

6. ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ.

6.1. Польовий транзистор з керуючим $p-n$ переходом. Принцип дії.

Принцип дії такого транзистора легко зрозуміти з його схематичної моделі, зображеної на рис.6.1. Основною її частиною є прямокутний зразок слабколегованого напівпровідника (у даному випадку n -типу), до торців якого прикладена напруга U_{CB} . В результаті руху

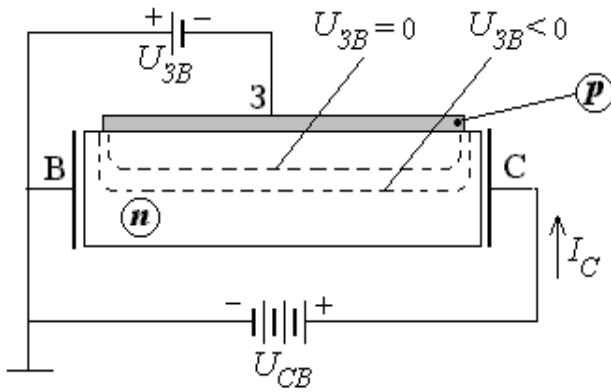


Рис. 6.1.

електронів від електрода В, який має назву *витоку*, до електрода С, який називається *стоком*, виникає наскрізний струм $I_C = \frac{U_{CB}}{R}$, величина якого визначається омичним опором R напівпровідникового зразка. На верхню грань зразка накладено шар напівпровідника з дірковою провідністю. Цей шар називається *затвором* і разом з n -областю він створює $p-n$ перехід. На цьому переході утворюється збіднений шар, він дещо звужує переріз n -області, по якій тече струм I_C і збільшує її омичний опір. Якщо до затвору прикласти напругу $U_{зВ} < 0$ запірної полярності, то можна збільшити товщину збідненого шару, зменшуючи тим самим переріз струмопровідної області і збільшуючи її опір. При досить великому значенні затворної напруги границя збідненого шару може досягти нижньої грані зразку і повністю перекрити шлях струму I_C . Та напруга, затвора, при якій струм I_C припиняється, зветься запираючою напругою і позначається як $U_{з0}$. Таким чином, з'являється можливість керування наскрізним струмом через зразок шляхом зміни затворної напруги. Це керування здійснюється електричним полем, яке існує у збідненому шарі. Тому такі транзистори мають назву *польових*. Принцип дії польових транзисторів заснований на русі носіїв одного знаку у напівпровіднику з одним типом провідності. Тому інша назва таких транзисторів - *уніполярні*. Третя їх назва - *каналні* відображає той факт, що рух носіїв тут відбувається по провідній області, яка має назву каналу, переріз і провідність котрого регулюються затворною напругою.

Основна принципова відмінність біполярного транзистора, від польового полягає в тому, що перший, з них керується вхідним струмом, а другий - вхідною напругою. Можна, звичайно, заперечити, що і в біполярному транзисторі вхідний струм створюється вхідною напругою. Однак, врешті-решт, струм колектора визначається саме струмом бази або емітера, і, отже, існування вхідного струму у біполярного транзистора є принципово необхідним. З цього висновується по-перше, що вхідний опір біполярного транзистора не може бути дуже великим (а він і дійсно невеликий), та по-друге, що для керування колекторним струмом потрібна хоч і невелика, а все ж таки, скінчена потужність вхідного сигналу.

На відміну від цього, вхід польового транзистора є не відкритим, а закритим $p-n$ переходом, зворотний струм якого, неістотний для роботи транзистора, може бути зробленим як завгодно малим.

Так, наприклад, для кремнієвих польових транзисторів вхідний струм може становити $10^{-8} - 10^{-9}$ А, так що на керування вхідним струмом потужність практично не витрачається. Підключений до джерела вхідного сигналу польовий транзистор практично не

навантажує це джерело і не впливає на його роботу. В цьому і полягає основна перевага польових транзисторів над біполярними.

