**1. ЕЛЕМЕНТИ  ЕЛЕКТРОНИХ СИСТЕМ**

**ВСТУП**

Електронна система складається з електрично зв'язаних між собою пасивних компонентів (резисторів, конденсаторів і котушок індуктивностей) та активних компонентів - напівпровідникових приладів. В інтегральній мікросхемі активні і пасивні компоненти складають єдине ціле (інтегральний прилад). У силовій схемі напівпровідниковий прилад - конструктивно самостійний елемент (дискретний прилад).

Напівпровідникові прилади належать до твердотілих пристроїв так як їх функціонування ґрунтується на використанні властивостей напівпровідників.

В електронному пристрої напівпровідниковий прилад виконує дві основні функції:

1.        замикає і розмикає коло електричного струму, тобто працює як ключ;

2.        забезпечує лінійне посилення електричного сигналу, тобто працює як підсилювач.

Відповідно до цього розділяються ключові та підсилювальні режими експлуатації напівпровідникових приладів. У ключовому режимі прилад має два статичних стани: замкнутий - опір приладу близький до нуля, і розімкнутий - опір приладу великий. У підсилювальному режимі напівпровідниковий прилад забезпечує лінійну передачу сигналу: вихідний сигнал цілком повторює форму керуючого (вхідного) сигналу, але має велику (посилену) потужність.

По функціональних можливостях  виділяють три основних класи напівпровідникових приладів: діоди, транзистори та тиристори.

*Діод*- це електричний «вентиль» тобто прилад, що забезпечує односпрямовану передачу електричного сигналу. Його можна вважати некерованим ключем.

*Транзистор* - керований напівпровідниковий прилад, що може працювати в електронній схемі як у ключовому, так і підсилювальних режимах. Це універсальний напівпровідниковий прилад інтегральних та силових схем.

*Тиристор* - керований напівпровідниковий прилад, що використовується тільки в ключовому режимі насамперед у силових виконавчих пристроях.

**РОЗДІЛ 1.**                    **ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

## *1.1.**Силові напівпровідникові елементи*

Класифікація силових напівпровідникових елементів, яка  історично склалася на шляху їх  розвитку представлена на рис.1.1.



IGBT - *Insulated-gate bipolar transistor*, (*біполярний транзистор із ізольованим затвором)*

MOSFET -  *metal-oxide-semiconductor field effect transistor (*металл-оксид-напівпровідник або польовий транзистор з ізольованим затвором*)*

Рис. 1.1 Класифікація силових напівпровідникових приладів

Далі більш детально розглянемо основні силові напівпровідникові прилади зазначені на рис.1.1.

### 1.1.1.Діоди

*Напівпровідниковий діод* – прилад, що має два зовнішніх виводи, та містить один *p-n* перехід. Зовнішні виводи називають анод (А) та катод (К) - рис.1.2, *а, б.*Існують різні типи діодів, графічні зображення деяких з них наведено на рис.1.2, *в*.



Рис. 1.2 Напівпровідниковий діод

*а)* графічне позначення; *б)* структура; *в)*графічні зображення деяких типів діодів

Фізично силовий діод являє собою *p-n* перехід, побудований на базі, наприклад, кремнієвої структури з різними типами провідності.  Струм, що протікає в напрямку анод – катод, називається *прямий струм*, а в напрямку катод – анод *зворотній струм*.

На рис.1.3 зображено статичну (*а)* та динамічну (*б)* вольт-амперну характеристики (ВАХ) напівпровідникового діода.



Рис. 1.3 ВАХ напівпровідникового діода:

а) статична характеристика; б) динамічна характеристика

На динамічній характеристиці (рис.1.3, *б*) можна виділити такі інтервали:

1 – діод вимкнений ;

2 – до діода прикладена пряма напруга, він відкривається;

3 – діод  відкритий;

4 – до діода прикладена зворотна напруга, він закривається  протягом часу ;

5 – діод закритий, до нього прикладена зворотна напруга.

При збільшенні зворотної напруги зворотний струм майже не змінюється – він визначається кількістю неосновних носіїв зарядів. Але при певній напрузі зворотний струм починає стрімко зростати – відбувається пробій *р-n-*переходу. Неосновні носії заряду набувають енергію, достатню для іонізації атомів напівпровідника. Відбувається лавиноподібне розмноження носіїв заряду і відповідне збільшення сили струму при майже незмінній зворотній напрузі. Це є лавинний пробій.

Лавинний пробій може бути тепловим або електричним. При електричному лавинному пробої властивості *р-n-*переходу зберігаються ─ при зменшенні напруги сила струму відповідно зменшується. Електричний лавинний пробій використовують в спеціальних діодах, наприклад, в стабілітронах, які призначені для стабілізації напруги. При тепловому пробої температура *р-n-*переходу надмірно зростає і він руйнується.

*В.А. Іщенко. Електроніка. Мікропроцесорна техніка*

**Основні параметри діодів, та їх позначення.**

*Постійна пряма напруга*******постійна напруга на діоді при заданому прямому струмі.

*Постійна зворотна напруга*******постійна напруга прикладена до діода у зворотному напрямку.

*Постійний прямий струм***постійний струм, що протікає через діод у прямому напрямку.

*Постійний зворотний струм*******постійний струм, що протікає через діод у зворотному напрямку при заданій зворотній напрузі.

*Середній прямий струм*** прямий струм, усереднений за період.

*Середній зворотний струм*******зворотний струм, усереднений за період.

*Диференціальний опір діода* відношення збільшення напруги на діоді до  збільшення його струму. 

*Максимально допустимі параметри:* До них відносяться всі перераховані вище, але з максимально допустимими рівнями напруг та струмів, перевищення яких призводить до виходу приладу з ладу. Необхідно відзначити, що по максимально допустимих параметрах вибираються діоди для роботи в пристроях і визначаються максимальним допустимим значенням параметра, з індексом “max”.

*Імпульсний діод* — різновид напівпровідникових діодів, призначених для роботи в швидкодіючих імпульсних схемах. Імпульсний діод має малу бар’єрну ємність та малий  час відновлення зворотного опору.  *Бар’єрна ємність* –  ємність *p-n* переходу напівпровідникової структури.

**Для імпульсних діодів використовують наступні параметри:**

*Імпульсна пряма напруга***пікова пряма напруга на діоді при заданому імпульсі прямого струму.

*Імпульсна зворотна напруга***пікова зворотна напруга на діоді, включаючи як однократні викиди, так і періодично повторювані.

*Загальна ємність*******ємність, обмірювана між виводами діода при заданих напрузі й частоті.

*Час встановлення прямої напруги*******інтервал часу з моменту подачі імпульсу прямого струму на діод (при нульовій напрузі зсуву) до досягнення заданої прямої напруги на діоді.

*Час відновлення зворотного опору******* інтервал часу з моменту проходження струму через нуль після перемикання діода зі стану заданого струму в стан заданої напруги до моменту досягнення заданого зворотного струму.

*Заряд перемикання*******частина накопиченого заряду, що переходить до зовнішнього ланцюга при зміні напрямку струму із прямого на зворотне.

*Стабілітрон*— напівпровідниковий діод, на виводах якого напруга залишається майже постійною, при зміні в деяких межах величини електричного струму, що  протікає в ньому.

