

“ТВЕРДОТІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА”

Лектор проф. Опанасюк Анатолій Сергійович

Метою вивчення дисципліни є формування у студентів знань у області напівпровідникових приладів та особливостей їхнього застосування в електронних схемах.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні:

розширити свій науково-технічний кругозір в області елементів електронної техніки; придбати знання, необхідні інженеру, що займається експлуатацією пристроїв і систем промислової електроніки.

Після засвоєння матеріалу навчальної дисципліни студент повинен:

ЗНАТИ:

- фізичні принципи роботи приладів твердотільної електроніки що є основою їх функціонування;
- параметри і характеристики різних напівпровідникових приладів і елементів інтегральних мікросхем, необхідні для забезпечення їх штатних режимів роботи;
- експлуатаційні особливості та можливі застосування;
- типові аналогові та цифрові схемотехнічні рішення.

ОЦІНЮВАННЯ

Курс викладається 2 семестри: модульних циклів - 6

Структура навчальної дисципліни: 378 год./10,5 кредитів (4/6,5)

Лк. – 40 год./20, практ. – 20 год./20 лаб. роб. – 20 год./20

ПМК - 1 семестр, ДСК - 2 семестр

Шкала оцінювання: R=100 балів

Нарахування балів:

присутність на лекції $20 \cdot 1=20$ балів

практичні заняття $10 \text{ пр.} \cdot 1,5 \text{ бали/пр.}=15$ балів

(з них 0,5 балів за присутність на практичному занятті та 1 бал за виконання завдань)

лабораторні заняття: $5 \text{ лаб. зан.} \cdot 4 \text{ бали/лаб.} = 20$ балів

(1 бал за присутність на лабораторній роботі та 3 бали за захист лабораторної роботи)

модульні контролю: $3 \cdot 15=45$ балів

РГР 10 балів.

ШКАЛА ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

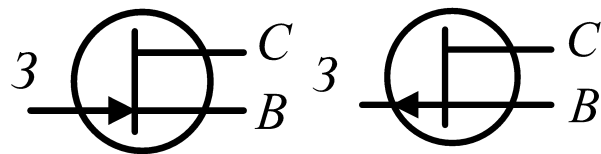
Сумма балів	Оцінка ESTS	Оцінка за національною шкалою	
		ДСК або ПСК	залік
90-100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно	не зараховано
1-34	F		

ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

- **Польові транзистори (ПТ)** – це напівпровідникові прилади, в яких протікання струму зумовлене дрейфом основних носіїв заряду під дією поздовжнього електричного поля, а керування величиною цього струму здійснюється за допомогою поперечного електричного поля, яке змінює електропровідність струмопровідної ділянки напівпровідника. Це поле створюється напругою, яка прикладена до керувального електрода.
- Існують два типи ПТ: **польові транзистори з керувальним $p-n$ переходом (ПТКП)** і **польові транзистори з ізольованим затвором**, що мають структуру метал – діелектрик – напівпровідник (метал-оксид-напівпровідник) і називаються скорочено МДП (МОН) – транзисторами.
- Другий елемент позначення ПТ – літера “П”.

Польові транзистори з керувальним-переходом

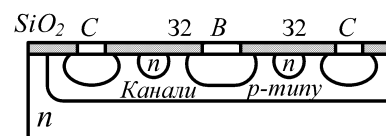
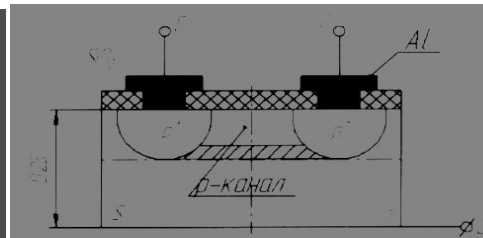
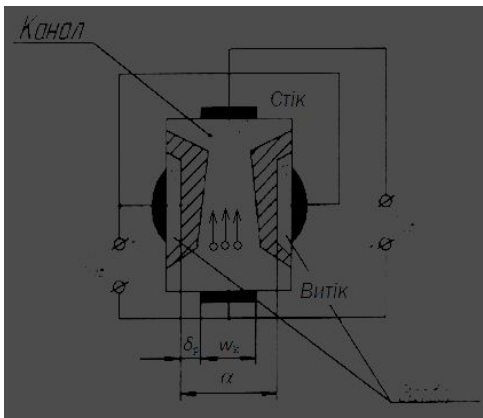
- ПТ з керувальним $p-n$ переходом (ПТКП) виготовляються з кремнієвого кристала n - або p - типу. Схемні позначення ПТКП показано на рисунку.
- До таких транзисторів належать прилади: КП 101, КП 102, КП 103, КП 201 – транзистори з p - каналом; КП 302, КП 303, КП 307, КП 312 – транзистори з n - каналом. Як бачимо з позначень, **низькочастотні ПТКП мають канал p - типу, високочастотні – канал n - типу**. Справа у тому, що в p - каналі основні носії – дірки, а їх рухливість менша, ніж у електронів, які є основними носіями в каналах n - типу.



Схемні позначення ПТКП з n - каналом (а) і з p - каналом (б)

ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

- Схематично будова ПТКП з *p* - каналом показана на рис.1. Транзистор складається з напівпровідникової області *p* - типу і двох областей *n* - типу. Останні з'єднуються разом і утворюють *керувальний електрод – затвор*. На межах поділу *n* - областей та *p* - області виникають високоомні запірні шари – керувальний *p–n* перехід.
- Частина p - області між запірними шарами називається каналом*. Під дією джерела напруги U_{CB} у каналі утворюється поздовжнє електричне поле, яке примушує дірки рухатися до “-” в напрямі *від електрода, що називається виток*, до електрода, який називається *сток*. Отже, в каналі і в зовнішньому колі стоку протікає струм стоку I_c під дією напруги на стоці відносно виток U_{CB} . На затвор відносно виток подається напруга $U_{ЗВ}$, яка зміщує *p–n* переходи в зворотному напрямі. У колі затвора протікає малий струм $I_з$
- Приклади конструкції ПТКП зображені на рис. 2 а (КП 102) та рис. 2б (КП 103). У рамках планарної технології (рис. 2 а) засобом дифузії в приповерхневому шарі кремнієвого кристала типу створюються вузька область *p* типу (канал) і дві високолеговані області *p*⁺ - типу (витік і стік). На ці області наноситься тонка плівка з алюмінію, до якої припаюються відводи виток і стоку. Поверхня кристала покривається захисним шаром оксиду кремнію (SiO₂). Затвором служить кристал-підкладка, до якого припаюється вивід керувального електрода. Уся конструкція розміщується в герметичному металевому або пластмасовому корпусі.



Схематична будова польового транзистора з керувальним переходом і *p* - каналом

Конструкція ПТКП КП 102 та фрагмент структури ПТКП КП 103

ПРИНЦИПИ РОБОТИ ПТ

- *Польові транзистори типу КП 103, на відміну від попередніх, мають п'ять паралельних каналів, біля кожного з яких розміщений додатковий затвор 32 (першим затвором 31 є підкладка) – рис. Наявність п'яти каналів і додаткових затворів дозволяє збільшити струм стоку, а також підвищити ефективність керування товщиною каналу, оскільки перекриття каналу відбувається з боку затвора і зверху, і знизу.*
- *Принцип дії ПТКП розглянемо за допомогою схематичного зображення приладу на рис. 1. При збільшенні напруги $U_{ЗВ}$, яка вмикає заірні шари в зворотному напрямі, ці шари розширюються. Товщина $p-n$ переходу зростає у бік каналу, оскільки у ПТКП області затвора завжди високолеговані, а канал має низьку концентрацію домішок ($N_{оз} \gg N_{ак}$ для транзистора з p - каналом). Розширення керувального $p-n$ переходу приводить до зменшення ширини каналу, зниження його електропровідності та зменшення струму I_c через нього при незмінній напрузі $U_{СВ}$*
- *Отже, змінюючи напругу на затворі $U_{ЗВ}$, тобто змінюючи поперечне електричне поле, можна ефективно керувати зміною струму стоку I_3 (величиною внутрішнього опору транзистора). Це найважливіша властивість польового транзистора в режимі підсилення вхідних сигналів. Саме вона зумовлює суттєву **відмінність ПТ від біполярних транзисторів**, яка полягає в наступному. При зміні вхідної напруги ПТ $U_{ЗВ}$ змінюється лише поперечне поле, що керує інтенсивністю потоку носіїв через канал. Вхідний струм транзистора – струм затвора I_3 – практично не змінюється як струм насичення $p-n$ переходу при зворотному вмиканні. Отже, внаслідок слабкої зміни I_3 при зміні затворної напруги, а також із причини великого вхідного опору ПТ (малого струму I_3) **вважають, що керування вихідним струмом приладу I_c відбувається не за рахунок зміни вхідного струму, як у БТ, а внаслідок зміни вхідної напруги, як у вакуумному триоді. Великий вхідний опір усіх ПТ порівняно з біполярними – це суттєва перевага польових приладів.***

ШИРИНА КАНАЛУ ПТ

•*Нехай стокова напруга $U_{CB} = 0$. Тоді при зміні $U_{ЗВ}$ можна досягти повного перекриття каналу внаслідок змикання запірних шарів. Канал у цьому випадку має дуже великий опір, а напруга, при якій це відбувається, називається напругою відсікання ($U_{ЗВвідс}$). Напруга $U_{ЗВвідс}$ є важливим параметром ПТКП. Оцінимо її, а також дослідимо вплив напруги $U_{ЗВ}$ на товщину каналу ω_K .*

Товщина $p-n$ переходу, як відомо з першого розділу конспекту, дорівнює

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k \pm U)}.$$

Оскільки $N_{D3} \gg N_{AK}$, то $d \approx d_p$, і тоді для зворотної напруги затвора

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k + U_{ЗВ})}{eN_A}}.$$

•Ширину каналу можна визначити згідно з рис.1 за формулою

$$\omega_K = a - 2d = a - 2\sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k + U_{ЗВ})}{eN_A}}.$$

де a - відстань між n - областями затвора.

•Як було зазначено, при $U_{ЗВ} = U_{ЗВвідс}$ канал перекривається ($\omega_K = 0$). Для цього випадку з останньої формули випливає, що

$$U_k + U_{ЗВвідс} = \frac{ea^2N_A}{8\epsilon\epsilon_0}.$$

•Наприклад, для ПТКП з $N_A = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ і $a = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ маємо

$$U_k + U_{ЗВвідс} = 6 \text{ В}.$$

ШИРИНА КАНАЛУ ПТ

- Оскільки контактна різниця потенціалів $U_k \leq 0,3$ В, то можна вважати, що $U_{зв\text{відс}} \gg U_k$, і тоді

$$U_{зв\text{відс}} = \frac{ea^2 N_A}{8\epsilon\epsilon_0}.$$

- Використовуючи останні вирази, можна одержати аналітичну залежність ширини каналу ω_K від напруги на затворі $U_{зв}$:

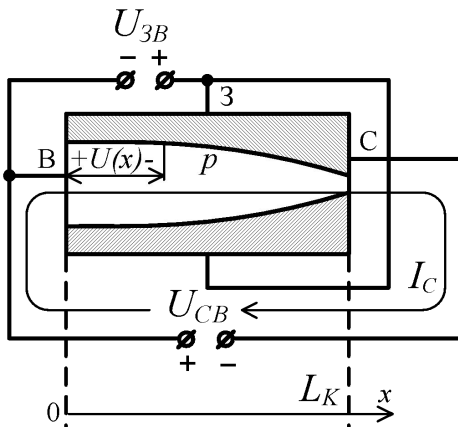
$$\omega_K = a \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зв}}{U_{зв\text{відс}}}} \right).$$

- Оскільки *опір каналу обернено пропорційний до його ширини* ($R \sim 1/\omega_K$), то існує така залежність:

$$R_K(U_{зв}) = \frac{R_{K0}}{a \left(1 - \sqrt{\frac{U_{зв}}{U_{зв\text{відс}}}} \right)}.$$

де $R_K(U_{зв})$ – опір каналу при цій напрузі затвора; R_{K0} - опір каналу при $U_{зв} = 0$.

• **Тепер нехай $U_{CB} \neq 0$.** Напруга, що діє на стосі ПТКП, викликає проходження через канал і в зовнішньому колі струму I_C . Струм стоку, проходячи через ненульовий розподілений опір каналу, створює на ньому падіння напруги (рис.). На цьому рисунку вибрано переріз каналу на відстані x від витоків. Падіння напруги $U(x)$ пропорційне величині опору ділянки каналу і струму стоку I_C . Таким чином, у перерізі x напруга на p - n переході $U_{зв} + U(x)$, оскільки напруга $U(x)$ має той самий напрям, що й напруга $U_{зв}$, і її дія на p - n перехід еквівалентна дії додаткової зворотної напруги.



До пояснення конфігурації каналу ПТКП при $U_{CB} \neq 0$.

ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

• На основі цього можна одержати залежність ширини каналу від координати x , тобто від величини напруги $U(x)$:

$$\omega_K(x) = a \left(1 - \sqrt{\frac{U_{3В} + U(x)}{U_{3Ввідс}}} \right).$$

• Очевидно, що падіння напруги при проходженні струму через канал залежить від координати x . Так, біля витоку ($x = 0$) $U(x) = 0$. Біля стоку ($x = L_K$, де L_K - довжина каналу) $U(x) = U(L_K) = U_{СВ}$. З цього приводу можна вважати, що **при ненульовій стоковій напрузі ширина каналу зменшується в напрямі від витоку до стоку** згідно з формулою. **Біля стоку ширина каналу мінімальна**, оскільки $U(x)_{\max} = U_{СВ}$:

$$\omega_K(x) = a \left(1 - \sqrt{\frac{U_{3В} + U_{СВ}}{U_{3Ввідс}}} \right).$$

• З формули випливає, що **при проходженні через канал ПТКП струму стоку I_C опір каналу, а також струм через нього залежить і від напруги $U_{3В}$, і від напруги $U_{СВ}$** .