6.2. Характеристики та параметри.

Описаний вище принцип дії польового транзистора відповідає дійсності лише при невеликих напругах U_{CB} , які за величиною не перевищують затворні напруги. За таких режимів вихідні характеристики, які відрізняються величиною U_{3B} , утворюють "віяло" прямих ліній, що йдуть з початку координат (рис. б. 2). Кожна така лінія відповідає своєму значенню омичного опору каналу транзистора.

Однак, при $|U_{CB}| > |U_{3B}|$ вже треба враховувати, що різні точки на вісі каналу будуть

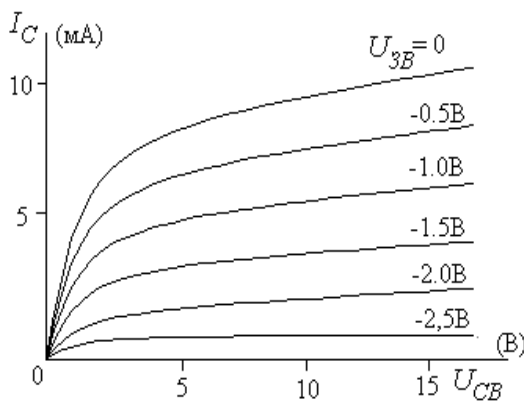


Рис.6.2.

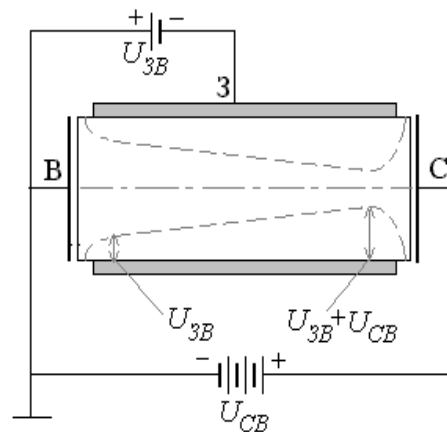


Рис.6.3.

не еквіпотенціальними. В міру наближення до стоку потенціали точок каналу стають все вищими, внаслідок чого різниця потенціалів між віссю каналу і затвором буде зростати. Відповідно має збільшуватись і товщина збідненого шару, причому з боку стоку вона буде більшою аніж поблизу витoku (рис.б.3). В результаті переріз каналу зменшуватиметься в міру наближення до стоку. Зазначений ефект стає тим виразнішим, чим більших значень набуває U_{CB} . Як же це відіб'ється на ході вольтамперної характеристики?

Здавалося б, що із збільшенням напруги U_{CB} повинен зростати і наскрізний струм I_C . Разом з тим, як ми тільки що з'ясували, із збільшенням U_{CB} струмопровідний канал звужується, його опір зростає і наслідком має стати зменшення струму. У підсумку струм I_C не зростає і не зменшується, а залишається майже незмінним. На вихідній характеристиці утворюється майже горизонтальна ділянка насичення, що має невеликий підйом у бік більших напруг. Диференціальний опір в області насичення досить великий і може становити $10^4 - 10^5$ Ом.

Прохідні характеристики $I_C = f(U_{3B})$ при $U_{CB} = const$ можуть бути побудовані однозначно, якщо задана сім'я вихідних характеристик. Така сім'я прохідних характеристик зображене на рис.6.4. Всі вони починаються від U_{30} - запірної напруги, яка не залежить від напруги на стоку. Дальший їх хід також мало залежить від напруги U_{CB} (якщо тільки U_{CB} більше напруги насичення). Вхідні характеристики будуються лише для від'ємних значень затворної напруги, оскільки при $U_{3B} > 0$ перехід відкривається, збіднений шар щезає і керуюча дія затворної напруги втрачається.