**Для стабілітронів характерними є такі параметри:**

*Напруга стабілізації*** напруга на стабілітроні при заданому струмі стабілізації.

*Допустиме відхилення напруги стабілізації від номінального*** максимально допустиме відхилення напруги стабілізації від номінального для стабілітронів даного типу.

*Диференціальний опір стабілітрона*******відношення збільшення напруги стабілізації до  збільшення струму, що його викликало.

*Температурний коефіцієнт напруги стабілізації*******відношення відносної зміни напруги стабілізації до абсолютної зміни температури навколишнього середовища при постійному струмі стабілізації.

*Повна ємність стабілітрона*******ємність між виводами стабілітрона при заданій напрузі.

*Варикап* — напівпровідниковий діод, робота якого базується на залежності бар’єрної ємності переходу від зворотної напруги. Варикапи використовуються в якості елементів з електрично керованою ємністю в схемах перестройки частоти коливального контуру.

Варікапи – використовують в радіоприймачах, телевізорах та ін., як змінні конденсатори, ємність яких змінюється при регулюванні керуючої постійної напруги.

**Для варикапів характерними є такі параметри:**

*Ємність варикапа******* ємність, що виміряється між виводами при заданій зворотній напрузі.

*Коефіцієнт перекриття по ємності******* відношення ємностей варикапа при двох заданих зворотних напругах.

*Добротність варикапа*******відношення реактивного опору на даній частоті змінного сигналу до опору втрат при заданій ємності або зворотній напрузі.

*Постійний зворотний струм варикапа*******постійний струм, що протікає через діод у зворотному напрямку при заданій зворотній напрузі.

**Випрямляючі діоди**

Застосовуються для перетворення змінного струму в пульсуючий і є основним компонентом блоків живлення. Конструкція силового діода зображена на рис.1.4.



Рис. 1.4 Напівпровідниковий силовий діод

*а)* позначення; *б)* структура

Фізично силовий діод являє собою *p-n*перехід, побудований на базі кремнієвої структури з різними типами провідності. Для забезпечення протікання значних струмів площа *p-n* переходу має бути значно більшою ніж у інших типів діодів.

Для забезпечення високих значень пробивної напруги ******конструкція силових діодів має певні особливості.  Поміж високолегованими областями  *p* та *n*знаходиться  слаболегована область. При зворотній напрузі в зоні  виникає широка область збіднена носіями заряду, за рахунок цього зменшується напруженість в області   *p-n*  переходу.

         При прямій напрузі за рахунок інжекції область  заповнюється рухомими носіями заряду, тому на опір діода в прямому включенні вона практично не впливає.

**Високочастотні діоди**

Для побудови високочастотних діодів використовуються *p-i-n* структури. Завдяки своїй відносній простоті ці структури починаючи з 50-х років знайшли застосування в конструкціях багатьох різновидів напівпровідникових діодів, починаючи від високовольтних випрямних до фотодіодів і гетеролазеров.

Найбільше застосування *p-i-n*діоди знайшли у приладах ВЧ- і СВЧ-діапазонів для керування рівнем і (або) фазою СВЧ-сигналів, комутації ВЧ- і СВЧ-потужності в лініях передач, для захисту радіотехнічної апаратури від випадкових СВЧ-імпульсів, для стабілізації СВЧ-потужності, а також в атенюаторах  ВЧ-діапазона.

У вітчизняній практиці *p-i-n*-діоди СВЧ-діапазону одержали назву перемикальних і обмежувальних (залежно від роду використання), у ВЧ-діапазоні їх називають комутаційними й регульованими резистивними (для атенюаторів). У закордонній літературі в їхній назві збережений конструктивно-технологічний маркер «PIN-Diodes».

Останнім часом через різке розширення виробництва засобів зв'язку, і переговорних пристроїв, зокрема спеціального призначення, спостерігається постійне збільшення попиту на *p-i-n*-діоди, що заходять все більше застосування як в апаратурі спеціального призначення, так і  у комерційній електроніці.

Структура типового *p-i-n*-діода зображена на рис.1.5.



Рис. 1.5 Структура *p-i-n*-діода

Така структура характеризується тим, що між двома сильно легованими областями дуже низького опору  і   перебуває активна базова  *i*-область із високим питомим опором (типово , іноді до ) і відносно великим часом життя електронів і дірок  (~0,1-1,0 мкс). Товщина бази лежить у межах 3-30 мкм.

Таким чином, при роботі у  СВЧ і частково ВЧ діапазонах  *p-i-n*-діод (без урахування паразитних параметрів  і  ) являє собою лінійний резистор, опір якого при прямому зсуві  значно менше, ніж при зворотному  , при цьому  залежить від прямого струму.

**Діод Шотки**

Названий на честь німецького фізика Baльтера Шотке — напівпровідниковий діод з малим падінням напруги при прямому включенні. Діоди Шотки використають перехід метал-напівпровідник як бар’єр Шотки (замість *p-n* переходу, як у звичайних діодів). Допустима зворотна напруга діодів Шотки, що випускають промислово обмежена 250 В. На практиці більшість діодів Шотки застосовується в низьковольтних ланцюгах при зворотній напрузі порядку одиниць і декількох десятків вольт.

*Переваги :*

1.        Мале пряме падіння напруги близько 0,2-0,4 В. Настільки мала пряма напруга властива тільки діодам Шотки з максимальною зворотною напругою порядку десятків вольт.

2.        Бар'єр Шотки також має меншу електричну ємність переходу, що дозволяє помітно підвищити робочу частоту. Ця властивість використається в інтегральних мікросхемах, де діодами Шотки шунтуються переходи транзисторів логічних елементів. У силовій електроніці мала ємність переходу (тобто короткий час відновлення) дозволяє будувати випрямлячі на частоти в сотні [кГц](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%93%D1%86%22%20%5Co%20%22%D0%9A%D0%93%D1%86) і вище. Наприклад, діод MBR4015 (15 В, 40 А), оптимізованими під високочастотне випрямлення, нормований для роботи при d/dt до 1000 В/мс.

3.        Завдяки кращим динамічним характеристикам і малим ємностям переходу випрямлячі на діодах Шотки відрізняються від традиційних діодних випрямлячів зниженим рівнем перешкод.

*Недоліки:*

1.        При короткочасному перевищенні максимальної зворотної напруги діод Шотки виходить із ладу, на відміну від кремнієвих діодів, які переходять у режим зворотного пробою, і за умови не перевищення максимальної потужності, що розсіюється на діоді, після падіння напруги кремнієвий діод повністю відновлює свої властивості.

2.        Діоди Шотки характеризуються підвищеними (щодо звичайних кремнієвих діодів) зворотними струмами, що зростають із ростом температури кристала

Як приклад, наведено значення параметрів діоду Шотки типу 1N5819PBF

 *Диністор* – напівпровідниковий прилад, що має три *p-n* переходи, зовнішні виводи виконані лише від крайніх областей (*p* та *n*). На рис.1.6 зображено диністор, його структуру та вольт-амперну характеристику.

Рис. 1.6 Диністор: *а)* позначення диністора;  *б)* структура диністора; *в)* ВАХ диністора

Якщо плавно збільшувати напругу, струм через диністор буде спочатку незначно зростати (рис.1.6, *в*). При цьому диністор практично закритий. Такий стан буде поки напруга на диністорі не стане дорівнювати напрузі включення . В  цей момент в чотирьох шаровій структурі настає лавиноподібний процес зростання струму і диністор переходить у відкритий стан. Падіння напруги на ньому різко зменшиться (це видно на рис.1.6, *в*), а струм через диністор тепер буде визначатися опором навантаження, але він не повинен перевищувати максимально допустимого значення .