• Розглянемо **статичні характеристики ПТКП**, які знімають за допомогою схеми наведеної на рисунку.

На цій схемі транзистор, що досліджується має канал p -типу. Не потрібно забувати, що під час дослідження транзистора з каналом n -типу полярності підключення джерел живлення і вимірювальних приладів треба змінити на зворотні.

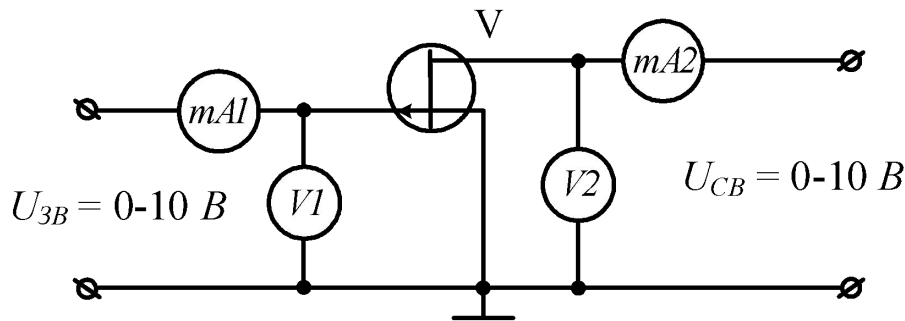


Схема для експериментального зняття характеристик ПТКП

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПТ

Статичні входні характеристики

• **Це залежність $I_3 = f(U_{3B}) | U_{CB} = const$** (рис.1). Входні характеристики повністю визначаються властивостями $p-n$ переходу ПТКП і тому являють собою ВАХ цього переходу. **Оскільки на струм I_3 практично не впливає стокова напруга U_{CB} , то залежності $I_3 = f(U_{3B})$ для різних значень U_{3B} майже не відрізняються одна від одної і подаються у довідниках у вигляді однієї характеристики.** **Вмикати керувальний перехід ПТКП під пряму напругу, що перевищує 0,5 В, ЗАБОРОНЕНО.**

Статичні прохідні (стокозатворні) характеристики

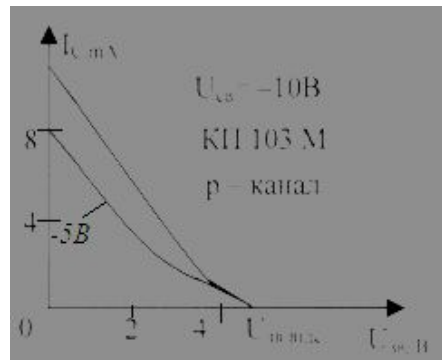
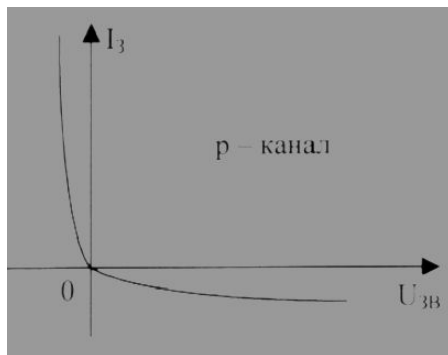
• **Це залежності $I_C = f(U_{3B}) | U_{CB} = const$.** На рис.2 показані стокозатворні характеристики польового транзистора КП 103 М. Їх вигляд пояснюється розглянутим принципом роботи ПТКП. **При збільшенні стокової напруги зростає струм стоку, і тому прохідна характеристика зміщується вгору.**

Стокозатворна характеристика може бути апроксимована формулою

$$I_C = I_{C\text{поч}} \left(1 - \frac{U_{3B}}{U_{3B\text{відс}}}\right)^2,$$

де $I_{C\text{поч}}$ - початковий струм стоку (при $U_{3B} = 0$).

• При напрузі відсікання $U_{3B\text{відс}}$ (у КП 103 М вона приблизно дорівнює 5 В) струм стоку $I_C \approx 0$. Точно дорівнювати нулю він не буде, оскільки навіть при повному перекритті каналу через транзистор протікає зворотний струм $p-n$ переходу I_3 - струм .



Вхідна (затворна) характеристика ПТКП

Статичні прохідні характеристики ПТКП

СТАТИЧНІ ВИХІДНІ (СТОКОВІ) ХАРАКТЕРИСТИКИ

• Це залежності $I_C = f(U_{CB}) | U_{ЗВ} = const$.

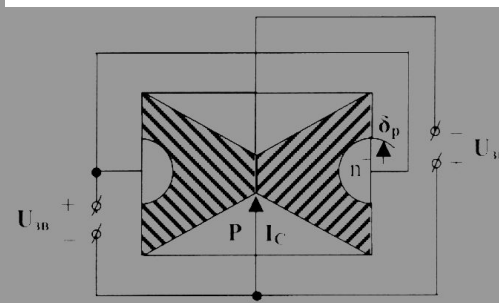
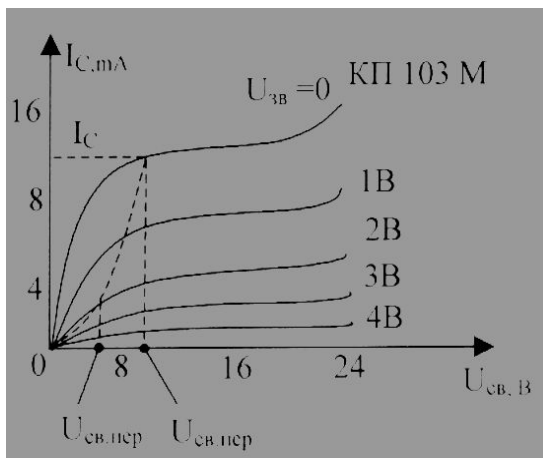
• Вихідні характеристики польового транзистора КП 103 М показані на рисунку.

• Розглянемо спочатку стокову характеристику, зняту при $U_{ЗВ} = 0$. Якби опір каналу не залежав від струму, що через нього проходить, залежність $I_C = f(U_{CB})$ була б лінійною. Але вже при невеликій напрузі U_{CB} на крутій ділянці характеристики зростання I_C при збільшенні U_{CB} сповільнюються, тому що канал повільно зменшується за шириною внаслідок зростання заперної щодо $p-n$ переходу напруги $U(x)$.

• При деякій напрузі на стоці $U_{CB} = U_{CBпер}$ (напрузі перекриття) канал зникає біля стоку. З формули

$$\omega_K = \alpha \left(1 - \sqrt{\frac{U_{ЗВ} + U_{CB}}{U_{ЗВвідс}}} \right)$$
 випливає, що $U_{CBпер} = U_{CBвідс}$. Подальший хід характеристики відзначається зміною крутої

ділянки на пологую, на якій зростання напруги U_{CB} майже не приводить до зростання струму I_C . Але деяке зростання струму стоку на пологій ділянці пояснюється наступним чином. Після перекриття каналу біля стоку подальше збільшення напруги U_{CB} приводить до збільшення довжини перекритої частини каналу і його опору. Якби довжина перекритої частини каналу лінійно залежала від напруги U_{CB} , то при її зростанні збільшувався б пропорційно загальний опір каналу, і струм через канал мав би постійну величину. Але насправді довжина перекритої частини каналу залежить від напруги U_{CB} оскільки глибина проникнення заперного шару до каналу d_p (рис.).



Статичні вихідні (стоківі) характеристики ПТКП

Змикання каналу під дією струму стоку

СТАТИЧНІ ВИХІДНІ (СТОКОВІ) ХАРАКТЕРИСТИКИ

• Враховуючи, що $d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U_k + U_{ЗВ})}{eN_A}}$, отримуємо $d_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U_k + |U_{ЗВ}| + |U_{СВ}|)}{eN_A}}$,

тобто довжина зімкненої (перекритої) частини каналу і його опір пропорційні $\sqrt{U_{СВ}}$ і збільшуються при збільшенні цієї напруги повільніше. Тому на пологій ділянці при зростанні $U_{СВ}$ струм I_C також дещо зростає. При деякій великій напрузі $U_{СВпроб}$ виникає пробій ділянки $p-n$ переходу між затвором і стоком (оскільки саме між цими електродами максимальна напруга).

• Збільшуючи напругу на затворі відносно нуля, спостерігають зміщення вихідних характеристик донизу, оскільки струм стоку при цьому, згідно з принципом дії ПТКП, зменшується. Напруга перекриття $U_{СВпер}$ для кожної наступної характеристики також зменшується. Це пояснюють сумісною дією на $p-n$ перехід обох напруг $U_{СВ}$ і $U_{ЗВ}$,

$$|U_{СВпер}| + |U_{ЗВ}| + |U_{ЗВвідс}| = const .$$

• Зрозуміло з цієї формули, що при збільшенні $U_{ЗВ}$ повинна зменшуватися напруга перекриття $U_{СВпер}$. Пологі ділянки на сім'ї характеристик рисунка зумовлені тими самими процесами, що й відповідна ділянка на характеристиці при $U_{ЗВ} = 0$.

Оскільки внаслідок принципу дії ПТКП напруга пробою між стоком і затвором

$$U_{СЗ} = (|U_{ЗВ}| + |U_{СВ}|)_{проб} = const ,$$

то **при збільшенні напруги на затворі пробій відбудеться при меншій напрузі стоку**, як це показано на вихідних характеристиках (див. рис.).

• **Круті ділянки вихідних характеристик називають омичними.** Диференціальний опір ПТКП на цих ділянках залежить від затворної напруги $U_{ЗВ}$. Тому ці ділянки є робочими в режимі, коли ПТКП використовують як електронно-керований змінний резистор.

На пологих ділянках ПТКП працює як підсилювальний елемент.

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

- 1. *Крутизна прохідної характеристики* визначає нахил цієї характеристики в довільній точці:

$$S_{\text{ПТ}} = \left. \frac{dI_C}{dU_{\text{ЗВ}}} \right|_{U_{\text{СВ}} = \text{const}},$$

тобто засвідчує, на скільки міліампер зміниться струм стоку при зміні напруги на затворі на 1 В при $U_{\text{СВ}} = \text{const}$. Значення $S_{\text{ПТ}}$ лежить у межах від 0,5 до кількох мА/В і може бути одержане графоаналітично за стокозатворними характеристиками.

- 2. *Внутрішній (диференціальний) опір*

$$r_{\text{ПТ}} = \left. \frac{dU_{\text{СВ}}}{dI_{\text{СВ}}} \right|_{U_{\text{ЗВ}} = \text{const}},$$

• Становить від кількох десятків до сотень кілоомів. Може бути визначений за вихідними характеристиками ПТ.

- 3. *Статичний коефіцієнт підсилення напруги*

$$\mu_{\text{ПТ}} = \left. \frac{dU_{\text{СВ}}}{dU_{\text{ЗВ}}} \right|_{I_C = \text{const}},$$

• Коефіцієнт може бути визначений за формулою

$$\mu_{\text{ПТ}} = S_{\text{ПТ}} \cdot r_{\text{ПТ}},$$

• Величина становить сотні одиниць.

- 4. *Диференціальний вхідний опір*

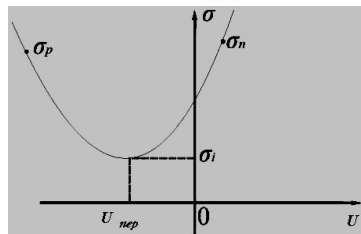
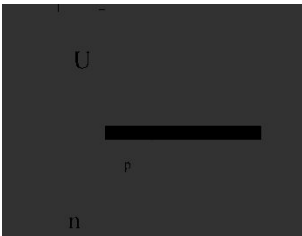
$$r_{\text{ЗВ}} = \left. \frac{dU_{\text{ЗВ}}}{dI_{\text{З}}} \right|_{U_{\text{СВ}} = \text{const}},$$

• Значення $r_{\text{ЗВ}}$ лежить у межах від кількох сотень кілоом до одиниць мегаОм. Воно може бути розраховане за статичними вхідними (затворними) характеристиками.

МДН - ТРАНЗИСТОРИ

Ефект поля

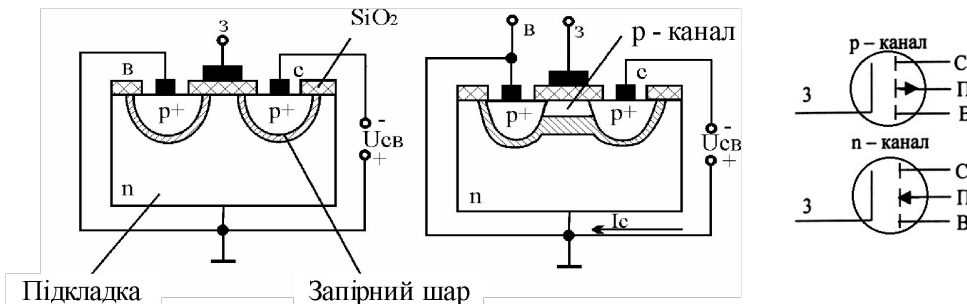
- В основу роботи ПТ з ізолюваним затвором (МДН - або МОН - транзисторів) покладене явище, яке називають ефектом поля. Суть цього явища полягає у такому. Нехай до напівпровідникового кристала n -типу приєднано металеву пластину (рис.), яка не має гальванічного зв'язку з кристалом, оскільки відділена від останнього ізолювальною діелектричною плівкою. Якщо до металевієї пластини і до кристала (підкладки) припаяти електроди і подати напругу плюсом до металевієї пластини і мінусом до підкладки, то в кристалі виникає електричне поле. Під дією цього поля електрони з глибини НП дрейфують до поверхні, збагачуючи основними носіями приповерхневий шар і внаслідок цього збільшуючи його електронну провідність (див. праву гілку графіка рис., позначену σ_n).
- Якщо тепер змінити полярність підімкнення напруги U (як це показано на рис.), то поле змінить свій напрям, і електрони від поверхні кристала дрейфуватимуть вглиб. Приповерхневий шар кристала збіднюється на основні носії за рахунок відтоку електронів і припливу власних дірок з глибини НП. Електронна питома провідність шару біля поверхні зменшується до величини власної питомої провідності σ_i (див. ділянку від $U=0$ до $U=U_{пор}$ у другому квадранті графіка рис.). При пороговій напрузі устанавлення власної питомої провідності σ_i шару означає, що концентрація електронів дорівнює концентрації дірок: $n_i = p_i$. Якщо на металевій пластині збільшувати негативну напругу відносно підкладки далі, то дірок у приповерхневому шарі стає більше, ніж електронів, $p_n > n_n$, шар набирає провідності p -типу, і між шаром і рештою кристала виникає p - n перехід (рис.). Це явище називають інверсією типу електропровідності приповерхневого шару. Подальше збільшення негативної напруги на металі приводить до збагачення інвертованого шару на дірки – зростає діркова питома провідність (гілка σ_p на характеристиці (рис.)).



