затвором (МДН-транзистори)

На відміну від ПТ з керуючим *p-n* переходом, у яких затвор має безпосередній електричний контакт із суміжною зоною струмопровідного каналу, у МДН-транзисторів затвор, що являє собою, наприклад, алюмінієву плівку (*Al*), ізолюваний від зазначеної зони шаром діелектрика. Тому МДН-транзистори належать до класу ПТ з ізолюваним затвором. Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір цих транзисторів ($10^{12} \div 10^{14}$ Ом). Частіше як діелектрик

використовують оксид кремнію (SiO_2), і тоді ПТ називають МОН-транзистором (метал-оксид-НП). Такі транзистори бувають із вбудованим та індукованим каналами. Останні більш розповсюджені.

Конструкцію МОН-транзистора з індукованим каналом n -типу зображено на рис. 2.20.

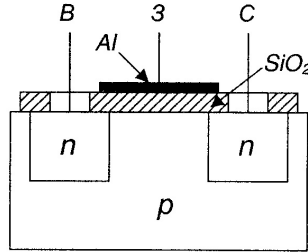


Рис. 2.20. Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом

За $U_{зв} = 0$ або від'ємному, $I_C = 0$ (два p - n переходи увімкнені зустрічно). За позитивної напруги на затворі відносно витoku поверхневий шар на межі НП із діелектриком збагачується електронами, що притягуються з глибини p -шару (де вони є завдяки теплової генерації вільних носіїв заряду) до затвору: виникає явище інверсії НП у примежовій зоні, коли p -шар стає n -шаром. Таким чином, між зонами n -шарів наводиться (індукується) канал, по якому може протікати струм від стоку до витoku.

За наявності струму стоку, як і у транзистора з керуючим p - n переходом, за рахунок розподілення по довжині каналу падіння напруги від нуля до U_{CB} , канал (p - n перехід між з'єднаними каналом зонами n та зоною p) звужується у напрямку стоку. За деякого значення напруги U_{CB} канал перекривається так, що подальше збільшення струму стоку не відбувається. Тому вихідні ВАХ ПТ з ізольованим

затвором подібні до ВАХ ПТ з керуючим p - n переходом, тільки характеристики проходять вище зі збільшенням напруги $U_{зв}$.

Умовні позначення МДН-транзисторів наведені на рис. 2.21.

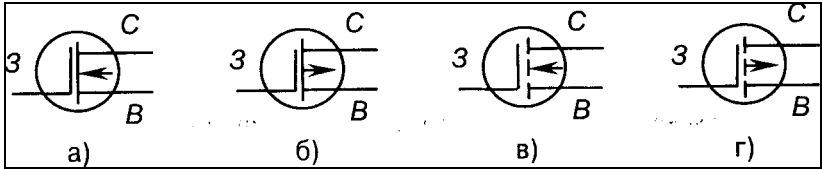


Рис. 2.21 - Умовні позначення МДН-транзисторів з каналами:
вбудованим n -типу (а); вбудованим p -типу (б);
індукованим n -типу (в); індукованим p -типу (г)

У ПТ з вбудованим каналом зони p -типу з'єднано перетинкою - тонким шаром n -типу. В результаті канал під дією напруги $U_{зв}$ може як розширюватись, так і звужуватись (до повного змикання) залежно від знаку $U_{зв}$. ПТ широко використовують як дискретні компоненти електронних пристроїв, а також у складі інтегральних мікросхем.