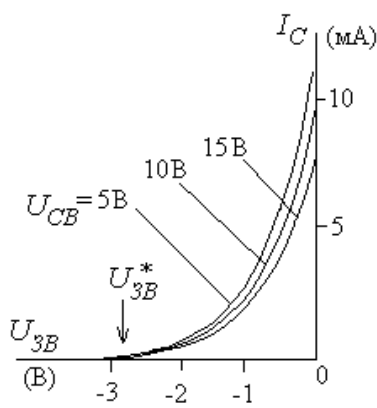


Рис.6.4.

каналом, затвор якого є n - напівпровідниковим. Полярність напруг U_{CB} та $U_{ЗВ}$ повинна бути при цьому

зміненна на зворотну. Умовне зображення польових транзисторів з керуючим p - n переходом подане на рис.6.5. Польові транзистори характеризуються такими параметрами:

- вихідним опором $R_i = \frac{\partial U_{CB}}{\partial I_C}$ значення якого для польових транзисторів малої потужності лежать в межах 10-100 кОм;

крутістю $S = \frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗВ}}$, яка звичайно становить 1 - 10 мА/В;

- вхідним опором, який досягає $10^8 - 10^9$ Ом;

- вхідною та вихідною ємністю порядку кількох пікофарад. Частотні властивості польових транзисторів визначаються часом перезарядки бар'єрної ємності затворного переходу. Дійсно, при зміні керуючої напруги $U_{ЗВ}$, струм, який заряджає цю ємність, повинен пройти від витoku до границі збідненого шару через матеріал каналу, омичний опір якого є порядку кількох кілоом. Для бар'єрної ємності порядку 10^{-12} Ф маємо сталу часу порядку $10^{-8} - 10^{-9}$ с, що відповідає граничній частоті роботи транзистора близько одного ГГц. Це дещо гірше за величину граничної частоти, притаманної кращим зразкам біполярних транзисторів.

Максимальна потужність розсіювання для польових транзисторів малої потужності становить кілька десятків мВт; а для потужних - до 10 Вт і більше..

6.3. Польові транзистори з ізольованим затвором.

Для керування провідністю каналу зовсім не обов'язково, щоб затвор мав безпосередній контакт з матеріалом каналу. Якщо поміж ними навіть існує прошарок діелектрика, електричне поле, створюване напругою затвора, проникає у приповерхневий шар напівпровідника і може впливати на величину і розподіл концентрації наявних в ньому носіїв заряду. На цьому ефекті заснована дія польового транзистора з ізольованим затвором, схематичне зображення будови якого подано на рис. 6.6.

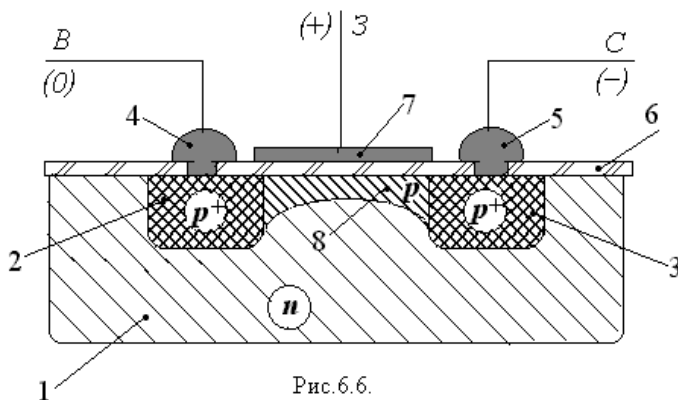


Рис.6.6.

Аналогічно працює і польовий транзистор з p -

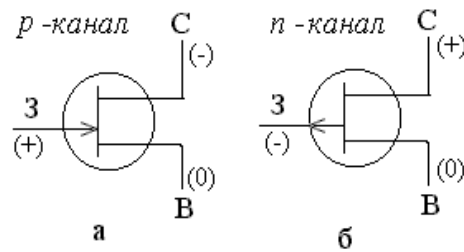


Рис.6.5.