До пояснення ефекту поля в напівпровіднику

МДН - ТРАНЗИСТОРИ З ІНДУКОВАНИМ КАНАЛОМ

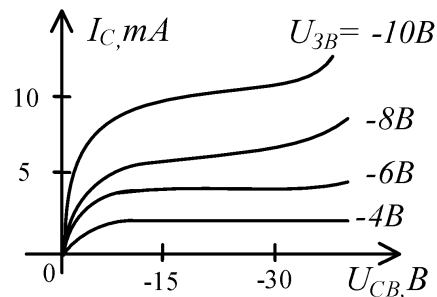
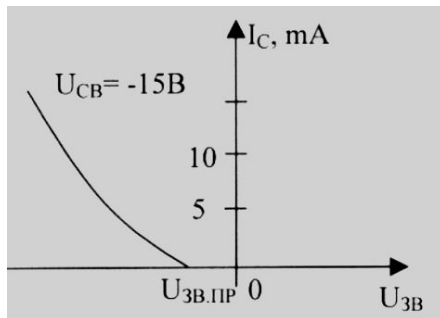
- Будова МДН (МОН) - транзистора з індукованим каналом p – типу зображена на рисунку. У НП n - типу (підкладці) дифузійним способом створені дві збагачені p^+ - області, які не мають між собою електричного зв'язку, бо відділені одна від одної зустрічними p - n переходами. Одна з цих областей є виток, друга – сток. Металева пластина, відділена від поверхні підкладки ізолювальним шаром двоокису кремнію, відіграє роль затвора.
- При $U_{зв}=0$ і ненульовій напрузі стоку (рис. а) між витком і стоком проходить малий зворотний струм p - n переходу. Транзистор закритий.
- Якщо тепер до металевого затвора прикласти відносно підкладки негативну напругу, то під дією електричного поля починається дрейф електронів від поверхні вглиб кристала. При пороговій напрузі $U_{зв} = U_{звпор}$ відбувається інверсія типу електропровідності приповерхневого шару і виникає канал p - типу, що з'єднує електрично області витoku і стоку (рис. б).
- При ненульовій напрузі стоку через канал і в зовнішньому колі потече струм I_c , який у каналі зумовлений рухом дірок від витoku до стоку. Оскільки струм I_c , що протікає через канал, створює на його опорі падіння напруги $U(x)$, як у ПТКП, то електричне поле біля витoku стає більшим, ніж біля стоку, і тому канал біля витoku ширший.



Будова МДН - транзистора з індукованим каналом: а) $U_{зв}=0$; б) $U_{зв}<0$; в) схемні позначення

МДН - ТРАНЗИСТОРИ З ІНДУКОВАНИМ КАНАЛОМ

- При збільшенні негативної напруги на затворі глибина проникнення інверсного шару в НП збільшується, канал розширюється, його провідність і струм стоку зростають. Цей режим, коли збільшення за модулем напруги $U_{ЗВ}$ приводить до зростання струму стоку I_C , називають **режимом збагачення**.
- Очевидно, що при прикладенні до затвора позитивної напруги струм стоку буде складати мізерну величину, як струм $p-n$ переходу в зворотному ввімкненні, оскільки каналу не існуватиме.
- Статична стокозатворна характеристика МДН – транзистора показана на рис. 1.
- Форма характеристики відповідає принципу дії МДН – транзистора з індукованим каналом. З характеристики бачимо, що такі МДН - транзистори збагаченого типу.
- Стокові (вихідні) характеристики МДН - транзистора з індукованим каналом показані на рисунку 2.
За формою вони аналогічні до вихідних характеристик ПТКП і зумовлені подібними процесами у каналі. Зміщення вихідних характеристик угору при збільшенні негативної напруги $U_{ЗВ} > U_{ЗВпер}$ зумовлене розширенням каналу і зменшенням його електричного опору (зростанням струму стоку).
- МДН – транзистори з індукованим каналом, крім їх використання як дискретних приладів (КП 301, КП 304 з p - каналом, КП 350 з n - каналом), використовують у мікроелектроніці в так званих **КМОН - структурах**.

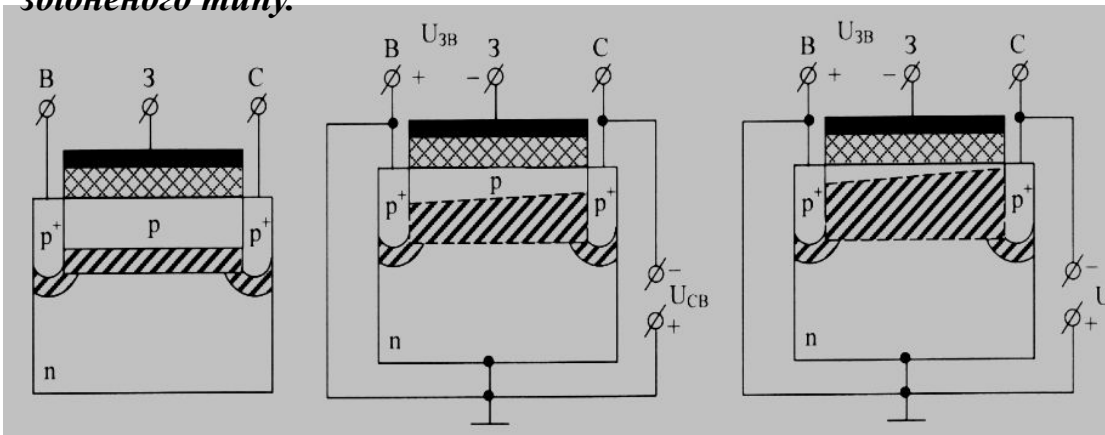


Вихідна характеристика МДН - транзистора збагаченого типу

Стокзатворна характеристика МДН - транзистора з індукованим p - каналом

МДН - ТРАНЗИСТОРИ ІЗ ВБУДОВАНИМ КАНАЛОМ

- У МДН - транзисторах із вбудованим каналом канал створюється конструктивно, на стадії виготовлення, а не виникає внаслідок інверсії типу електропровідності приповерхневого шару, як у транзисторах з індукованим каналом. Тому в таких транзисторах при нульовій напрузі на затворі і при напрузі між стоком та витоким, відмінній від нуля, через канал протікає деякий струм, який називається **початковим струмом стоку** (рис.). У МДН – транзисторах з вбудованим каналом p - типу збільшення негативної напруги на затворі приводить до розширення каналу і збільшення струму стоку $I_{Сточ}$ (рис. б). Збільшення на затворі такого транзистора позитивної напруги (рис. в) спричиняє надходження електронів з товщі напівпровідника до приповерхневого шару. Ширина каналу, його електропровідність, а також струм стоку зменшуються.
- При деякій позитивній напрузі на затворі ($U_{зв\text{відс}}$) відбувається інверсія типу провідності каналу, і області стоку і витоким розділяються областю n - типу. Струм стоку зменшується до значення зворотного струму p – n переходу.
- Режим роботи транзистора, коли збільшення напруги $U_{зв}$ за модулем приводить до зменшення струму стоку, називають **режимом збіднення**. Оскільки лише МДН – транзистори з вбудованим каналом, крім режиму збагачення, мають ще і **режим збіднення**, то вони називаються **польовими транзисторами збідненого типу**.

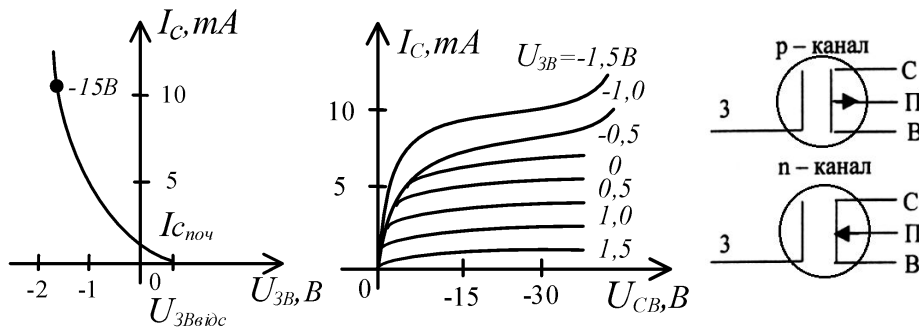


Будова МДН - транзистора з вбудованим каналом

МДН - ТРАНЗИСТОРИ ІЗ ВБУДОВАНИМ КАНАЛОМ

• Статичні характеристики МДН – транзистора з *вбудованим каналом р-типу* наведені на рис. Вигляд їх подібний до вигляду характеристик інших польових транзисторів. Однак ці характеристики, на відміну від попередніх, мають область позитивних затворних напруг (область збіднення) і область негативних затворних напруг (область збагачення).

• **Переваги польових транзисторів** – високий вхідний опір і, як наслідок, дуже мале споживання енергії в керульому колі, високий порівняно з БТ коефіцієнт підсилення потужності, ще більший, ніж ПТКП, властивий МДН – транзисторам. Та обставина, що металевий затвор у цих приладах ізольований від напівпровідникової підкладки тонким шаром діелектрика, зумовлює, що вхідний опір МДН – транзисторів у десятки – сотні разів вищий, ніж у ПТКП, і досягає десятків мегаомів, тобто затворний струм I_z не перевищує одиниць наноамперів. До того ж, ця властивість польових транзисторів з ізольованим затвором зумовлює збільшення завадостійкості і надійності роботи електронних схем, у яких вони використовуються. Але у таких приладів **є суттєвий недолік**. Відомо, що шар діелектрика товщиною 1 мкм пробивається напругою 500 - 600 В. У МДН - транзисторах ізольовальна плівка має товщину 0,1 – 0,15 мкм, і тому її **пробивна напруга не перевищує кількох десятків вольтів**. Внаслідок цього **МДН-транзистори є дуже чутливими до статичної електрики, навіть до тієї, що накопичується на людському тілі**. Тому в довідниках рекомендовано паяння і згинання відводів цих транзисторів здійснювати не ближче 3 мм від корпусу. **Під час транспортування, зберігання і монтажу відводи приладів повинні закорочуватись, а руки оператора і паяльник потрібно заземляти**. Прикладами МДН – транзисторів з вбудованим каналом є малопотужні прилади: КП 305, КП 306, КП 313. Усі ці транзистори високочастотні і тому мають провідність каналу *n* - типу. До потужних МДН - транзисторів із вбудованим *n* - каналом належать транзистори КП 901.



Статичні характеристики МДН-транзисторів з вбудованим *p* - каналом: а) стокозатворні; б) стокові; в) схемні позначення

Залежність характеристик ПТ від температури

• У ПТКП зміна температури приводить до зміни контактної різниці потенціалів U_K на $p-n$ переході, зворотного струму через перехід, а також до зміни рухливості основних носіїв заряду.

• Зміна U_K супроводжується, зміною глибини проникнення $p-n$ переходу до каналу, а це дещо змінює напругу відсічення $U_{ЗВ\text{відс}}$. Наприклад, при збільшенні температури на 1°C вона зменшується на 2 мВ , товщина $p-n$ переходу зменшується, а напруга відсічення зростає, причому $\Delta U_{ЗВ\text{відс}} = \Delta U_K$. Зменшення товщини $p-n$ переходу спричиняє розширення каналу, тобто збільшення струму I_C .

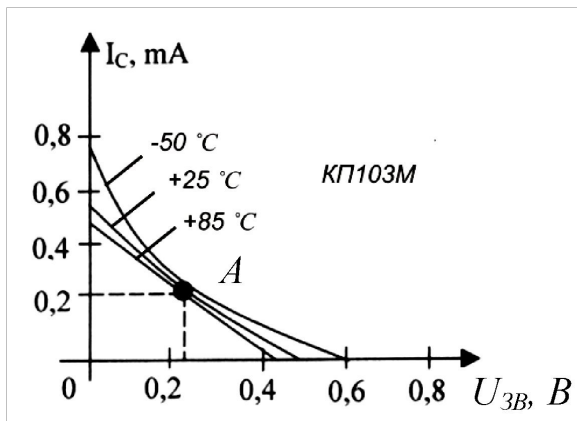
• Водночас залежність рухливості основних носіїв у каналі від температури може бути виражена формулою

$$\mu_{T_2} = \mu_{T_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^n$$

де μ_{T_2} , μ_{T_1} - рухливість носіїв при температурі T_1 і T_2 відповідно; n - деякий коефіцієнт.

• З формули випливає, що при збільшенні температури рухливість основних носіїв зменшується, опір каналу внаслідок цього збільшується, струм стоку I_C зменшується.