Напруга, при якій диністор відкривається, називають напругою включення , а відповідний цьому значенню струм - струмом включення .

У відкритому стані диністор може знаходитися до тих пір, поки прямий струм через нього буде перевищувати мінімально допустимий струм , що називається струмом утримання.

Зворотна вітка характеристики диністора схожа на характеристику діода. Подача на диністор зворотної напруги вище допустимого  може вивести диністор з ладу.

### 1.1.2.Тиристори

*Тиристор*- це перемикаючий напівпровідниковий прилад, що пропускає струм в одному напрямку. Його називають напівпровідниковим керованим вентилем (Silicon Controlled Rectifier, SCR).

Тиристор має три виводи, один із яких - *керуючий електрод* - використовується для управління станом тиристора. При подачі імпульсів управління  на відкривання тиристора він різко переходить у включений стан.

## *1.2.**Резистори*

### 1.2.1.Класифікація і загальна характеристика резисторів

*Резистор* (англ. *resistor*, від лат. *Resisto –* опираюсь) – пасивний елемент електричного кола, що в ідеалі характеризується лише опором електричному струму, тобто для ідеального резистора у любий момент має виконуватись закон Ома: миттєве значення напруги на резисторі пропорційне струму через нього.

Але на практиці резисторам в тій чи іншій мірі притаманні також паразитна ємність, паразитна індуктивність та нелінійність вольт-амперної характеристики.

В електронній схемотехніці резистори призначені для забезпечення необхідних режимів роботи активних напівпровідникових і вакуумних компонентів, а також для розподілення напруг і струмів в елементах схеми.

Резистори поділяються на дві групи: з *постійним опором*та зі *змінним опором.*

*Резистори зі змінним опором* – це  прилади, величина опору яких змінюється механічним шляхом (потенціометри, реостати). До цієї групи відносять також підстроюванні резистори, величина  яких встановлюється один раз в процесі налагодження електронного приладу.

**Резистори класифікують за такими ознаками:**

1.     Призначення:

1.1. Загального призначення – використовуються у якості навантажень активних елементів, дільників у колах живлення, елементів фільтрів, шунтів.

1.2. Спеціальні:

1.2.1.  Прецизійні – відрізняються високою стабільністю параметрів в процесі їх експлуатації та високою точністю виготовлення (допуски задаються з точністю від ± 0,05% до ± 0,0005%). Застосовуються у вимірювальних пристроях, обчислювальній техніці. Діапазон номінальних опорів значно ширше, ніж резисторів загального призначення, а діапазон розсіюваних потужностей – навпаки, значно менше, що забезпечує їх високу точність.

1.2.2.  Високочастотні – відрізняються малою власною індуктивністю та ємністю. Призначені для використання у високочастотних колах (від 10 МГц до 18 ГГц), кабелях, хвильоводах, а також як направлені відгалужувачі та еквіваленти антен.

1.2.3.  Високовольтні – розраховані на роботу під високими напругами (від одиниць до десятків кВ). Їх використовують для ділення, поглинання напруги в розрядних і високовольтних колах.

1.2.4.  Високоомні – мають діапазон номінальних опорів від десятків МОм до одиниць ТОм. Призначені для використання в вимірювальній техніці і високочутливих приладах. Їх потужності розсіювання невеликі (до 0,5 Вт).

2.     Захист від зовнішніх факторів:

2.1. Неізольовані – з покриттям, або без нього, не допускають дотикання своїм корпусом шасі апаратури.

2.2. Ізольовані – мають ізоляційне покриття (лак, компаунд, пластмаса) і допускають дотикання до корпуса шасі та струмоведучих частин радіоелектронної апаратури.

2.3. Герметизовані – мають герметичну конструкцію корпуса, яка виключає вплив навколишнього середовища на його внутрішній простір. Герметизація використовується за допомогою опресовки спеціальним компаундом.

2.4. Вакуумні – мають резистивний елемент, що поміщений у скляну вакуумну колбу.

3.     Спосіб монтажу: начіпний, поверхневий, для мікромодулів та інтегральних мікросхем;

4.     Матеріал резистивного елемента:

4.1.  Проволочні – резистори, в яких резистивним елементом є високоомний провід (виготовляються з високоомних сплавів: константан, ніхром, нікелін). Представляють собою відрізок проводу з високим питомим опором, що намотаний на який-небудь каркас. Можуть мати значну паразитну індуктивність.

4.2. Металофольгові – аналогічні дротовим, але навиті з металічної фольги.

4.3. Плівкові металічні – представляють собою тонку плівку металу з високим питомим опором, що напилена на керамічне осердя. На кінці осердя надіті металічні ковпачки з дротовими виводами. Іноді, для підвищення опору, у плівці прорізається канавка. Це найбільш розповсюджений тип резисторів.

4.4. Вугільні – бувають плівкові та об’ємні. Використовують високий питомий опір графіту.

4.5. Напівпровідникові – використовується опір слаболегованого напівпровідника. Ці резистори можуть мати велику нелінійність вольт-амперної характеристики. Використовуються у складі інтегральних мікросхем, де застосувати інші типи резисторів важче.

5.     Конструкція:

5.1. Одноелементні та багатоелементні.

5.2. З круговим та лінійним переміщенням рухомого контакту.

5.3. Однообертові та багатообертові.

5.4. З обмеженим і необмеженим діапазоном переміщення рухомого контакту.

5.5. З фіксацією і без фіксації рухомої частини.

### 1.2.2.Зовнішній вигляд та позначення резисторів

Нижче у якості прикладів наведені позначення та зовнішній вигляд резисторів деяких фірм-виробників.

**Маркування резисторів фірми PHILIPS:**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Металоплівкові резистори-запобіжники | Металоплівкові загального призначення | Товстоплівкові, високоомні, високовольтні (> 10 МОм; > 1кВ) | Металоплівкові потужні  (1 Вт / 2 Вт) |
| r10Опір: 12 кОм ± 5% | r11Опір: 12 кОм ± 5% | r12Опір: 2,7 МОм ± 5% | r13Опір: 82 кОм ± 5% |
|   |   |   |
| Металоплівкові прецизійні |
|   | r14Опір: 47 кОм ± 10% | r15Опір: 390 кОм ± 10%ТКО: ± 50 ppm/ºC |   |
|  |  |  |  |  |  |

**Маркування фірми CORNING GLASS WORK (CGW):**

|  |  |
| --- | --- |
| Проволочні резистори промислового використання | Проволочні вогнестійкі резистори |
| r16Опір: 2,4 Ом | r17Опір: 220 кОм |

**Маркування фірми PANASONIC:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вогнестійкі резистори типу Anti-Pulse | Високоякісний плівковий резистор типу ERDAS3 для звукової техніки | Металоокисний плівковий резистор-запобіжник |
| r18Опір: 220 кОм | r19Опір: 220 кОм ± 0,1% | r20Опір: 220 кОм ± 1% |

Багато фірм випускають в якості плавких вставок або перемичок спеціальні проводи з нормованим опором і діаметром (0,6 мм; 0,8 мм) і резистори з “нульовим” опором.