Тут на поверхні монокристалу порівняно слабо легovanого електронного напівпровідника (I), який називають підкладкою, створюються дві невеликі області (2) та (3), де напівпровідник сильно легований акцепторним домішкою. Умовно таку сильну легovanість прийнято позначати символом p^+ . Ці області мають металеві

выводи (4) та (5), до яких припаяні зовнішні провідники В та С. Вказані області відіграють роль витоку (В) та стоку (С) польового транзистора. Поверхня напівпровідника вкривається тонкою (порядку часток мікрону) плівкою діелектрика (б). Оскільки звичайно використовують кремній, то плівка створюється шляхом його окислення в атмосфері кисню. Утворений оксид кремнію SiO_2 має високі діелектричні та механічні властивості і надійно захищає напівпровідник від зовнішніх впливів. Далі діелектрична плівка покривається тонким шаром металу (7), який служить затвором. Оскільки робоча частина подібного транзистора є чергуванням шарів металу, діелектрика та напівпровідника, його скорочено називають МДН-транзистором. Інша його назва - МОН-транзистор від слів "метал-оксид-напівпровідник". Области витоку і стоку сполучені між собою тонким "містком" акцепторно-легованого напівпровідника (8), який утворює канал МДН-транзистора.

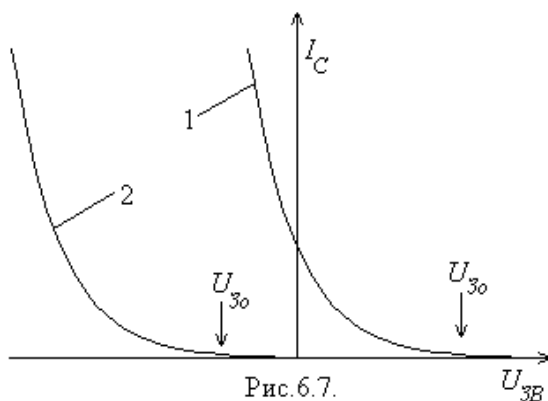
При нульовій напрузі на затворі (потенціал затвору $U_{зв}$ відлічується від витоку), провідність між витоком і стоком визначається природною провідністю каналу (8). З першого погляду може здатися, що струм поміж витоком та стоком міг би замикатися й по об'єму електронно-провідної підкладки. Однак при негативній напрузі на стоку поміж підкладкою і стоком утворюється закритий P^-n перехід, крізь який струмопроходження неможливе¹.

Якщо ж на затвор подати напругу позитивної полярності, то поле, яке проникає в напівпровідник, "виганятиме" дірки з p -каналу, знижуючи їх концентрацію і зменшуючи тим самим провідність каналу і наскрізний струм I_C , який проходить по ньому, аж до повного запирання при $U_{зв} > U_{з0}$ (рис.6.7, крива 1). У такому режимі транзистор працює на збіднення каналу носіями. При негативній напрузі на затворі в канал з p^+ областей "насмоктуватимуться" дірки. Канал почне збагачуватись дірками, його провідність буде зростати і струм через транзистор збільшиться.

Описаний транзистор має назву МДН-транзистора із "вбудованим" P -каналом, оскільки наявність провідного каналу вже закладена в самій конструкції такого транзистора.

Варіантом подібного транзистора може бути конструкція з n -каналом, де знаки провідності напруги і напрям струму змінені на зворотні. Умовні позначення для МДН-транзисторів із вбудованим P - та n -каналом зображені на рис.6.8а та 6.8б.

Другим, досить поширеним різновидом МДН-транзистора є транзистор з *індукованим* каналом. Від зображеного на рис.6.6 він відрізняється тим, що спеціально виготовлений



канал (8), який замикає виток із стоком, в ньому відсутній. Тому при нульовій напрузі на затворі струм у такому транзисторі дорівнює нулю (див. криву 2 на рис.6.7). Він також дорівнюватиме нулю й при позитивних напругах на затворі.

¹ Саме тому МДН-транзистори з P -каналом повинні мати на стоці негативну напругу, а з n -каналом - позитивну.