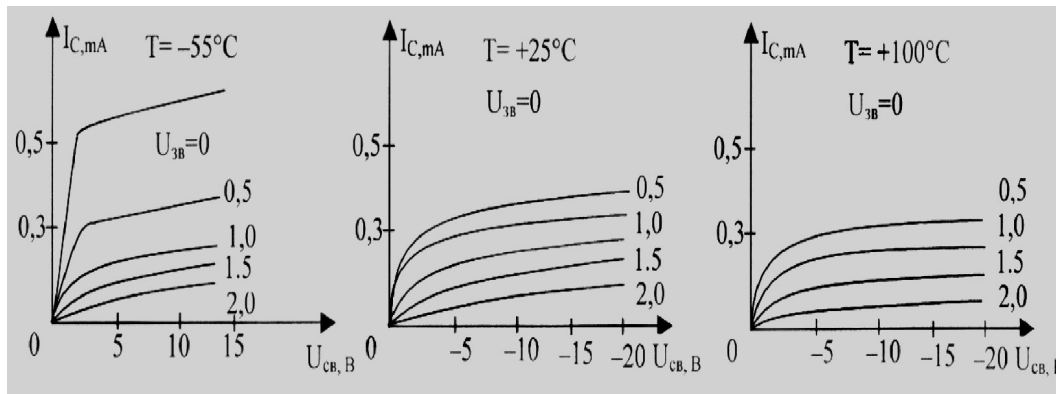
• Отже, зміна U_K і рухливості основних носіїв у каналі при зміні температури протилежно впливають на опір каналу та струм стоку I_C . За певних умов дія цих факторів взаємно компенсується, і при деякій напрузі на затворі струм стоку I_C не залежатиме від температури (рис.).



Температурний дрейф стоконатворних характеристик ПТКП

Залежність характеристик ПТ від температури

- **Точку А на стокозатворній характеристиці ПТКП КП 103М (рис.), в якій струм I_C не залежить від температури, називають *термостабільною точкою*. Лівіше від цієї точки струм I_C зі збільшенням температури зменшується, правіше – збільшується. При цьому збільшення температури приводить до деякого збільшення напруги відсічення. Але на основній ділянці роботи ПТКП (лівіше т. А) струм стоку і крутизна зменшуються при зростанні температури. Ця обставина зумовлює істотну перевагу ПТ перед БТ, у яких внаслідок явища самоперегріву зростання колекторного струму при нагріванні може призвести остаточно до теплового пробою.** Вплив температури на хід стокових характеристик ПТКП показаний на рис. Разом з тим збільшення температури приводить до зростання зворотного (теплового) струму керувального $p-n$ переходу, тобто вхідного струму ПТКП I_3 (приблизно у 2 рази при збільшенні температури на 10°C). Тому **при збільшенні температури вхідний опір ПТКП зменшується.**
- У МДН - транзисторах температурну залежність **напруги відсічення (порогової напруги)** визначають зміною рівня Фермі, зміною об'ємного заряду в збідненому шарі $p-n$ переходу між каналом та підкладкою, а також залежністю величини заряду в діелектрику від температури. Величина порогової напруги в МДН – транзисторах змінюється на 4-10 мВ при зміні температури на 1 градус (залежно від типу приладу). **Температурні зміни характеристик і параметрів МДН – транзисторів більші, ніж у ПТКП.**
- Робочий діапазон температур ПТ менший, ніж у кремнієвих БТ (від -60°C до $+125^\circ\text{C}$, як у КП 305, КП 306).



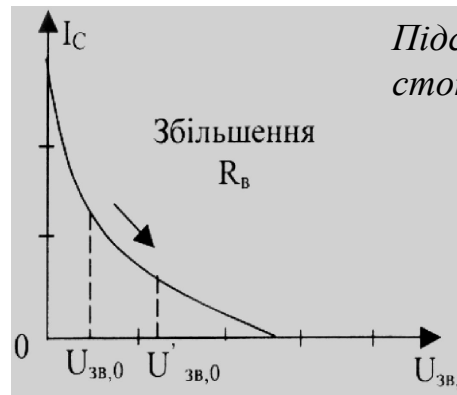
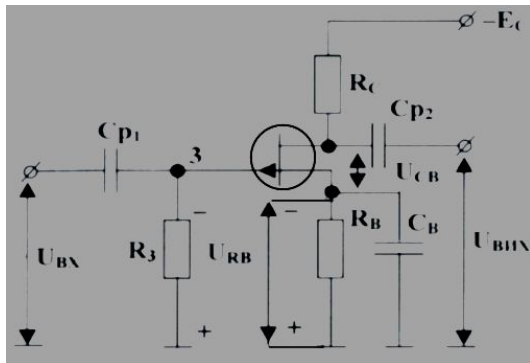
Вплив температури на стокові характеристики ПТКП

ДИНАМІЧНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ ПТ

- У динамічному режимі на вхід ПТ надходить змінна напруга, яка викликає зміну вихідного струму. З метою виділення корисного сигналу до вихідного кола транзистора вмикають елемент навантаження. **Транзистор при цьому можна вмикати зі спільним витоком, спільним затвором або зі спільним стоком.** Найбільше поширення має схема зі **спільним витоком**. Розглянемо деякі різновиди схем каскадів на ПТ зі спільним витоком

Каскад на ПТ: розрахунок у статиці та динаміці

- Найпростіша схема підсилювального каскаду на ПТКП зображена на рис а. Підсилювач містить у собі ПТ, увімкнений зі спільним витоком, резистор навантаження R_c , ланцюжок автоматичного зміщення R_B, C_B і резистор R_3 , який забезпечує подачу на затвор напруги зміщення з ланцюжка R_B, C_B , і напруги вхідного сигналу, а також роздільні конденсатори C_{p1} і C_{p2} . При $U_{вх}=0$ в колі стоку і витоку протікає струм спокою I_{c0} , який створює на резисторі R_B напругу зміщення керуємого $p-n$ переходу $U_{зв0}=I_{c0}R_B$. Опір резистора дорівнює $R_B=U_{зв0}/I_{c0}$. Резистор R_B - це елемент негативного зворотного зв'язку за постійним струмом. **Збільшення опору цього резистора приводить до збільшення стабільності параметрів підсилювача і разом з тим до зменшення струму стоку і до зміщення робочої точки на ділянку стокозатворної характеристики з меншою крутизною $S_{ПТ}$** (рис. б).



Підсилювальний каскад на ПТКП (а) та стокозатворна характеристика транзистора (б)

КАСКАД НА ПТ: РОЗРАХУНОК У СТАТИЦІ ТА ДИНАМІЦІ

• Зменшення крутизни $S_{ПТ}$ викликає зменшення коефіцієнта підсилення каскаду, а наближення робочої точки до напруги відсічки зменшує допустиму амплітуду вхідної напруги і збільшує нелінійні спотворення вихідної напруги. Тому **для того, щоб при збільшенні опору резистора R_B не зменшувався струм I_{c0} , до кола затвора потрібно або ввімкнути додаткове джерело напруги живлення, або ввімкнути затвор до розподільника напруги з резисторів R_1 і R_2** (рис.).

• Завдяки цьому досягається часткова компенсація падіння напруги на опорі R_B , опір цього резистора може бути вибраний більшим, ніж у схемі рисунку а, і спад напруги $U_{RB} = I_{c0} R_B > U_{3B0}$.

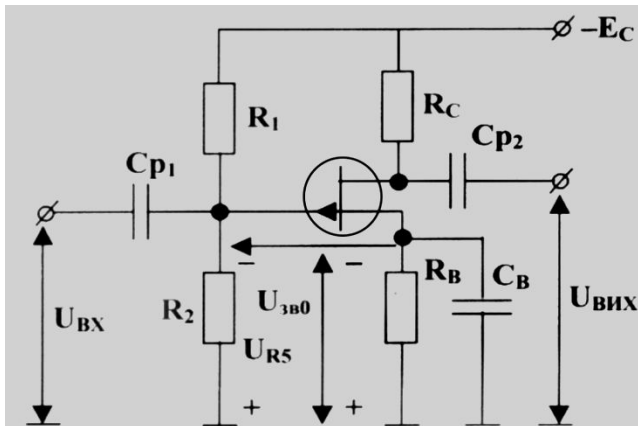
• У цьому випадку
$$R_B = U_{RB} / I_{c0}$$

• Для контура, створеного резисторами R_B , R_2 та ділянкою затвор-витік ПТКП (рис.), можна записати

•
$$U_{R2} + U_{3B0} - U_{RB} = 0.$$

• Звідки
$$U_{R2} = U_{RB} - U_{3B0} = 0$$

• Величину опору R_2 вибирають на основі вимог забезпечення заданого значення вхідного опору каскаду. Для створення на цьому резисторі напруги за формулою наведеною вище необхідно забезпечити проходження через розподільник R_1 , R_2 струму, що дорівнює
$$I_n = U_{R2} / R_2 = (U_{RB} - U_{3B0}) / R_2.$$



КАСКАД НА ПТ: РОЗРАХУНОК У СТАТИЦІ ТА ДИНАМІЦІ

- Опір резистора R_c визначають з рівняння

$$R_C + R_B = (E_C - U_{CB0}) / I_{C0}.$$

де U_{CB0} - напруга на стоці в режимі спокою.

- З урахуванням того, що $R_B = U_{RB} / I_{C0}$

остаточно знаходимо

$$R_C = (E_C - U_{CB0} - U_{RB}) / I_{C0}.$$

Опір резистора R_1 дорівнює

$$R_1 = (E_C - U_{R2}) / I_n.$$

- *Властивості підсилювача на ПТКП оцінюються такими параметрами динамічного режиму:*

- *динамічною крутизною*

$$S_d = \left. \frac{dI_c}{dU_{ЗБ}} \right|_{R_C=\text{const}; E_c=\text{const}}.$$

- *динамічним коефіцієнтом підсилення*

$$K = \left. \frac{dU_{RC}}{dU_{ЗБ}} \right|_{R_C=\text{const}; E_c=\text{const}} \quad K = \left. \frac{dU_{CB}}{dU_{ЗБ}} \right|_{R_C=\text{const}; E_c=\text{const}}$$

Ці параметри розраховують або аналітично за формулами:

$$S_d = \frac{S_{ПТ}}{1 + R_c / r_{iПТ}}, \quad K = \frac{\mu_{ПТ}}{1 + r_{iПТ} / R_c},$$

- де $S_{ПТ}$, $r_{iПТ}$, $\mu_{ПТ}$ - статичні диференціальні параметри ПТ (див. раніше), або за допомогою графоаналітичного способу.

КАСКАД НА ПТ: РОЗРАХУНОК У СТАТИЦІ ТА ДИНАМІЦІ

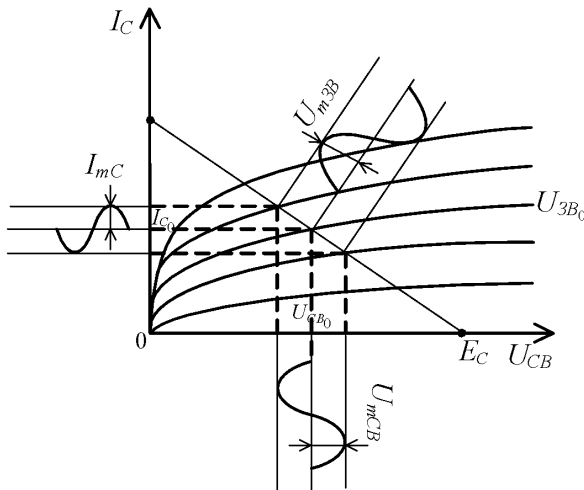
•Останній дуже подібний до графоаналітичного способу розрахунку параметрів режиму підсилення БТ і полягає в наступному. *На сім'ї стокових (вихідних) характеристик будують навантажувальну характеристику для змінного струму. Оскільки змінна складова струму I_C через резистор R_B не проходить, то рівняння навантажувальної характеристики набирає вигляду*

$$I_C = (E_C - U_{CB} / R_C).$$

•Перетин цієї прямої зі статичною вихідною характеристикою, знятою при вибраній напрузі спокою $U_{ЗВ0}$ (рис.), визначає положення початкової робочої точки, яка характеризується струмом спокою I_{C0} та напругою спокою U_{CB0} . Після визначення цієї точки на навантажувальній прямій за даною амплітудою вхідної напруги $U_{mЗВ}$ розраховують параметри режиму підсилення:

$$S_d = \frac{2I_{mC}}{2Um_3} = \frac{I''_C - I'_C}{2Um_3}, \quad K = \frac{U_{mCB}}{2Um_{ЗВ}} = \frac{U''_{CB} - U'_{CB}}{2Um_{ЗВ}}.$$

•Оскільки вхідний опір ПТКП великий, то вхідний опір підсилювального каскаду (рис.) визначається опором подільника напруги $R_1R_2/(R_1+R_2)$.