Резистори виконують у стандартному циліндричному корпусі з гнучкими виводами (Zero-Ohm) або в стандартному корпусі для поверхневого монтажу (Jumper-Chip). Реальні значення опору таких резисторів лежать в діапазоні від одиниць до десятків мОм ( 0,005…0,05 Ом).

|  |  |
| --- | --- |
| Zero-Ohm(кераміка-метал) | Jumper-Chip |
| r21         R  13 мОм | r22          R  50 мОм |

*Набори резисторів* – це сукупність резисторів, об’єднаних в одну конструкцію у вигляді мікросхеми. Вони класифікуються за своїм призначенням, за типом резистивного елемента, за схемотехнічною побудовою.

Розподіл наборів за призначенням і типом резистивного елемента співпадає з постійними резисторами. Особливість полягає лише в їх схематичному з’єднанні.

*Простий набір резисторів* – набір постійних резисторів, які можуть бути з’єднаними або не з’єднаними в електричну схему;

*Функціональний набір резисторів* – це набір постійних резисторів, що має функціональну  залежність між вхідним і вихідним сигналами;

*Комбінований набір резисторів* – це набір, який містить постійні і змінні резистори.

*Система умовних позначень резисторів* має скорочене позначення і складається з трьох груп символів, які приведені в табл.1.9.

На резистори наноситься буквено-цифрова або кольорова маркування. *Буквенне маркування*містить: номінальну потужність; номінальний опір; допуск і дату виготовлення. Номінальний опір позначається цифрами з вказівкою одиниці виміру (Ом – оми; кОм (К) – кілооми; МОм (М) – мегаоми; ГОм (G) – гігаоми; ТОм (Т) – тераоми.)

Наприклад: 220 Ом; 680 К; 3М3 (буква фактично означає множник 1, 10, 10, 10, 10 і визначає положення коми десяткового знака).

Допуск визначається або в цифровій формі, або в відповідній до неї буквеній кодировці (±20% - М;    ±10% - К; ±5% - I; ±2% - G; ±1% - F; ±0,5% - D ; ±0,25% - E; ±0,1% - B).

*Таблиця 1.10*

|  |  |
| --- | --- |
| Група символів | **Приклад позначення** |
| I | II | III |
| **Р**–резистори постійні**РП** – резистори змінні**ТР** – терморезистор з від’ємним ТКО**ТРП**– терморезистор з позитивним ТКО**ВР** – варистори постійні**ВРП** – варистори змінні | 1 - непроволочні2 - проволочні, на основі металевої фольгиНа напівпровідникові матеріали позначень немає | Порядковий номер розробки | **P1-26**- постійний непроволочний резистор з номером розробки 26 **ТР-7** - терморезистор з від’ємним ТКО з номером розробки7 **ВРП-14** - варистор змінний з номером розробки 14 |

Система умовних позначень наборів резисторів регламентується галузевими стандартами і вимагає пояснень, які приводяться в довідниковій літературі і технічній документації.

### 1.2.3.Основні параметри резисторів

#### **1.2.3.1.      Номінальний опір і допуски**

*Номінальний опір*– це електричний опір, значення якого позначено на резисторі або вказано в нормативній документації і який є початковим значенням для відліку відхилень від цього значення.

 Діапазони номінальних опорів встановлені міжнародними стандартами і мають наступні обмеження:

для постійних резисторів – від долів ома до одиниць тераома;

для змінних дротових – від 0,47 Ом до 1 МОм;

для змінних недротових – від 1 Ома до 10 МОм.

Ряди опорів стандартизовані і мають слідуючи умовні позначення: E6; E12; E48; E96; E192.

Цифра після букви **Е** вказує на кількість номінальних значень опорів резисторів в десятковому інтервалі.

В табл. 1.11  наведені опори по ряду Е6; Е12; Е24.

*Таблиця 1.11*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Е6** | **Е12** | **Е24** | **Е6** | **Е12** | **Е24** |
| 1,0 | 1,0 | 1,0 | 3,0 | 3,3 | 3,3 |
|   |   | 1,1 |   |   | 3,6 |
|   | 1,2 | 1,2 |   | 3,9 | 3,9 |
|   |   | 1,3 |   |   | 4,3 |
| 1,5 | 1,5 | 1,5 | 4,7 | 4,7 | 4,7 |
|   |   | 1,6 |   |   | 5,1 |
|   | 1,8 | 1,8 |   | 5,6 | 5,6 |
|   |   | 2,0 |   |   | 6,2 |
| 2,2 | 2,2 | 2,2 | 6,8 | 6,8 | 6,8 |
|   |   | 2,4 |   |   | 7,5 |
|   | 2,7 | 2,7 |   | 8,2 | 8,2 |
|   |   | 3,0 |   |   | 9,1 |

*Ряд допустимих відхилень* також нормалізований. Допуски вказуються у відсотках в відповідності з верхнім рядом табл. 1.11. Допустимі відхилення кодуються буквами (див. табл. 1.12).

*Таблиця 1.12.*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Допустимевідхилення, % | ± 0,001 | ± 0,002 | ± 0,005 | ± 0,01 | ± 0,02 | ± 0,05 | ± 0,1 | ± 0,25 |
| Кодове позначення | E | L | R | P | U | X | B | C |
| Допустиме відхилення, % | ± 0,5 | ± 1 | ± 2 | ± 5 | ± 10 | ± 20 | ± 30 |   |
| Кодове позначення | D | F | G | I | K | M | N |   |

#### **1.2.3.2.      Номінальна потужність і максимально допустима напруга.**

*Номінальна потужність* – це найбільша потужність, яку резистор може розсіювати в заданих умовах на протязі гарантованого терміну роботи при параметрах, що задані допусками.

Величина розсіюваної потужності залежить від великої кількості факторів. Для кожного типу резистора приводяться в відповідній документації залежності допустимої потужності від оточуючої температури у вигляді графіка, що приводиться на рис. 1.29.



Рис. 1.29 Залежність допустимої потужності від оточуючої температури

Величина розсіюваної потужності **Р** в процесі експлуатації обмежується температурою оточуючого середовища і величиною електричного навантаження. На приведеній на рис. 1.29 залежності регламентуються три точки: нижня межа робочих температур; верхня межа робочих температур; максимально допустима температура, при якій експлуатація не допускається.

Ряд потужностей резисторів стандартизований і має такі номінали (Вт): 0,01; 0,025; 0,05; 0,062; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 8; 10; 16; 25; 40; 63; 80; 100; 160; 250; 500.

Потужність, що розсіюється на резисторі, обчислюється за допомогою типових формул:



Слід пам’ятати, що для високоомних резисторів може виникнути ситуація, коли прикладена до них напруга хоча й не забезпечує номінальну електричну потужність, що виділяється на резисторі, але може привести до *електричного пробою робочої області*. Тому для резисторів задаються *максимально допустимі робочі напруги*, які також стандартизовані і задаються рядом (В): 25; 50; 100; 150; 200; 250; 750; 1000; 1500; 2500; 3000; 4000; 5000; 10000; 20000; 25000; …

#### **1.2.3.3.      Температурний коефіцієнт опору (ТКО)**

ТКО – характеризує зворотну зміну величини опору резистора при зміні температури на 1 С.