При негативній затворній напрузі електрони "відганятимуться" від поверхні напівпровідника, а дірки, навпаки, будуть притягатися до неї. Джерелом дірок може бути підкладка (її неосновні носії), але в основному дірки будуть насмоктуватися з розташованих поруч p^+ областей. При деякій напрузі $U_{з0}$, під затвором станеться зміна (інверсія) типу провідності і між витоком та стоком виникне провідний P -канал. Його провідність зростає в міру того, як напруга на затворі стає все більш негативною. Про такий транзистор кажуть, що він працює на принципі *збагачення* каналу носіями.

Процес виготовлення транзисторів з індукованим каналом дещо простіший аніж з вбудованим, тому ці перші мають більше поширення.

Варіантом подібних транзисторів є система з індукованим n -каналом. Умовні позначення транзисторів з індукованим P - та n -каналами подані на рис.б.8в та 6.8г.

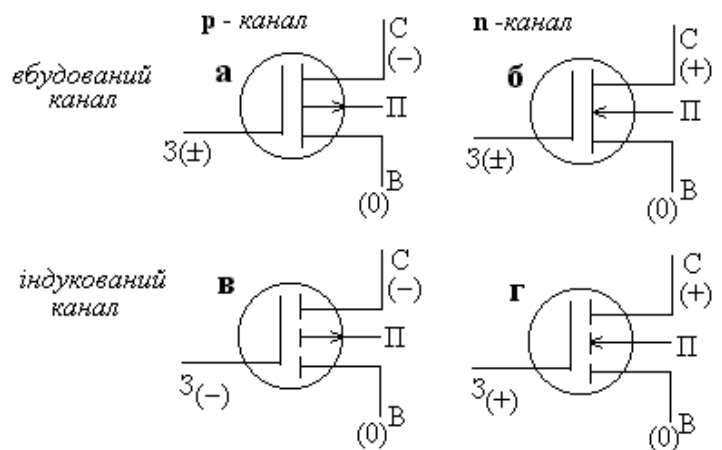


Рис.6.8.

Вихідні характеристики МДН-транзисторів подібні зображеним на рис.6.2 і відрізняються лише величинами та знаками затворних напруг. МДН-транзистори характеризуються тими ж параметрами, що й польові транзистори з керуючим $p-n$ переходом: вихідним опором, крутістю, вхідною та вихідною ємністю, яка у них має той же порядок величини як і у польових транзисторів з $p-n$ переходом. Істотно відрізняються вони лише за величиною вхідного опору, який для МДН-транзисторів може досягати $10^{14} - 10^{15}$ Ом. Великий вхідний опір - перевага МДН-транзисторів. Разом з тим, це є також їх недоліком, оскільки подібні транзистори виявляються дуже чутливими до статичної електрики. Необережний дотик до затвору інструментами чи пальцями, на яких є заряд статичної електрики, може призвести до пробію тонкого шару діелектрика і ушкодженню транзистора. Тому при роботі з МДН-транзисторами потрібно завжди заземлювати як тіло працюючого, так і інструменти, якими він користується.

6.4. Прилади з зарядовим зв'язком.

До польових транзисторів з ізолюваним затвором близькі за конструкцією та принципом дії прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), які тепер все частіше застосовують в радіоелектроніці для різних цілей, наприклад, для затримки та зберігання сигналів. Затримка сигналу полягає в тому, щоб подавши на вхід деякого пристрою сигнал $f(t)$ запам'ятати його і відтворити на виході без спотворення форми через деякий час τ у вигляді сигналу $f(t - \tau)$. Затримка сигналу на час порядку 10^{-4} - 10^{-3} с є необхідною операцією у кольоровому телебаченні, радіолокації, електронно-обчислювальній техніці. Для її реалізації досі звичайно використовувались складні, громіздкі та дорогі електронно-променеві трубки (потенціалоскопи), ультразвукові лінії, штучні LC -лінії, тощо. Тому поява компактних і