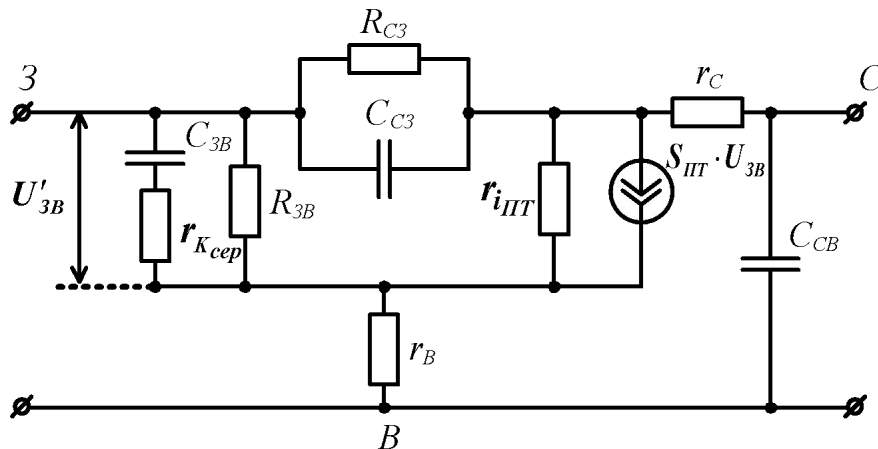


До розрахунку параметрів режиму підсилення каскаду на ПТКП

ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ПТ

Для аналізу поведінки польових транзисторів на різних частотах використовують *еквівалентну схему* рис. У цій схемі враховано, що підкладка в ПТКП з'єднується із затвором, а в МДН – транзисторах – з витоком. Елементи r_C та r_B - це опори ділянки НП, які знаходяться між омичними контактами стоку, витоку і затвора. Елемент r_{Kcep} - це середній розподілений опір каналу, через який заряджається і розряджається ємність між затвором і витоком C_{3B} . Елементи R_{C3} і R_{3B} - це опори ввімкнених у зворотному напрямі керувальних $p-n$ – переходів у ПТКП або опори між стоком і затвором, затвором і витоком у МДН - транзисторах. Джерело струму $S_{ПТ}$ відображає процес керування вихідним струмом ПТ за допомогою вхідної напруги U'_{3B} , $r_{iПТ}$ - внутрішній опір ПТ. Опори r_C та r_B у ПТКП становлять десятки Ом, у МДН - транзисторів – частки Ом. Опори R_{C3} і r_{Kcep} великі та для ПТКП становлять сотні кілоомів, а для МДН - транзисторів досягають значень Ом. Значення ємностей C_{3B} і C_{CB} становлять (3 - 20) пФ, а ємність C_{C3} не перевищує 10 пФ.

•**Частотні властивості ПТКП визначаються здебільшого ділянкою затвор - витік** (фрагмент схеми (рис.) з елементами C_{3B} , r_{Kcep} , R_{3B}). Вхідна змінна напруга U_{3B} розподіляється між ємністю C_{3B} і середнім опором каналу r_{Kcep} . Безпосередньою **керувальною напругою**, під дією якої змінюються товщина – $p-n$ переходу і ширина каналу, є напруга, прикладена до ємності C_{3B} .



Еквівалентна схема польового транзистора

ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ ПТ

• При збільшенні частоти реактивний опір ємності $C_{зв}$ зменшується, що приводить до перерозподілу напруги $U_{зв}$ на елементах $C_{зв}$ та $r_{Ксер}$ і до зменшення керувальної напруги $U_{Cзв}$. Отже, **при збільшенні частоти вхідної напруги підсилювальний ефект транзистора зменшується**. Частоту, на якій $r_{Ксер} = \frac{1}{C_{зв}\omega}$, називають **граничною частотою ПТКП** ω_3 (частотою затвора).

• Тобто
$$\omega_3 = \frac{1}{C_{зв}r_{Ксер}}.$$

З формули випливає, що **гранична частота ПТКП залежить від напруги зміщення $U_{зв0}$, оскільки від цієї напруги залежить товщина r - n -переходу, тобто $C_{зв}$ і $r_{Ксер}$**

• Крім швидкості перезарядження ємності $C_{зв}$ (тобто сталої часу кола затвора $\tau_3 = C_{зв}r_{Ксер} = 1/\omega_3$), на частотні властивості ПТКП впливає час прольоту носіїв заряду через канал. Якщо час прольоту виявиться сумірним з періодом вхідного сигналу, то зміна струму стоку не встигає слідкувати за зміною керувальної напруги на затворі, і динамічна крутизна ПТ зменшується. Але в реальних ПТКП довжина каналу дорівнює 5-10 мкм. Тому час прольоту виявляється значно меншим від сталої часу затвора τ_3 і його можна не враховувати.

• **Граничну частоту МДН - транзисторів визначають за формулою**

$$\omega_{зр} = \frac{S}{C_{зв}} \quad \text{або} \quad f_{зр} = \frac{S}{2\pi C_{зв}},$$

де S - крутизна характеристики приладу.

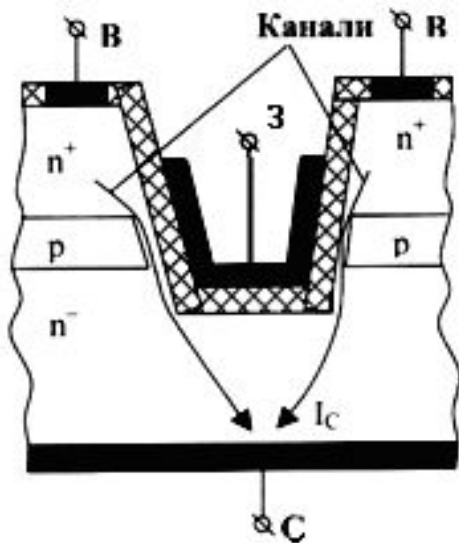
• Для МДН - транзистора, у якого $C_{зв} = 5$ пФ і $S = 5$ мА/В, гранична частота $f_{зр} = 160$ МГц.

ПОТУЖНІ ПТ

- **Потужні польові транзистори** в ключовому і підсилювальному режимах повинні забезпечувати **високий ККД**.
- У ключовому режимі треба намагатися, щоб **опір транзистора у відкритому стані був мінімальним**, тоді втрати потужності в приладі $P=I_C^2 r_{кан}$ також будуть мінімальними.
- У підсилювальному режимі великий опір каналу ПТ приводить до зменшення крутизни за рахунок перегріву, а також із причини виникнення негативного зворотного зв'язку через опір витоку r_B .
- Тому **головною вимогою до потужних ПТ є зниження опору каналу**. З цією метою у приладі використовують велику кількість паралельно з'єднаних каналів або створюють короткий канал завдяки переходу від традиційних горизонтальних (планарних) структур до вертикальних, у яких напрям струму перпендикулярний до поверхні струму.
- Необхідно пропускати великі струми і розсіювати значні потужності, що робить необхідним збільшення площі структури потужних ПТ; це викликає збільшення паразитних ємностей і, як наслідок, зменшення швидкодії ПТ. Тому створення потужного і разом з тим швидкодіючого (високочастотного) ПТ – це важлива проблема напівпровідникової електроніки.

ПОТУЖНІ МДН – ТРАНЗИСТОРИ

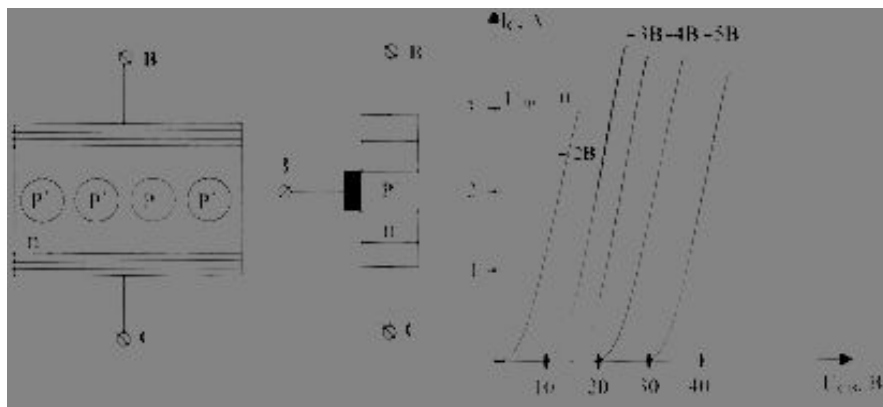
- Такі транзистори мають короткий канал, який забезпечує *низький опір відкритого транзистора у ключовому режимі* *і високу крутизну у підсилювальному режимі* (рис.).
- У цих приладах багатоканальність поєднується з вертикальністю структури. V - подібні затвори таких ПТ сприяють збільшенню багатоканальності приладу, оскільки кожний затвор “обслуговує” два виточки і два канали.
- Основні особливості приладу (рис.) – це *зменшення довжини каналу і використання високоомної стокової - області, через яку відбувається дрейф носіїв заряду струму стоку*. Просте укорочення каналу призвело б до зниження пробивної напруги між стоком і затвором. Уведення додаткової дрейфової області дозволяє зберегти значення пробивної напруги транзистора.



Фрагмент структури багатоканального потужного МДН – транзистора

ТРАНЗИСТОРИ ЗІ СТАТИЧНОЮ ІНДУКЦІЄЮ

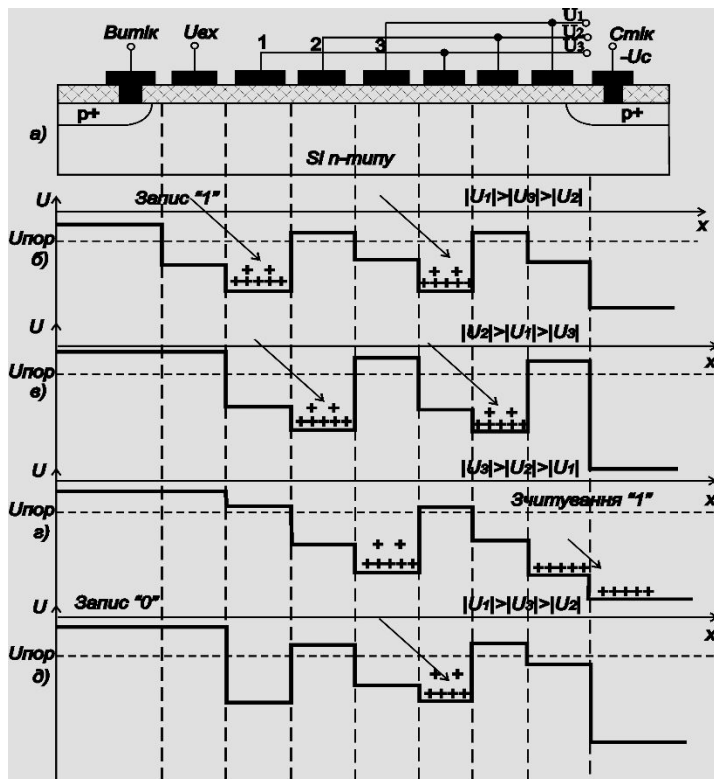
- Це різновид потужних ПТКП зі структурою, показаною на рисунку.
- *Вихідні характеристики ПТКП зі статичною індукцією не мають пологих ділянок, тобто вихідний опір приладів досить малий.*
- *Транзистори мають дуже короткий канал і малу відстань від витоку до затвора (приблизно 10 мкм). Підвищення їх потужності забезпечується багатоканальною будовою і малими розмірами областей затвора, циліндричних за формою (діаметр приблизно дорівнює 25 мкм).*
- При збільшенні напруги U_{CB} наростає струм стоку, обмеження якого не відбувається внаслідок того, що канал (область між затворами) короткий, затвор малий, і збільшення U_{CB} приводить до зменшення результуючої напруги на затворі відносно витоку. Збільшення негативної напруги на затворі приводить до необхідності збільшення напруги U_{CB} для компенсації запірної дії $U_{ЗВ}$, і тому вихідні характеристики при збільшенні $U_{ЗВ}$ зсуваються вправо.



Структура ПТКП зі статичною індукцією (а); вигляд структури збоку (б); вихідні характеристики (в)

ПОЛЬОВІ ПРИЛАДИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

- **Польовий прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ)** – це напівпровідниковий прилад, у якому можуть здійснюватися накопичення неосновних носіїв заряду під електродами МДН-структур (під електродами затворів) і переміщення цих носіїв від одного електрода до іншого.
- Принцип дії ПЗЗ ґрунтується на зберіганні заряду неосновних носіїв у потенціальних ямах, що утворюються біля поверхні НП під дією зовнішнього поля, і на переміщенні цього заряду вздовж поверхні за рахунок зсуву потенціальних ям. **ПЗЗ - це МДН-транзистор, що має кілька затворів.**



Структура ПЗЗ з тритактним живленням затворів секції перенесення (а) і пояснення принципу його дії (б, в, г, д): б) запис логічної одиниці за допомогою інжекції пакета дірок до потенціальної ями під першим затвором секції перенесення; в) перенесення пакета дірок до наступних потенціальних ям при зміні потенціалів на електродах затвора; г) зчитування логічної одиниці на виході приладу під час екстракції дірок з потенціальної ями в p^+ - область стоку; д) запис логічного нуля за відсутності негативного потенціалу на електроді затвора

ПОЛЬОВІ ПРИЛАДИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Розглянемо ПЗЗ, який виконує функцію *триактного регістра зсуву* (рис. а). Цей прилад має три секції. Вхідна секція складається з p^+ - області витоку і вхідного затвора, що відіграє роль ключа для керування рухом дірок з дифузійної p^+ - області витоку до першої потенціальної ями. Друга секція (секція перенесення) має кілька затворів, які керують потенціалом приповерхневого шару НП. Ці затвори з'єднані між собою через два. *Напруга на затворах секції має форму імпульсів різної амплітуди, що циклічно змінюють один одного* (рис. б-д). *При такій зміні напруги на затворах потенціальні ями переміщуються до виходу приладу, захоплюючи із собою пакети носіїв заряду – дірок*. Третя секція ПЗЗ – вихідна секція – являє собою $p-n$ - перехід стоку, ввімкнений у зворотному напрямі, напруга на якому буде змінюватися при надходженні пакета носіїв заряду – дірок (рис. г).