де номінальна величина опору резистора при умовах експлуатації, що задані в ТЗ (здебільшого це температура 20*С*, а в пакетах віртуальних лабораторій - 27*С*); позитивний або негативний приріст відповідно опору та  температури.

*Чим менший ТКО, тим кращий резистор з точки зору експлуатації.*

 Значення ТКО прецизійних резисторів лежать в межах (1  100)10-6 С-1, а резисторів загального призначення   (10 - 2000)10-6  С-1.

#### **1.2.3.4.      Шуми резисторів**

Будь-які резистори мають теплові шуми. Вони з’являються внаслідок теплового руху носіїв заряду (електронів) всередині твердого тіла. Їх середня потужність визначається за формулою Найквіста:



де *k* – постійна Больцмана; *Т*– температура по Кельвіну; - діапазон частот заміру шумових характеристик.

Діюча величина напруги шумів, що може бути заміряна на резисторі, пов'язана з *Р*ш залежністю:



Інша природа шумів – це струмові шуми, які появляються внаслідок протікання струму через резистори. Діюче значення напруги цих шумів оцінюється за наближеною формулою:



де *R*1– постійний параметр; *U* – постійна напруга, що виділяється на резисторі;  - верхня і нижня частоти діапазону, в якому визначається шумова напруга.

Основні причини появи струмових шумів – це часові зміни об’ємної концентрації електронів, а також зміна контактних опорів між зернами провідникової структури резистора.

Значення шумів у недротових резисторів знаходиться в межах (1-5) мкВ в частотному діапазоні 60 Гц – 6 кГц.

У змінних резисторах рівень шумів зростає до 50 мкВ.

 Дротові резистори мають рівень шумів в межах 0,1 мкВ.

Реально шумова напруга резисторів має характер “білого” шуму, тобто це безперервний спектр напруг в заданому частотному діапазоні. При послідовному чи паралельному з’єднанні *n* резисторів еквівалентна шумова напруга визначається за формулою:

,

де *U*2ші – середньоквадратичне значення шумів *і*-го резистора; *N* – кількість резисторів, що використовуються на досліджуваній ділянці схеми.

#### **1.2.3.5.      Частотні властивості резисторів**

При використанні резисторів на високих частотах необхідно враховувати наявність паразитних реактивних елементів. Тому на високих частотах еквівалентна схема резисторів включає в себе індуктивність  і ємність  (рис.1.30). При цьому необхідно враховувати можливі резонансні напруги або струми, а також реактивну складову напруг та струмів резистора. Реально значення   і  невідомі і їх величини в значній мірі залежать від монтажу електронної схеми. Під час монтажу резистора на платі між його виводами та загальним проводом також виникають паразитні ємності , що показані на рис.1.30.



Рис. 1.30 Схема заміщення високочастотного резистора

 з паралельною ємністю виводів.

Іноді в технічній документації на резистори приводиться узагальнена постійна часу резистора . Наприклад, для резисторів типу МЛТ с.

Металоплівкові резистори мають велику послідовну індуктивність, що створює недопустимий реактивний опір на частотах у декілька ГГц. Окрім індуктивності існує також інший реактивний елемент – паралельна ємність, що виникає між металічним виводом та тілом резистора, яке розташоване на керамічному діелектрику.

 Дротові резистори на високих частотах також змінюють величину активної складової опору в зв’язку з явищем *поверхневого ефекту*, але воно починає проявлятись на частотах понад 1 МГц.

#### **1.2.3.6.      Функціональні характеристики**

Для резисторів зі змінним опором визначають залежність опору резистора від положення рухомого контакту. На рис.1.31 наведені основні типи функціональних залежностей, які широко використовуються на практиці. Характеристика  *Б* – логарифмічна, а  характеристика  *В* – зворотно-логарифмічна. Використання резисторів з тими чи іншими характеристиками залежить від необхідного характеру зміни вихідних сигналів.



Рис. 1.31 Основні типи функціональних залежностей опору резистора

                         від положення рухомого контакту

**Контрольні питання**

1.        Наведіть загальну класифікацію резисторів.

2.        Як класифікують резистори за призначенням?

3.        Як класифікують резистори по захисту від зовнішніх факторів?

4.        Як класифікують резистори по матеріалу резистивного елемента?

5.        Наведіть умовні позначення резисторів.

6.        Назвіть набори резисторів та їх типи.

7.        Назвіть основні параметри резисторів.

8.        Що таке номінальний опір і допуски резисторів?

9.        Що таке номінальна потужність і максимально допустима напруга?

10.   Як визначається температурний коефіцієнт опору резисторів?

11.   Поясніть, що таке шуми резисторів та їх природу.

12.   Поясніть частотні властивості резисторів.

13.   Поясніть функціональні характеристики резисторів.

14.   Зобразіть схему заміщення резистора на високих частотах.

**Основні властивості тиристора:**

1.        Тиристор, як і діод, проводить в одному напрямку, проявляючи себе як випрямляч;

2.        Тиристор переводиться з виключеного стану у включене при подачі сигналу на керуючий електрод і, отже, як вимикач має два стійких стани. Проте для повернення тиристора у виключений (розімкнутий) стан необхідно виконати спеціальні умови;

3.        Керуючий струм, необхідний для переведення тиристора із закритого стану у відкрите, значно менше робочого;

4.        Середній струм через навантаження, яке включене послідовно з тиристором, можна точно регулювати залежно від тривалості включеного стану тиристора.

**Структура тиристора**

*Тиристор* - керований трьохелектродний напівпровідниковий прилад, що складається із чотирьох кремнієвих шарів *р* та *n*типу, що чергуються.

 Графічне позначення, структура та статична характеристика тиристора наведені на рис.1.7, *а-в*.

Рис. 1.7 Тиристор: *а)* позначення тиристора;  *б)* структура тиристора;

*в)* статична ВАХ тиристора

**Принцип вмикання за допомогою керуючого електрода*.***

При відсутності струму керуючого електроду його переключення відбувається при напрузі . При наявності струму керування напруга переключення буде тим меншою, чим більший струм керування. При певній величині струму керування , яку називають *струмом спрямлення*, тиристор включиться при будь якій прямій напрузі більше нуля (рис.1.7, *в*). Процес переключення тиристора протікає лавиноподібно з часом включення  мкс.

Після того як тиристор ввімкнено імпульс управління на керуючому електроді уже не потрібен і його можна зняти, при цьому тиристор залишиться у включеному стані.

Для вимикання тиристора необхідно зменшити його анодний струм до величини меншої за струм утримання . При роботі тиристора в колах змінного струму його виключення відбувається природнім шляхом кожного разу коли змінюється полярність струму, що проходить через тиристор. При роботі тиристора в колах постійного струму для його виключення необхідно використовувати допоміжні пристрої – вузли примусової комутації.

**До основних параметрів тиристорів відносять:**

максимальне значення амплітуди робочої напруги тиристора в закритому стані;

максимальне середньоквадратичне значення струму через тиристор ;

максимальний ударний неповторюваний струм у відкритому стані;

захисний показник. Якщо в пристрої із застосуванням тиристора встановлений захисний прилад, наприклад, плавкий запобіжник, значення його  повинне бути менше, ніж у тиристора;

максимальна імпульсна потужність, що розсіється у керуючому електроді;

максимальний імпульсний струм керуючого електрода;

максимальна імпульсна напруга керуючого електрода;

максимальний спад напруги на тиристорі при проходженні короткого імпульсу струму;

постійний струм керуючого електрода, що вмикає;

постійна напруга керуючого електрода, що вмикає;

струм утримання;

тепловий опір перехід-навколишнє середовище.