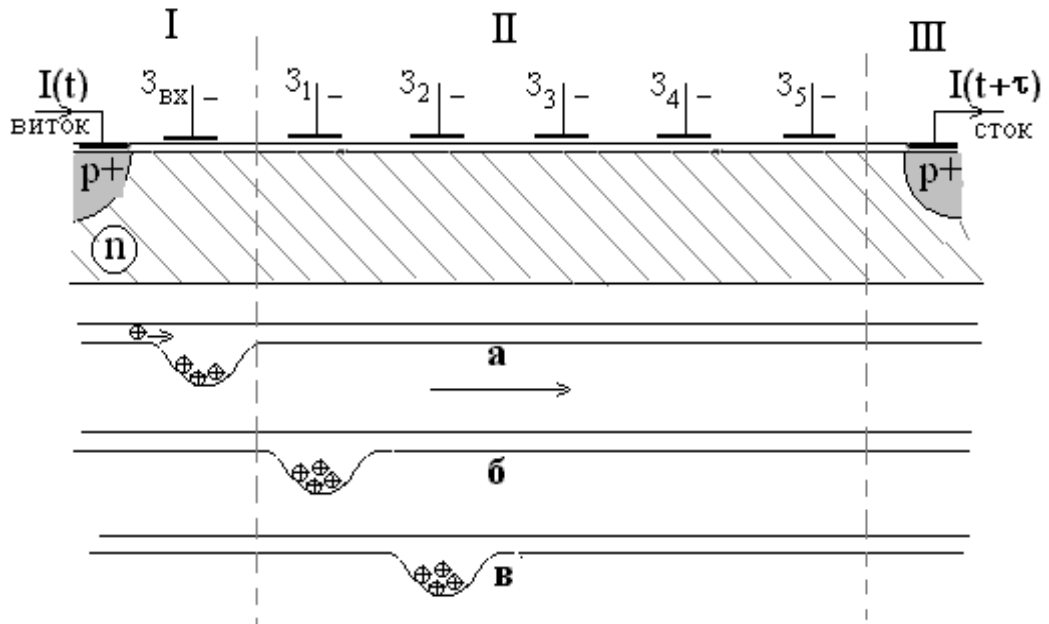


Рис. 6.9.

порівняно недорогих напівпровідникових приладів, які дозволяють досить просто досягати тих же результатів, є одним із значних успіхів сучасної напівпровідникової електроніки.

Схематичне зображення структури ПЗЗ подане на рис.6.9. Цей прилад складається з трьох секцій. Перша секція (I) - вхідна - включає виток з p^+ області та вхідний затвор $Z_{вх}$. В той момент часу t_0 , коли на вхідний затвор подається негативна напруга, під ним утворюється потенціальна яма для дірок, яка швидко наповнюється ними в наслідок їх інжектування у яму з p^+ області (рис.б.3а). Кількість дірок, "загнаних" у яму залежатиме від миттєвого значення струму витоку $I_{вум}(t)$.

Далі в роботу вступає секція II. Негативна напруга з вхідного затвору $Z_{вх}$ знімається, зате подається на перший затвор Z_1 . Дірки, які раніше були під затвором $Z_{вх}$, тепер перетікають у потенціальну яму, що утворилась під затвором Z_1 (рис.б.3б). Далі негативна напруга подається на затвор Z_2 і дірки переміщуються під нього (рис.б.3в) і т.п. По затворах секції II рухається хвиля негативної напруги і разом з нею переміщуються дірки, раніше інжектовані з витоку під вхідний затвор.

Остання - вихідна секція III, яка виконує роль стоку - це запертий $p-n$ перехід, куди екстрагуються дірки, що дійшли до крайнього затвору секції II. Кількість дірок, котрі "виплеснуться" у сток з останньої потенціальної ями, яка дісталась до нього, буде очевидно, відповідати кількості дірок, інжектованих раніше у цю яму з витоку. Таким чином, вхідний сигнал має повторюватись на виході системи з затримкою в часі, рівною тривалості "транспортування" дірок від вхідного затвора до стоку. А цей час, у свою чергу,

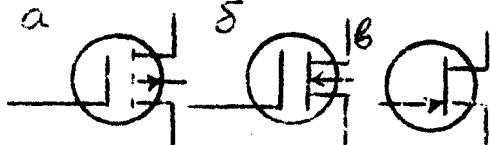
визначається кількістю затворів та швидкістю переміщення по ним хвилі негативної напруги.