- Нехай під час першого такту роботи на вхідний затвор подається напруга $U_{\text{вх}}$, достатня для утворення провідного каналу під вхідним затвором ($U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}$). Якщо при цьому на першому затворі секції перенесення існує досить велика негативна напруга, тобто під цим затвором створена потенціальна яма для дірок, то дірки будуть виходити з витоку, проходити через канал під вхідним затвором і накопичуватися у потенціальній ямі під першим затвором.
- На початку наступного такту дія напруги на вхідному затворі $U_{\text{вх}}$ припиняється. Внаслідок цього зникає провідний канал під вхідним затвором. Отже, відбувається запис інформації, наприклад логічної одиниці, оскільки під першим затвором секції перенесення залишився пакет дірок (для запису логічного нуля під час першого такту роботи ПЗЗ на вхідний затвор не повинна подаватися негативна напруга).
- Після зміни напруг на затворах секції перенесення найбільша негативна напруга діятиме на другому затворі секції перенесення, і тому пакет дірок пересунеться до потенціальної ями під другим затвором (рис. в). Під час наступних тактів зміни напруги на затворах секції перенесення відбувається подальше пересування пакета дірок у напрямі вихідної секції (рис. г, д).
- Якщо у потенціальних ямах, що підходять до $p-n$ – переходу стоку, немає дірок, то струм стоку не змінюватиметься. Лише у тому разі, коли до стоку підійде потенціальна яма, яка містить у собі дірки, у колі стоку діятиме імпульс струму, оскільки дірки з потенціальної ями екстрагуюватимуть до області стоку через $p-n$ - перехід у зворотному ввімкненні.

ПОЛЬОВІ ПРИЛАДИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

•*До основних параметрів польових ПЗЗ належать такі:*

1. *Нижня гранична тактова частота*, яка зв'язана з процесом накопичення дірок у пустих потенціальних ямах за рахунок термогенерації впродовж десятків мілісекунд. Це призводить до спотворення рівня логічного нуля, записаного у потенціальній ямі. Для запобігання цьому *нижня гранична частота вибирається у діапазоні одиниць – десятків кілогерц.*

2. *Верхня гранична тактова частота*, що визначається часом перетікання заряду з однієї потенціальної ями до іншої. Досягає *десятків мегагерц.*

3. *Ефективність передачі заряду* $\eta = (Q_1 - Q_0)_{i+1} / (Q_1 - Q_0)_i$

що показує, *яка частка заряду переноситься з однієї потенціальної ями i до іншої $i+1$.* Для якісних ПЗЗ коефіцієнт η наближається до одиниці.

•*Але втрата заряду i , отже, інформації неминуче трапляється за рахунок захоплення дірок поверхневими енергетичними рівнями «пасток», тобто внаслідок дії поверхневої рекомбінації. Тому достатня величина вихідного сигналу може бути одержана при передачі заряду на невелику кількість тактів (не більше сотні) і впродовж малого часу. З метою усунення цього недоліку використовують схеми регенерації, що реалізуються за допомогою підсилювачів. Зчитуваний з ПЗЗ сигнал підсилюється, формуються його рівні («1» або «0»), а потім здійснюються перезапис цього сигналу в ПЗЗ. Для тривалого зберігання інформації ланцюжок ПЗЗ замикають у кільце. Регенерація інформаційного заряду, як правило, супроводжується виводом інформації, тобто реалізується ПЗЗ з неруйнівним зчитуванням інформації.*

•*Напівпровідникові польові ПЗЗ застосовуються у запам'ятовувальних пристроях ЕОМ, у пристроях перетворення оптичного зображення в електричний сигнал (у телебаченні), в лініях задержки аналогових сигналів тощо.*

ТИРИСТОРИ

Будова, принцип дії та режими роботи тиристора

- **Тиристором називають електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з трьома або більше р-n- переходами, ВАХ якого має ділянку негативного диференціального опору і який використовують для перемикання.** Назва тиристор походить від двох слів: thyra (гр.) – двері та (re) sistor (англ.) – опір. Залежно від кількості зовнішніх виводів **розрізняють двохелектродний прилад – диністор, трьохелектродний – триністор і чотирьохелектродний – біністор.** У двох останніх, крім **анода і катода**, є ще **вхідні електроди** (відповідно один у триністора і два у біністора).
- **Система позначень тиристорів (крім силових) складається з 6 елементів.**
- **Перший елемент** – буква або цифра, що означає матеріал виготовлення.
- **Другий елемент** – буква, що визначає різновид тиристора: Н – діодні тиристори (диністори), У – тріодні тиристори (триністори).
- **Третій елемент** – цифра, що визначає призначення тиристора згідно з таблицею.
- **Четвертий, п'ятий і шостий** елементи аналогічні до відповідних елементів у позначеннях діодів і транзисторів.
- Умовні позначення тиристорів на схемах наведено на рис. З точки зору застосування **тиристор – це напівпровідниковий ключ, тобто прилад, основне призначення якого полягає в замиканні та розмиканні кола навантаження під дією зовнішніх сигналів.**
- Подібно до транзисторних ключів **тиристор має два статичні стани – закритий, з високим внутрішнім опором, і відкритий, з малим опором. У кожному стані тиристор може перебувати як завгодно довго. Перехід від одного стану до іншого відбувається швидко (лавиноподібно) під дією короткочасного зовнішнього сигналу.**



Умовні позначення тиристорів на електронних схемах:

- а) **диністор**;
- б) **триністор** з керуванням по катоду;
- в) **триністор** з керуванням по аноду;
- г) **симетричний тиристор (симістор)**

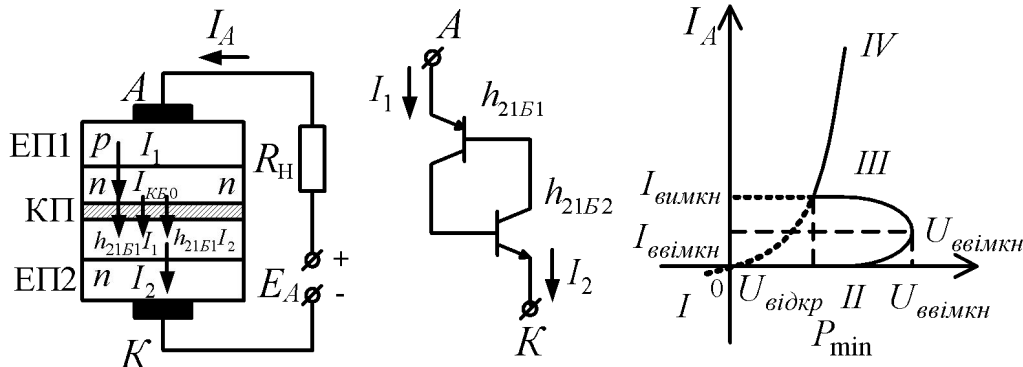
ПОЗНАЧЕННЯ ТИРИСТОРІВ

Потужність	Диністор	Триністор		
		незапідний	запідний	симетричний
Малої потужності, $I_A \leq 0,3 \text{ A}$	1	1	3	5
Середньої потужності, $0,3 \text{ A} \leq I_A \leq 10 \text{ A}$	2	2	4	6

ДИНІСТОРНИЙ РЕЖИМ

Структура диністора показана на рисунку а. На рисунку диністор увімкнено до кола разом із джерелом напруги E_A і навантаженням R_H . Будемо вважати, що верхня p -область чотиришарової структури диністора з'єднана з електродом, що називається **анодом**, а нижня n -область з'єднана з **катодом**. Области тиристора називатимемо (зверху донизу) **p -емітер**, **n -база**, **p -база**, **n -емітер**.

- При прикладенні зовнішньої напруги мінусом до анода і плюсом до катода емітерні переходи ЕП1 та ЕП2 вмикаються у **зворотному напрямі**, і через прилад протікає малий зворотний струм двох послідовно з'єднаних – переходів (ділянка I на ВАХ рис. в).
- Якщо змінити полярність джерела напруги, то **переходи ЕП1 та ЕП2 вмикаються у прямому напрямі**, а **середній, колекторний, перехід КП – у зворотному**. Через емітерні переходи здійснюється інжекція дірок (через ЕП1) та електронів (через ЕП2) у відповідні бази. Майже вся зовнішня напруга спадає на великому опорі КП. Збільшення цієї напруги приводить до подальшого зменшення потенціальних бар'єрів ЕП1 та ЕП2 і збільшення інжекції через переходи. Дірки, інжектуючи через ЕП1, дифундують через n -базу, екстрагуються прискорювальним полем КП до області p -бази і накопичуються там, тому що подальша їх дифузія затримується гальмівним полем ЕП2. Аналогічне відбувається і з електронами, які інжектують через ЕП2 до p -бази. Таким чином, у p -базі накопичується надлишковий позитивний заряд, а в n -базі – надлишковий негативний заряд.



Структура (а), транзисторна схема заміщення (б) та ВАХ тиристора у диністорному режимі (в)

ДИНІСТОРНИЙ РЕЖИМ

- Процеси у тиристорі свідчать про появу внутрішнього позитивного зворотного зв'язку. Механізм його дії полягає у такому. Збільшення інжекції дірок до n -бази через ЕП1 приводить до накопичення цих дірок у p -базі. Зростання позитивного заряду p -бази приводить до подальшого прямого зміщення ЕП2 і збільшення інжекції електронів через нього.
- Це явище, у свою чергу, сприяє зростанню негативного заряду n -бази і додатковому прямому зміщенню ЕП1. Внаслідок цього інжекція дірок з p -емітера через ЕП1 ще більше зростає і т.д.
- При прямих напругах $U_A < U_{\text{ввімкн}}$ тиристор ще закритий, бо його опір – це фактично опір КП у зворотному вмиканні. Деяке зростання струму анода I_A при збільшенні анодної напруги U_A на ділянці II пояснюється збільшенням інжекції через переходи ЕП1 та ЕП2 при збільшенні на них прямих напруг, а також зменшенням потенціального бар'єра КП внаслідок накопичення надлишкового заряду в базах.
- При анодній напрузі $U_A = U_{\text{ввімкн}}$ різниця потенціалів між p - та n - базою за рахунок попереднього накопичення зарядів дорівнює величині зовнішньої напруги на КП. На КП у цьому разі діє нульова результуюча напруга, і **перехід відкривається**. **Відбуваються різке зменшення внутрішнього опору тиристора і зростання анодного струму, що супроводжується зменшенням прямої напруги на приладі**. Це падіння напруги дорівнює сумі падінь напруг на трьох p - n – переходах, увімкнених у прямому напрямі (приблизно 0,7 В), падіння напруги на n - базі (0,12 В) і падінь напруг на емітерах (приблизно 0,2 – 0,3 В). Таким чином, сумарне падіння напруги на ввімкненому диністорі становить приблизно 1 В.
- Отже, **процес відкривання (ввімкнення) тиристора полягає в різкому зменшенні опору за рахунок прямого ввімкнення КП, збільшенні струму через прилад одночасно зі зменшенням спаду напруги**. Це приводить до формування на ВАХ диністора ділянки з **негативним диференціальним опором** (ділянка III на рисунку в). Після закінчення процесу ввімкнення приладу робоча точка на ВАХ переходить на ділянку IV (рис. в).

ДИНІСТОРНИЙ РЕЖИМ

•Щоб унаслідок багаторазового зростання струму I_A не відбулося руйнування кристалічної структури диністора, до кола послідовно з приладом і джерелом живлення вмикають навантаження. І тоді струм у колі з відкритим тиристором дорівнює $I_A = E_A / R_H$.

•Диністор у відкритому стані (ділянка IV на ВАХ) перебуває до того часу, поки струм, що протікає через нього, підтримує у базах надлишкові заряди, які, у свою чергу, забезпечують відкритий стан КП. Зниження струму I_A до величин $I_{\text{вимкн}}$ приведе до того, що процес рекомбінації у базах почне відбуватися швидше, ніж процес накопичення, і КП знову ввімкнеться у зворотному напрямі.

•Диністор може бути поданим у вигляді системи двох біполярних транзисторів $p-n-p$ – та $n-p-n$ – типів (рис. б). На ділянці II ВАХ диністора (рис. в) обидва транзистори перебувають у активному режимі. Збільшення зовнішньої напруги приводить до зростання емітерного струму I_1 $p-n-p$ – транзистора, збільшення його колекторного струму, тобто зменшення його внутрішнього опору. Внаслідок цього зростає позитивний потенціал бази $n-p-n$ – транзистора, що також збільшує емітерний і колекторний струми останнього і, отже, зменшує внутрішній опір $n-p-n$ – транзистора. Тому на базі $p-n-p$ – транзистора зростає негативний потенціал, і транзистор ще більше відкривається. У двотранзисторній схемі рис. б, яка є *схемою заміщення реального тиристора*, діє, таким чином, позитивний зворотний зв'язок. При деякій зовнішній напрузі ($U_A = U_{\text{вимкн}}$) обидва транзистори переходять у режим насичення, і опір схеми значно знижується.

•Позначивши коефіцієнт передачі струмів цих транзисторів через h_{21B1} та h_{21B2} , одержимо, що через КП у стані зворотного ввімкнення протікає струм

$$I_2 = h_{21B1} I_1 + h_{21B2} I_3 + I_{КБ0}$$

де I_1, I_2, I_3 – струми ЕП₁, КП та ЕП₂ відповідно.

Оскільки всі переходи тиристора з'єднані послідовно, то $I_1 = I_2 = I_3 = I_A$. Тоді

$$I_A = \frac{I_{КБ0}}{1 - (h_{21B1} + h_{21B2})}$$

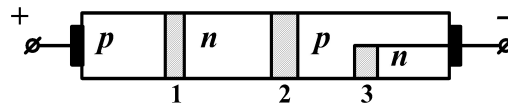
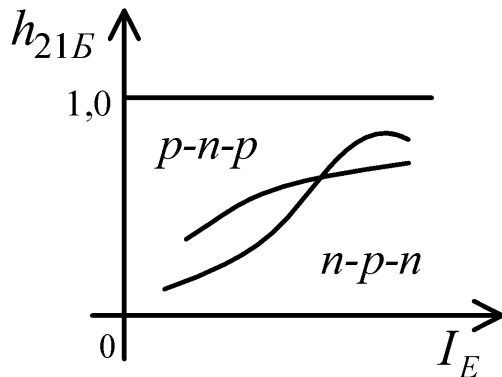
ДИНІСТОРНИЙ РЕЖИМ

Значення коефіцієнтів h_{21B1} і h_{21B2} , як бачимо, залежать від струмів емітера I_1 та I_2 (рис.).