У табл.1.3  наведено основні параметри деяких тиристорів фірми Motorola

*Таблиця 1.3*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тиристори | *U*max | *I*max | *I*утр | *I*2t | *Py*max | *Iy*max | *Uy*max | *Uoc*max | *Iy.вм* | *Uy.вм* | *I*утр | *R*T | Типкорп. |
| MCR100-3 | 100 | 0,8 | 10 | 0,415 | 0,1 | 1 | 5 | 1,7 (1 А) | 0,2 | 0,8 | 5 | 200 | ТО-92 |
| MCR100-4 | 200 |
| MCR100-6 | 400 |
| MCR100-8 | 600 |

**Повністю керований тиристор (GTO)**

Перші подібні тиристори з'явилися в 1960 р. у США. Вони одержали назву Gate Turn Off (GTO). У середині 90-х років були розроблені повністю керовані тиристори з кільцевим виводом керуючого електрода. Вони одержали назву Gate Commutated Thyristor (GCT) і стали в подальшому розвитком GTO-технології.

*GTO тиристор* - повністю керований напівпровідниковий прилад, в основі якого лежить класична чотирьохшарова структура. Такий тиристор включають і виключають подачею позитивного й негативного імпульсів струму на електрод керування. Подібно звичайному тиристору, він має катод K, анод А, та керуючий електрод (іноді позначається G – gate) (рис.1.8, *а*.).

На схематичному розрізі тиристорної структури  (рис.1.8, *б*) нижній вивід - анодний. Анод контактує із шаром *p*. Далі (знизу нагору) розташовані: базовий шар*n*, базовий шар *p* (що містить вивід керуючого електрода) і шар *n*, що безпосередньо контактує з катодним виводом. Чотири шари утворять три *p*-*n*-переходи: перший між шарами *p* і *n*; другий між шарами *n* і *p*; третій між шарами *p* і *n* (рис.1.8, *б*).

Рис. 1.8 GTO тиристор: а) позначення тиристора;  б) структура тиристора;

в) зміна струму анода та керуючого електроду

Розходження в структурах різних тиристорів полягає в іншому розташуванні горизонтальних і вертикальних шарів з *n-*і *р-*провідностями. Найбільшої зміни у сучасних тиристорах зазнав катодний шар. Він виготовляється з кількох сотень елементарних осередків, рівномірно розподілених по площі й з'єднаних паралельно. Таке виконання забезпечує рівномірне зниження струму по всій площі напівпровідникової структури при вимиканні приладу.  Базовий шар *p*, незважаючи на те що виконаний  як єдине ціле, має велику кількість контактів керуючого електроду (приблизно рівне числу катодних осередків), також рівномірно розподілених по площі й з'єднаних паралельно. Базовий шар *n*виконаний аналогічно відповідному шару звичайного тиристора.  Анодний шар *p* має шунти (зони *n*), що з'єднують *n*-базу з анодним контактом через невеликі розподілені опори. Анодні шунти застосовують у тиристорах, що не мають зворотної здатності. Вони призначені для зменшення часу вимикання приладу за рахунок поліпшення умов виймання зарядів з базової області *n*.

Основне виконання тиристорів GTO - таблеткове з чотирьохшаровою кремнієвою пластиною, затиснутою через термокомпенсуючі молібденові диски між двома мідними основами, що мають підвищену тепло- і електропровідність. Із кремнієвою пластиною контактує керуючий електрод, що має вивід у керамічному корпусі. Прилад затискається контактними поверхнями між двома половинами охолоджувачів, ізольованих одна від одної й має конструктивне використання, обумовлене типом системи охолодження (рис.1.8, *б*).

**У циклі роботи тиристора GTO розрізняють чотири інтервали:**

 1) включення, 2) провідний стан, 3) вимикання, 4) вимкнений стан.

На рис.1.8, в  першому інтервалу – включення відповідає інтервал часу . Перехід тиристорної структури з виключеного стану у відкритий можливий тільки при позитивній прямій напрузі між анодом і катодом. Чотири шари утворюють три *p-n*-переходи: 1 - між шарами *p* і *n*; 2 - між шарами *n* і *p*; 3 - між шарами  *p* і *n*  (рис.1.8, *б*). Переходи 1 і 3 зміщаються в прямому напрямку й не перешкоджають проходженню носіїв зарядів. Вся напруга прикладається до середнього переходу 2, що зміщається у зворотному напрямку. Біля переходу 2 утвориться зона, збіднена носіями зарядів, що одержала назву *області об'ємного заряду*. Щоб включити тиристор GTO, до керуючого електрода й катода по колу керування прикладається напруга позитивної полярності (вивід «+» до шару *p*). У результаті у колі протікає струм включення .

         GTO тиристори мають жорсткі вимоги до крутості фронту  і амплітуди  струму керування. Через перехід 3, крім струму витоку, починає протікати струм включення .  Електрони, що створюють цей струм, будуть інжектуватися з шару *n* у шар *p*. Далі частина з них буде переноситися електричним полем базового переходу 2 у шар *n*.  Одночасно збільшиться зустрічна інжекція дірок із шару *p* у шар *n* і далі в шар *p*, тобто відбудеться збільшення струму, створеного неосновними носіями зарядів. Сумарний струм, що проходить через базовий перехід , перевищує струм включення, відбувається відкриття тиристора, після чого носії зарядів будуть вільно переходити через всі його чотири області.

Інтервал 2 - провідний стан (інтервал часу  на рис.1.8, *в*).

У режимі протікання прямого струму немає необхідності в струмі , якщо анодний струм перевищує величину струму утримання . Однак на практиці, для того щоби всі структури GTO тиристора постійно перебували в провідному стані, необхідна підтримка струму, передбаченого для даного температурного режиму. Таким чином, протягом часу включення й знаходження в провідному стані система керування формує струм позитивної полярності. У провідному стані всі області напівпровідникової структури забезпечують рівномірний рух носіїв зарядів (електронів від катода до анода, дірок — у зворотному напрямку). Через переходи 1, 2 протікає анодний струм, через перехід 3 — сумарний струм анода й керуючого електрода.

Інтервал 3 – вимикання (інтервал часу  на рис.1.8, *в*).

Для вимикання тиристора GTO при незмінній полярності напруги, до керуючого електрода й катода по колу керування прикладається напруга негативної полярності. Вона викликає струм вимикання , протікання якого веде до розсмоктування основних носіїв заряду (дірок) у базовому шарі *p*. Інакше кажучи, відбувається рекомбінація дірок, що надійшли в шар *p* з базового шару *n*, і електронів, що надійшли в цей же шар по керуючому електроду.

З часом звільнення від них базового переходу 2 тиристор починає закриватися. Цей процес характеризується різким зменшенням прямого струму тиристора за короткий проміжок часу до невеликої величини. Відразу після запирання базового переходу 2 починає закриватися перехід 3, однак за рахунок енергії, запасеної в індуктивності ланцюгів керування, він ще якийсь час перебуває у відкритому стані.