Загальний час затримки, який здатні забезпечити ПЗЗ, не може бути надто великим. Справа в тому, що кількість зарядів, що зберігається в потенціальній ямі, поступово змінюється через рекомбінацію їх з основними носіями підкладки та насмоктування з неї неосновних носіїв. В результаті кількість зарядів в кожній з потенціальних ям намагається вирівнятися до деякого середнього значення, і записаний в них сигнал поступово "стирається". Цим і визначається максимальний час затримки, який в сучасних ПЗЗ досягає 10-20 нс.

З іншого боку, швидкодія ПЗЗ визначається швидкістю перетікання носіїв від одного затвора до другого, тривалість цього процесу складає кілька наносекунд. Тому максимальна частота затримуваних за допомогою ПЗЗ сигналів не може перевищувати кількох десятків мегагерц.

Контрольні питання до розділу "Польові транзистори"»

1. Чому транзистор називають "польовим"? Які інші назви він має? Поясніть ці назви.
2. За рахунок якого явища відбувається у польовому транзисторі керування вихідним струмом? Поясніть принцип дії польового транзистора з керуючим $P-n$ переходом.
3. В чому основна відміна у принципі дії польового та біполярного транзисторів?
4. Чи впливав величина вхідного струму польового транзистора на величину його вихідного струму?
5. Чому польовому транзистору притаманний більший (у порівнянні з біполярним) вхідний опір?
6. Чому малість вхідного струму польового транзистора може вважатися його важливою перевагою перед біполярним транзистором?
7. З яких двох характерних ділянок складаються вихідні характеристики польового транзистора? Дайте їм пояснення.
8. В якій області об'єму польового транзистора відбувається основне виділення тепла та саморозігрівання?
9. Якими параметрами характеризуються польові транзистори? Чому для їх описання не використовуються h -параметри?
10. Чим визначається верхня гранична частота польового транзистора?
11. Чому на еквівалентній схемі польового транзистора не зображаються вхідні кола?
12. Чому МДН-транзистор з індукованим P -каналом відкривається лише при досить великій негативній напрузі на затворі?
13. Чому в МДН-транзисторі струм між витоком та стоком йде тільки каналом, а не замикається через матеріал підкладки?
14. Які транзистори зображені на рисунку?



Вкажіть необхідну для їх роботи полярність напруг на електродах (відносно виток) та намалюйте їх прохідні характеристики.

15. Чому інструмент, за допомогою якого виконується монтаж МДН-транзисторів, потрібно обов'язково заземлювати?
16. Для яких потреб використовуються прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ)?
17. Поясніть, що ви розумієте під терміном "прилад з зарядовим зв'язком"?
18. Якими факторами визначаються максимальна та мінімальна затримки часу, які можуть забезпечити ПЗЗ?

Задачі до розділу.

1. Для польового транзистора з керуючим $P-n$ переходом, вихідна характеристика якого зображена на рис.6.2, побудуйте прохідну (затворну) характеристику для $U_{CB}=7$ В.
2. Для польового транзистора, вихідні характеристики якого зображені на рис.6.2, визначте крутість та вихідний опір в режимі $U_{CB}=7$ В, $U_{3B} = -0.5$ В.
3. Площа затвора МДН-транзистора $2,2 \cdot 10^{-3}$ мм² товщина шару оксиду 0.1 мкм, його діелектрична проникність $\epsilon = 5$.
Обчисліть вхідну ємність транзистора. Оцініть його граничну частоту, якщо опір каналу можна вважати рівним 200 Ом.