Поки $h_{21B1} + h_{21B2} < 1$, диністор перебуває у **вимкненому стані** (ділянка II на ВАХ). При $U_A = U_{\text{ввімкн}}$ сума $h_{21B1} + h_{21B2} = 1$, і починається за формулою лавиноподібний процес збільшення струму I_A .

• Лавинний, стрибкоподібний процес ввімкнення тиристора спричиняється дією позитивного зворотного зв'язку. **Величина напруги $U_{\text{ввімкн}}$ буде тим більша, чим меншими будуть початкові значення коефіцієнтів передач струмів емітера h_{21B1} та h_{21B2} . Для зменшення початкових значень цих коефіцієнтів ширину однієї з баз роблять значно більшою від дифузійної довжини носіїв заряду. Крім того, щоб забезпечити досить велике значення $U_{\text{ввімкн}}$, один з емітерних переходів шунтується розподіленим опором бази** (рис.).

• У цьому випадку зменшення коефіцієнта передачі струму забезпечується таким чином. При малих напругах на тиристорі майже весь струм протікає через шунтуючий опір бази, обминаючи правий p - n – перехід. У відкритому стані диністора опір переходу 3 малий, і струм проходить через цей перехід, обминаючи шунтуючий опір бази. При цьому величина h_{21B2} різко зростає. **Наявність більш сильної залежності коефіцієнта передачі від струму анода приводить до підвищення стабільності параметрів ВАХ диністора.**

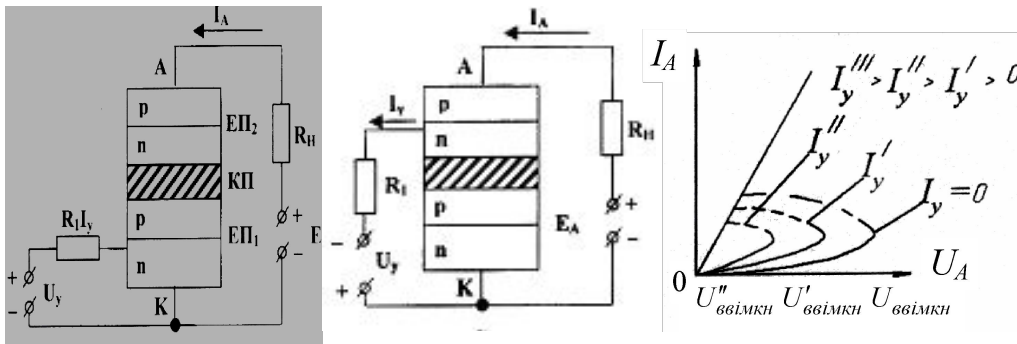


Залежності $h_{21B1} = f(I_E)$, $h_{21B2} = f(I_E)$

Диністор із зашунтованим емітерним переходом

ТРИНІСТОРНИЙ РЕЖИМ

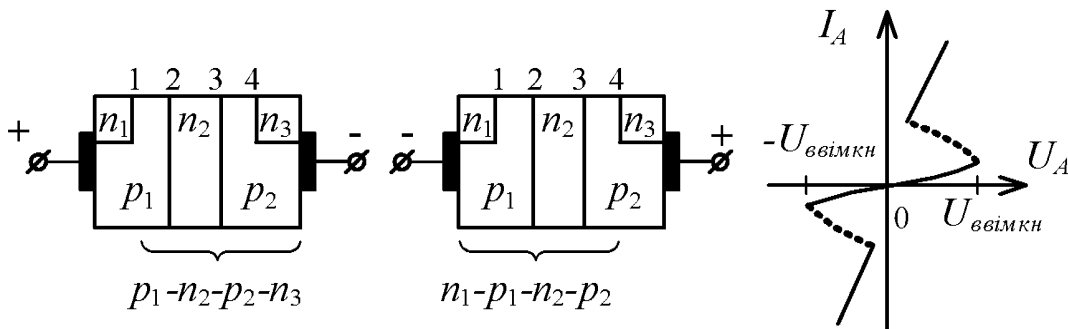
- **Триністор** відрізняється від диністора наявністю третього виводу, з'єданого з базовою областю. Це дозволяє керувати величиною напруги ввімкнення $U_{\text{ввімкн}}$ змінюючи струм у колі керувального електрода. **Керувальний електрод може з'єднуватися з будь-якою базою тиристора** (рис. а, б).
- Збільшуючи струм керування I_K , можна збільшити коефіцієнт передачі струму $h_{21Б2}$ відповідного емітера, це приводить до того, що рівність $h_{21Б1} + h_{21Б2} = 1$ виконуватиметься при меншій анодній напрузі, і **ввімкнення тиристора відбуватиметься при меншому значенні $U_{\text{ввімкн}}$** (рис. в). Фізично це означає, що **накопичення надлишкових зарядів у базах структури відбуватиметься швидше, ніж у випадку диністора, тому що джерело напруги керування у колі будь-якої з баз прискорює інжекцію через відповідний ЕП.**
- Струм і напруга кола керування невеликі, струм у анодному колі може досягати одиниць амперів (у тиристорах середньої потужності) або десятків – сотень амперів (у силових тиристорах) при анодних напругах від десятків – сотень вольтів до тисяч вольтів. Тому **триністори – це своєрідні підсилювачі потужності з коефіцієнтом підсилення 10^4 - 10^5 .**
- **Триністори серед інших тиристорних структур мають найбільше практичне застосування в електроніці.** Для більш зручного керування тиристором керувальний електрод з'єднують з базою, що має меншу ширину, оскільки коефіцієнтом передачі струму емітера саме такої транзисторної структури (n - p - n – на рис. а і p - n - p – на рис. б) легше керувати, ніж коефіцієнтом передачі транзистора з товстою базою.



Структура триністора: а) з керуванням по катоду; б) з керуванням по аноду; в) сім'я ВАХ триністора

СИМІСТОРИ

- **Симетричний тиристор, або симістор**, - це тиристор, який має практично однакові ВАХ при різних полярностях прикладеної напруги.
- Симістор являє собою багатошарову структуру n - p - n - p - n типу, що складається з п'яти напівпровідникових областей, типи провідності яких чергуються і утворюють чотири p - n переходи (рис.).
- Якщо до такого тиристора прикласти напругу плюсом до області n_1 , а мінусом – до області n_3 (рис. а), то перехід 1 ввімкнеться у зворотному напрямі, і струм, що протікає через нього, буде дуже малим. Робочою частиною у такому режимі буде p_1 - n_2 - p_2 - n_3 – структура, в якій проходять процеси, характерні для диністора.
- Якщо зовнішню напругу прикласти плюсом до області n_3 , а мінусом – до області n_1 , то в зворотному напрямі ввімкнеться перехід 4, і робочою частиною симістора буде диністор структури n_1 - p_1 - n_2 - p_2 (рис. б).
- Таким чином, **симістор може бути поданий у вигляді двох тиристорів, увімкнених паралельно і назустріч один одному**.
- ВАХ симістора показана на рис. в.



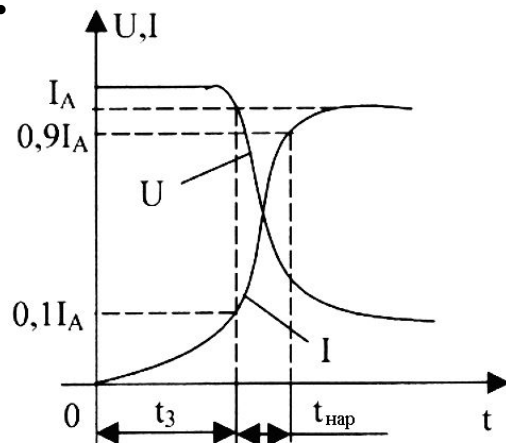
Структура (а, б) та ВАХ (в) симетричного тиристора

СПОСОБИ КОМУТАЦІЇ ТИРИСТОРІВ

- Крім описаного раніше способу ввімкнення тиристора шляхом повільного збільшення анодної напруги до величини $U_{\text{ввімкн}}$, існують і інші способи.

Увімкнення за допомогою струму керування

- Цей спосіб робить можливим ввімкнення тиристора у триністорному режимі у випадку, коли на аноді приладу є деяка напруга ($U_A < U_{\text{ввімкн}}$). Тоді, збільшуючи струм I_K , можна ввімкнути тиристор. **Найбільш поширеним способом керування є імпульсний спосіб.** При цьому процес накопичення нерівноважних носіїв відбувається немиттєво, і тому для ввімкнення тиристора необхідно, щоб імпульс струму керування мав певну тривалість і амплітуду.
- Розглянемо випадок керування по катоду. Час перемикавання тиристора можна розбити на два інтервали, що відповідають різним законам зміни струму через тиристор (рис.). Час затримки t_3 визначається часом дифузії інжекттованих з n -емітера електронів через p -базу до КП. Струм через КП і, отже, через тиристор зростатиме відчутно лише тоді, коли інжекттовані електрони досягнуть КП. На діаграмі рис. – це проміжок часу, за який струм збільшиться до 0,1 від усталеного значення (або час, за який анодна напруга на тиристорі знизиться до 0,9 від свого початкового значення).



Перехідні процеси струму і напруги при ввімкненні тиристора

СПОСОБИ КОМУТАЦІЇ ТИРИСТОРІВ

Час наростання $t_{нар}$ зв'язаний з інерційністю процесу накопичення нерівноважних носіїв заряду в базах тиристора. За цей час струм анода різко зростає до величини $0,9 I_A$, а напруга на аноді зменшується від $0,9 U_A$ до $0,1 U_A$. Цей інтервал часу відповідає перебуванню робочої точки на ділянці негативного диференціального опору (ділянка III на ВАХ рис. в), і тому процес перемикавання має регенеративний, лавиноподібний, нестійкий характер. Цей процес обов'язково закінчиться зміною стану приладу, навіть якщо в цей час припиниться дія імпульсу керування. Саме тому **тривалість імпульсу керування може вибиратись у межах $t_3 < \tau_{IK} < t_3 + t_{нар}$** . Закінчення перемикавання тиристора відповідає моменту, коли знак напруги на КП зміниться на протилежний. Реальна тривалість імпульсу керування досягає 15-20 мкс. Після закінчення імпульсу тиристор перебуватиме у відкритому стані і надалі, якщо $U_A > U_{відкр\min}$ або $I_A > I_{вимкн}$ (див. ВАХ рис. в), тобто якщо робоча точка буде на IV ділянці ВАХ.

Процес відкривання тиристора за допомогою імпульсу струму керування має ще й інші особливості. **Спочатку відкривання КП відбувається у вузькому каналі біля керувального електрода**, оскільки більша частина амплітуди імпульсу керування спадає на розподіленому опорі бази, і тому інжекція через ЕП збільшується не на всій його площі, а на ділянці біля керувального електрода. Виникає струмопровідний "шнур", який може призвести до локального перегріву тиристорної структури. Лише потім за рахунок дифузії носіїв канал розширюється на всю площу переходу.

Увімкнення тиристора за допомогою імпульсу анодної напруги

• При імпульсному керуванні по аноду також спостерігається явище, коли напруга увімкнення зменшується порівняно з напругою увімкнення у неперервному режимі. **Тиристор вмикатиметься за допомогою імпульсу анодної напруги, амплітуда якого менша за величину $U_{вимкн}$ у режимі, коли напруга на аноді тиристора зростає повільно.** Це явище зумовлене дією бар'єрної ємності КП, струм через яку під час перезаряду дорівнює

$$I_C = C_K \frac{dU_A}{dt}$$

і буде тим більшим, чим більша швидкість наростання анодної напруги на тиристорі (ефект $\frac{dU_A}{dt}$). Цей струм, протікаючи через емітерні переходи приладу, викликає збільшення коефіцієнтів передачі h_{21B1} та h_{21B2} , і тоді сума $h_{21B1} + h_{21B2}$ дорівнює одиниці при меншій напрузі. Інакше кажучи, дія ємнісного струму КП I_C аналогічна до дії струму керування у триністорі.

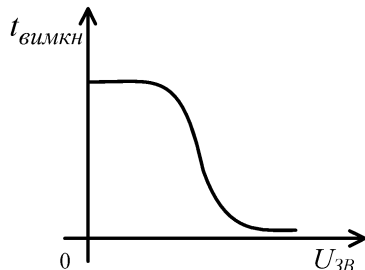
ВИМКНЕННЯ ТИРИСТОРІВ

Вимкнення тиристора шляхом розриву анодного кола

- Тиристор переходить до вимкненого стану тільки після розсмоктування нерівноважних носіїв заряду в базах. Якщо перед закінченням процесу вимкнення знову до тиристора прикласти анодну напругу, прилад опиниться у ввімкненому стані. Тому, оскільки процес розсмоктування носіїв відбувається немиттєво, **для вимкнення тиристора потрібен деякий час.**
- При вимкненні тиристора шляхом розриву анодного кола розсмоктування відбувається тільки внаслідок рекомбінації, і тому час вимкнення тиристора великий і залежить від тривалості життя носіїв заряду.