Після того як вся енергія, запасена в індуктивності ланцюга керування, буде витрачена, перехід 3 з боку катода повністю закривається. З цього моменту струм через тиристор дорівнює струму витоку, що протікає від анода до катода через ланцюг керуючого електрода. Процес рекомбінації, вимикання тиристора, багато в чому залежить від крутизни фронту і амплітуди зворотного струму керування. Щоб забезпечити необхідні крутизну фронту і амплітуду цього струму, на керуючий електрод потрібно подати напругу, що не повинна перевищувати величини, припустимої для переходу 3.

Інтервал 4 – вимкнений стан (інтервал часу від  рис.1.8, *в*).

У цьому режимі до керуючого електрода й катода залишається прикладеною напруга негативної полярності від блоку керування. По ланцюгу керування протікає сумарний струм, що складається зі струму витоку тиристора й зворотного струму керування, що проходить через перехід 3. Останній зміщується у зворотному напрямку. Таким чином, у тиристорі GTO, що перебуває в прямому стані, що блокує, два переходи (2 і 3) зміщені у зворотному напрямку, і утворені дві області просторового заряду. Протягом усього часу вимикання й стану, що блокує, система керування формує напругу негативної полярності.

*Захисні ланцюги.*Використання тиристорів GTO вимагає застосування спеціальних захисних ланцюгів. Вони збільшують масогабаритні показники, вартість перетворювача, іноді вимагають додаткових охолоджувальних пристроїв, однак є необхідними для нормального функціонування приладів.

**Контрольні питання**

1.        Наведіть ВАХ напівпровідникового діода.

2.        Привести динамічну характеристику діода.

3.        Що таке максимально допустимі параметри діода? Навести приклади.

4.        Привести структуру силового діода.

5.        Навести структуру ВЧ діода, пояснити основні відмінності.

6.        Які основні переваги діодів Шотки?

7.        Які недоліки діодів Шотки, якщо вони існують?

8.        Що таке диністор? Приведіть його ВАХ.

9.        Назвіть основні властивості тиристора.

10.   Яку структуру має тиристор?

11.   Наведіть умовне графічне позначення тиристора.

12.   Наведіть ВАХ тиристора.

13.   Які особливі моменти можна відзначити в керуванні тиристором?

14.   Що таке GTO тиристор? Його основні відмінності від напівкерованого тиристора.

15.   Наведіть  динамічну характеристика GTO тиристора, назвіть її основні робочі інтервали.

### 1.1.3.Транзистори

*Біполярний транзистор (БТ)* – напівпровідниковий прилад, що складається із двох послідовних *p-n*-переходів, робота якого заснована на використанні двох типів носіїв заряду (електронів та дірок). В залежності від порядку чергування напівпровідникових шарів із різним типом провідності (*р-* та *n -* типу) біполярні транзистори поділяють на дві основні групи: 1) *p-n-p*- типу; 2) *n-p-n*- типу.

 На рис. 1.9, *а*-*б* зображено найпростішу структуру транзисторів відповідно як *p-n-p*-типу, так і *n-p-n*-типу. Основний принцип роботи від типу біполярного транзистора не залежить, але тип транзистора визначає тип основних носіїв, що забезпечують протікання струму, і полярність напруг, що підключаються.

Рис. 1.9 Транзистори

а) – p-n-p-типу; б) – n-p-n-типу;

**Транзистори** – Напівпровідникові прилади, призначені для підсилення, генерування і перетворення електричних коливань. Найбільш поширені так звані біполярні транзистори. Їх основа – пластина монокристалічного напівпровідника (найчастіше кремнію або германію), в якій за допомогою особливих технологічних прийомів створені, як мінімум, три області з різною електропровідністю: емітер, база і колектор. Електропровідність емітера і колектора завжди однакова (р або n), бази – протилежна (n або р). Іншими словами, біполярний транзистор (далі просто транзистор) містить два р-n переходу: один з них з'єднує базу з емітером (емітерний перехід), інший – з колектором (колекторний перехід).

На схемах транзистори позначають, як показано на рис. 129, а. Тут коротка риска з лінією-висновком від середини символізує базу, дві похилі лінії, проведені до неї під кутом 60 °, – емітер і колектор. Про електропровідності бази судять по символу емітера: якщо його стрілка направлена до бази (рис. 129, а), то це означає, **емітер** має електропровідність типу р, а база – типу п; якщо ж стрілка спрямована в протилежний бік (рис. 129,6), електропровідність емітера і бази – зворотна. Оскільки, як уже зазначалося, електропровідність колектора та ж, що і емітера, стрілку на символі колектора не зображують.





Рис. 129

Знати електропровідність емітера, бази та колектора необхідно для того, щоб правильно підключити транзистор до джерела живлення. У довідниках цю інформацію приводять у вигляді структурної формули. Транзистор, база якого має провідність типу n, позначають формулою р-n-р, а транзистор з базою, що має електропровідність типу р, – формулою n-р-n. У першому випадку на базу і колектор слід подавати негативне (по відношенню до емітера) напругу, у другому – позитивну.

Для наочності умовне позначення транзистора зазвичай поміщають в гурток, що символізує його корпус. Корпус нерідко виготовляють з металу і з'єднують з одним з висновків транзистора. На схемах це показують точкою в місці перетину позбав-виводу з символом корпусу (у транзистора, зображеного на рис. 129, в, з корпусом з'єднаний висновок колектора). Якщо ж корпус забезпечений окремим висновком, лінію-вивід допускається приєднувати до гуртка без точки (рис. 129, г). З метою підвищення інформативності схем поруч з позиційним позначенням транзистора зазвичай вказують його тип.

Лінії-висновки, що йдуть від символів емітера і колектора, проводять в одному з двох напрямків: перпендикулярно або паралельно лінії-висновку бази (рис. 129, д). Злам цієї лінії допускається лише на деякому відстані від символу корпусу (рис. 129, е).

На позначення **одноперехідного транзистора** схоже умовне позначення досить великої групи транзисторів з р-п переходом, що одержали назву польових. Основа такого транзистора – створений в напівпровіднику і забезпечений двома висновками (витік і стік) канал з електропровідністю п-або р-типу. Опором каналу управляє третій електрод – затвор, з'єднаний з його середньою частиною р-п переходом. Канал польового транзистора зображують так само, як і базу біполярного транзистора, але поміщають в середній частині гуртка-корпусу, символи витоку і стоку приєднують до нього з одного боку, затвора – з іншого.



Рис. 133

В умовному позначенні **польового транзистора** з ізольованим затворам (його зображують у вигляді рисочки, паралельної символу каналу, з виведенням на продовженні лінії витоку) електропровідність каналу показують стрілкою, вміщеній між символами витоку і стоку: якщо вона спрямована до символу каналу, то це означає, що зображений транзистор з каналом п-типу, а якщо в протилежну сторону, – з каналом р-типу (рис. 133, а, б).



Рис. 135

В **палевому транзисторі** може бути кілька затворів. Зображують їх у цьому випадку короткими рисками, причому лінію-виведення першого затвора обов'язково поміщають на продовженні лінії витоку (мал. 133, ж).



Рис. 1.13 Основні характеристики БТ *p-n-p*-типу в схемі із спільним емітером:

*а)* вихідна  характеристика; *б)* вхідна характеристика.