Вимкнення за рахунок зміни полярності анодної напруги

- Очікуваний вигреш часу при вимкненні тиристора цим способом відбудеться лише при великих зворотних напругах (рис.).
- Це зумовлено тим, що для прискорення процесу розсмоктування носіїв у базах треба забезпечити їх ефективну екстракцію через емітерні переходи. Для цього треба ввімкнути ЕП1 та ЕП2 у зворотному напрямі й значно підвищити їх потенціальні бар'єри. Зробити це одразу, в момент подачі на анод зворотної напруги, неможливо, тому що, поки носії у базах не розсмоктувалися, негативний заряд у n -базі та позитивний надлишковий заряд у p -базі підтримуватимуть емітерні переходи у відкритому стані. При помірних зворотних напругах практично відбувається підвищення потенціальних бар'єрів ЕП1 та ЕП2. Крім того, перезаряд бар'єрної ємності КП також заважає швидкій зміні стану тиристора. Саме тому, як правило, тиристор вимикають шляхом подачі великої зворотної напруги на анод.

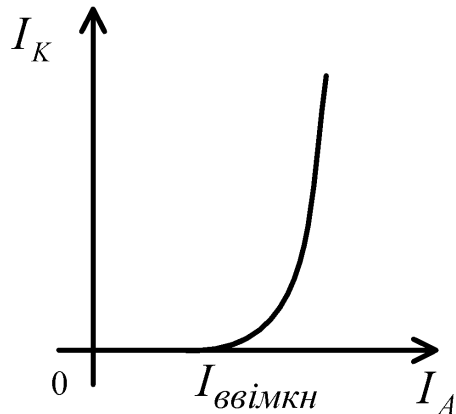


Залежність часу вимкнення тиристора від величини зворотної напруги

ВИМКНЕННЯ ТИРИСТОРІВ

Вимкнення за допомогою подачі напруги на керувальний електрод (за допомогою струму керування)

- Для вимкнення тиристора необхідно відвести нерівноважні носії заряду з бази, з'єднаної з керувальним електродом. Анодний струм, що протікає через ще відкритий тиристор, постійно поповнює кількість нерівноважних носіїв заряду в базах. Тому значення струму керування (викликаного напругою на керувальному електроді зворотної полярності), необхідне для вимкнення тиристора, залежить від значення анодного струму через тиристор (рис.).



Залежність зворотного струму керування, необхідного для вимкнення тиристора, від прямого анодного струму

БТЗ ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ

- У другій половині 80-х років з'явилася ідея створення *комбінованого силового біполярного транзистора з МОН - керуванням на вході*, названого в закордонних публікаціях IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), тобто БТІЗ - *біполярний транзистор з ізолюваним затвором*. Прообразом БТІЗ є схема складеного транзистора на комплементарних біполярних транзисторах – схема Шиклаї (рис.1). Тип провідності конструкції (рис. 1) у цілому визначається типом провідності VT1.
- Структурне ввімкнення транзистора у такому складанні і умовне його позначення, показані на рис. 2 а та 2 б, відповідно.

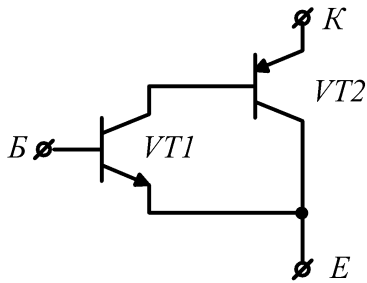
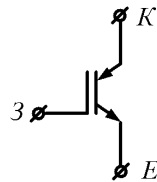
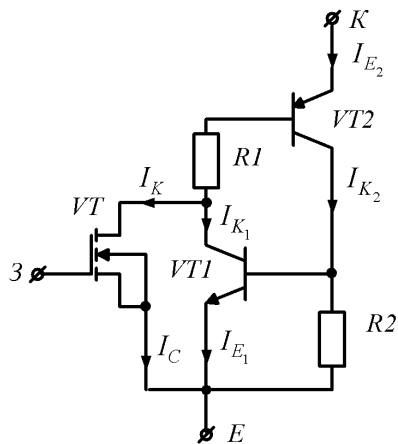


Схема Шиклаї



Транзистор БТІЗ: а) структурна схема, б) умовне позначення

БТЗ ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ

- *Транзистори БТІЗ були виготовлені закордонними фірмами у 1992 році. БТІЗ - транзистор являє собою р-п-р- структуру, керовану від низьковольтного МОН транзистора з індукованим каналом.* Отримана структура із транзисторів $VT1$ і $VT2$ має внутрішній позитивний зворотний зв'язок, оскільки струм колектора $VT2$ впливає на струм бази $VT1$ і навпаки. Коефіцієнти передачі струму емітера транзисторів $VT1$ і $VT2$ відповідно рівні β_1 і β_2 .

$$I_{K1} = I_{E1} \beta_1, \quad I_{K2} = I_{E2} \beta_2, \quad I_E = I_{K1} + I_{K2} + I_C.$$

- Таким чином, струм стоку польового транзистора

$$I_C = I_E (1 - \beta_1 - \beta_2).$$

- При $\beta_1 + \beta_2 \sim 1$ еквівалентна крутизна БТІЗ значно збільшується. Коефіцієнти β_1 і β_2 регулюються резисторами R_1 і R_2 на стадії виготовлення транзистора. На сьогоднішній день поки ще немає відомостей про транзистори БТІЗ $n-p-n$ – типу провідності.
- Важливим позитивом БТІЗ (IGBT) є *значне зниження послідовного опору силового ланцюга в відкритому стані, що приводить до зниження теплових втрат на замкнутому ключі. Перевантажувати IGBT транзистор по напрузі не допускається, але по струму він витримує 7-10 - кратне короточасне навантаження.* Оскільки струм стоку низьковольтного МОН транзистора становить лише невелику частину струму навантаження (у вихідного біполярного транзистора $I_H = I_3 = I_B + I_K$), то розміри його порівняно невеликі, і він має набагато менші відповідні ємності затвора, ніж МОН ПТ.

БТЗ ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ

- Пробивна вхідна напруга БТІЗ теоретично становить близько 80 В, але для забезпечення надійності роботи в довідкових даних практично всіх фірм виробників БТІЗ зазначене значення, що дорівнює 20 В. *При роботі із транзисторами необхідно стежити, щоб напруга «затвор-емітер» не перевищувала ± 20 В.*
- Ввімкнення транзистора БТІЗ (рис. а) виконується таким чином. Поки напруга «затвор-емітер» дорівнює нулю, транзистор закритий. Час початку відмикання транзистора збігається з моментом досягнення напругою на затворі порогового рівня. Напруга на затворі БТІЗ, при якому вхідний МОН - транзистор і вихідний біполярний починають відмикатися, становить від 3,5 до 6,0 В, і гарантована напруга, при якій транзистор повністю відкритий, тобто може пропускати максимально допустимий струм через колектор-емітерний перехід, становить від 8 В до граничного значення 20 В.
- У силу дії внутрішнього позитивного зворотного зв'язку, транзистор різко, подібно компаратору, відкривається. Процес закривання транзистора протікає не так швидко, як відмикання. Після подачі запираючого імпульсу на затвор транзистор закривається не відразу, а з деякою затримкою, яка визначається часом «розсмоктування» неосновних носіїв у базі *p-n-p* – транзистора.
- **Максимальний струм, який можуть комутувати сучасні БТІЗ, 7-100 А, а допустимий імпульсний струм, як правило, в 2,5-3 рази перевищує максимальний.** Для більших потужностей випускають модулі, які складаються з декількох транзисторів. Граничні струми таких модулів до 1000 А. Пробивна напруга БТІЗ – 400-2500 В. Основні параметри деяких БТІЗ подані в табл. 1, модулів - у табл. 2, у яких взяті такі позначення:

U_{KE} – напруга «колектор-емітер»;

U_{KEN} – напруги «колектор-емітер» відкритого транзистора;

I_K - постійний струм колектора;

P - максимальна розсіювана потужність.

БТЗ ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ

Основні параметри деяких БТІЗ

Тип елемента	U_{KE} , В	U_{KEH} , В	I_K , А при $T=25\text{ }^\circ\text{C}$	I_K , А при $T=100\text{ }^\circ\text{C}$	P , Вт
IRG4BC30FD	600	1,6	31	17	100
IRGBC30MD2	600	3,9	26	16	100
IRG4PC30FD	600	1,6	31	17	100

I_K

Напруга «колектор-емітер» відкритого транзистора 1,5-4 В, залежно від типу, струму і граничної напруги БТІЗ, в однакових режимах. Для різних типів приладів напруга на переході відкритого транзистора тим вища, чим вищі пробивна напруга і швидкість перемикання.

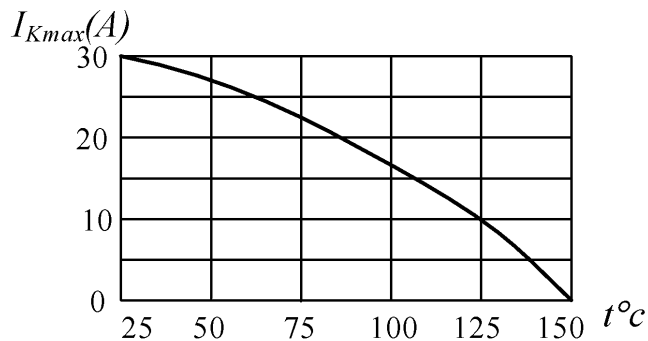
Основні параметри деяких модулів

Тип елемента	U_{KE} , В	U_{KEH} , В	I_K , А при $T=25\text{ }^\circ\text{C}$	I_K , А при $T=100\text{ }^\circ\text{C}$	P , Вт
IRGDDN300M06	600	3,0	399	159	1563
IRGDDN400M06	600	3,0	599	239	1964
IRGDDN600M06	600	3,7	799	319	2604

Унаслідок низького коефіцієнта підсилення вихідного біполярного транзистора БТІЗ захищений від вторинного пробую, і що особливо важливо для імпульсного режиму, він має прямокутну область безпечної роботи.

БТЗ ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ

- Зі зростанням температури напруга «колектор-емітер» транзистора збільшується, це дає можливість умикати прилади паралельно до загального навантаження і збільшувати сумарний вихідний струм. Залежність максимально допустимого струму колектора від температури корпусу БТІЗ транзистора показані на рисунку.
- Так само, як МОН ПТ, БТІЗ мають ємності «затвор-колектор», «затвор-емітер», «колектор-емітер». Величини цих ємностей, як правило, в 2-5 разів нижчі, ніж у МОН ПТ із аналогічними граничними параметрами. Це пов'язане з тим, що в БТІЗ на вході розміщений малопотужний МОН-транзистор, який потребує для керування в динамічних режимах меншу потужність.
- Істотною перевагою БТІЗ є те, що біполярний транзистор у структурі не насичується, тому не має часу на розмоктування.** Однак при зменшенні напруги на затворі струм через силові електроди ще проходить протягом від 80 - 200 нс до одиниць мікросекунд залежно від типу приладу. Зменшити ці тимчасові параметри неможливо, тому що база *p-n-p* – транзистора недоступна.



Залежність I_{Kmax} від температури корпусу для транзистора IRG4BC30F

БТІЗ порівняно з МОН ПТ мають **такі переваги**:

- **економічність керування, пов'язана з меншою ємністю затвора, і, відповідно, динамічними втратами на керування;**
- **висока густина струму у колі між емітером і колектором така сама, як і у біполярному транзисторі;**
- **менші втрати в режимах імпульсних струмів;**
- **практично прямокутна область безпечної роботи;**
- **можливість паралельного сполучення транзисторів з загальним навантаженням;**
- **динамічні характеристики останніх транзисторів наближаються до МОН ПТ.**

БТЗ ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ

• БТІЗ транзистори *класифікуються за наступними категоріями:*

W – (warp speed) – 75...150 кГц;

U – (ultra fast speed) – 10...75 кГц;

F – (fast speed) – 3...10 кГц;

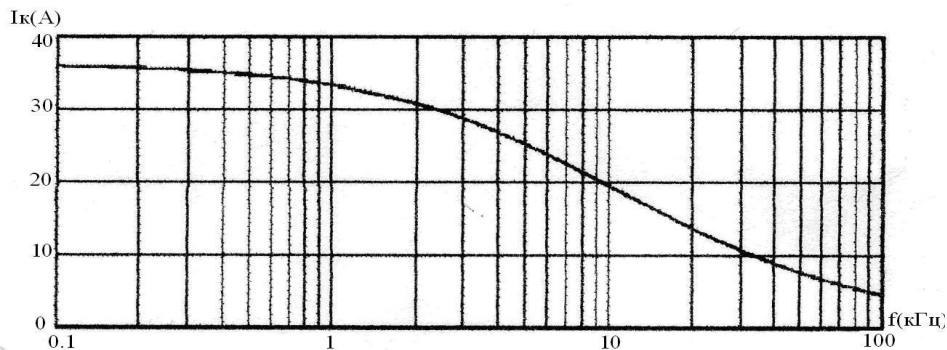
S – (standart speed) – 1...3 кГц.

• Наприклад, залежність струму колектора БТІЗ від частоти для транзистора IRGPC50UD2 показана на рис.

• Як бачимо з рисунка, на частотах роботи транзисторів більше 10 кГц струм колектора зменшується більш ніж удвічі.

• **Основним недоліком БТІЗ є великий час вимикання, що обмежує частоти перемикання до 40 – 100 кГц навіть у самих швидкодіючих транзисторів, крім того, зі зростанням частоти необхідно зменшувати струм колектора. МОН ПТ і БТІЗ транзистори - прилади, які керуються напругою.**

• Фірми-виробники силових напівпровідників випускають драйвери керування, які узгоджують малопотужну схему керування з вихідними транзисторами верхнього і нижнього плечей силового інвертора. Вихідні каскади цих драйверів виконуються, як правило, у вигляді двотактних підсилювачів потужності на польових транзисторах, що забезпечують імпульсний вихідний струм до 2 А.



Залежність струму колектора від частоти