Як і у випадку схеми із спільною базою, на вихідній характеристиці БТ (рис.1.13, *а*) в схемі із спільним емітером (рис.1.11, *а*) розрізняють три робочі зони:

I.             Область насичення (точки *С* та *В* на рис.1.13, *а* та рис.1.13, *б*);

II.          Область підсилення або активна зона (точка *А* на рис.1.13, *а* та рис.1.13, *б*), із зоною відсічки (точка D на рис.1.13, *а* та рис.1.13, *б*) за умови ;

III.       Область пробою.

Схема із спільним колектором (рис.1.11, *в*) має великий вхідний опір, проте дана схема не підсилює напругу. В даному режимі роботи транзистора коефіцієнт передачі по струму рівний  .

На сьогоднішній день існує дуже широка класифікація біполярних транзисторів, переважна більшість з яких створюються на основі кремнію. Біполярні транзистори класифікують як за потужністю (для малих, середніх, великих потужностей), так і за максимальною частотою роботи (низькочастотні і середньочастотні, високочастотні і надвисокочастотні).

Основним недоліком біполярних транзисторів є наявність явища вторинного пробою, що відсутній у польових транзисторів. Вторинний пробій лавиноподібно розвивається після первинного та характеризується швидким наростанням струму колектора і повною некерованістю, на відміну від польових транзисторів, що зберігають керуючі властивості аж до моменту пробою.

**До основних параметрів біполярного транзистора відносяться:**

 () – максимальна (максимальна імпульсна) розсіювана потужність;

 – максимальний струм колектора;

 – максимальний  імпульсний струм колектора;

 – максимальна  напруга колектор-емітер;

 – максимальна напруга колектор-база;

 – максимальна напруга емітер-база;

 – зворотній струм колектора;

 – зворотній струм емітера;

 – вхідний опір транзистора (при  по змінному струму);

 – вихідна провідність транзистора (при  по змінному струму);

 – коефіцієнт передачі по струму (при  по змінному струму);

 – максимальна частота коефіцієнта передачі по струму, при якій ;

 – ємність колекторного переходу;

 – ємність емітерного переходу;

Так як параметри  є загальновживаними в довідковій літературі, а також те, що даний параметр найчастіше приводиться для схеми із спільним емітером (), то зв’язок  із параметрами для схем із спільною базою ()  і  спільним колектором () виражається наступними формулами:

Зв’язок параметрів із напругами і струмами в певній схемі з’єднання має вигляд:

                                       (1.1)

Як приклад, в табл. 1.4  наведено параметри двох біполярних транзисторів *n-p-n*-типу.

*Таблиця 1.4*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   | **КТ603В** | **2N5831** |
| , мВт | 500 | 630 |
| , мА | 300 | 300 |
| , мА | 600 | – |
| , В | 15 | 140 |
| , В | 15 | 160 |
| , В | 3 | – |
| , мкА | 5 | 0,05 мкА |
| , мкА | 3 | – |
| , Ом | – | – |
| , мкСм | – | – |
| (, ) | 10...80 (2 В, 150 мА) | 80(5 B, 10мА) |
| , МГц | 200 | 100 |
| , пФ | 15 | 4 |
| , пФ | 40 | – |

*Польовий транзистор (ПТ)* – напівпровідниковий прилад робота якого заснована на модуляції опору напівпровідникового матеріалу поперечним електричним полем. В них використовується ефект зміни величини області просторового заряду (ОПЗ).

 Польові транзистори діляться на два основні класи:

1.        З керуючим *p-n*-переходом (ПТКП, англ. JFET);

2.        Із структурою метал-діелектрик-напівпровдник (МДН, англ. MOSFET), у якій затвор ізольований від робочого напівпровідника діелектриком.

Так як в якості діелектрика найчастіше використовують оксид кремнію, то МДН-транзистори також ще називають МОН-транзисторами.

На рис.1.14 зображено структуру *транзисторів з керуючим p-n-переходом.* Характерною особливістю таких польових транзисторів є те, що їх затвор  ізольований від каналу, що проводить струм, зворотнозміщеним *p-n*-переходом.

Рис. 1.14 Структура n-канального польового транзистора з керуючим p-n-переходом:

а) з одним керуючим електродом; б) з двома керуючими електродами.

Даний транзистор має один (рис. 1.14, *а*) або два (рис. 1.14, *б*) електроно-дірочних переходи, що зміщенні у зворотному напрямі. При зміні зворотної напруги на*p-n*-переході варіюється величина ОПЗ на межі *p*- та *n*-областей, а отже змінюється і опір каналу, по якому проходить керований  потік основних зарядів. Електрод, з якого в канал надходять основні носії заряду, називається *витоком*, а електрод в який із каналу витікають основні носії – *стоком*.  Електрод, що слугує для керування величиною каналу, називається *затвором*.

Польові транзистори, на відміну від біполярних, є уніполярними приладами. Канал провідності в польових транзисторах може бути як  *n*-, так і *p*-типу, що визначається типом основних носіїв заряду. Тому в залежності від типу каналу польові транзистори поділяють на транзистори з *n*- (рис.1.15, *а*) та *p*-провідністю (рис.1.15, *б*). Відповідно до типу провідності польового транзистора полярності напруги на *затворі*, *стоку* та *витоку* і напрямки струмів будуть протилежними.

Рис. 1.15 Умовне позначення польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом:

*а)*  *n*-типу; *б)*  *p*-типу.

На рис.1.16, *а-б*приведено основні характеристики польового транзистора *n*-типу з керуючим *p-n*-переходом. Для транзистора *р*-типу основні характеристики будуть симетричними до зображених на рис.1.16 відносно початку координат.

Рис. 1.16 Основні характеристики польового транзистора з керуючим p-n-переходом:

а) вихідна (стокова) характеристика; б) стоково-затворна характеристика.

Характерними особливостями польових транзисторів із керуючим *p-n*-переходом є наявність струму насичення або початкового струму стоку  (рис.1.16, *б*), за відсутності напруги  та при умові , а також наявність напруги відсічки , за якої канал провідності майже повністю перекривається і . Це пояснюється тим, що величина провідності каналу в польовому транзисторі з керуючим *p-n*-переходом окрім напруги  також залежить від величини струму стоку . Із  зростанням  при  ширина ОПЗ по всій площині напівпровідника збільшується нерівномірно, тобто при деякому значенні  буде більшою біля стоку аніж біля витоку (рис.1.14, *б*). І зрештою, за деякого значення  перетин каналу провідності біля стоку майже повністю замкнеться, тобто матиме найбільший опір. Таким чином найбільший струм  буде за найменшого опору  каналу провідності та відсутності керуючої напруги , а сам транзистор даного типу працює в режимі збіднення. Керуюча напруга  (рис.1.16, *б*) для польового транзистора *n*-типу не може мати великих позитивних  значень внаслідок загрози пробою.

Вихідна характеристика польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом (рис.1.16, *а*) характеризується наявністю трьох робочих областей:

I.             Лінійна (або омічна) область;

II.          Область насичення (або область підсилення);

III.       Область лавинного пробою.

В області I (рис.1.16, *а*), що починається від початку координат до точок ,  польовий транзистор представляє собою майже лінійно залежний від напруги  опір , що також регулюється напругою , та може використовуватись в ключовому режимі роботи.

В області II (рис.1.16, *а*), що починається від точок  до точок , опір  польового транзистора майже не залежить від значення напруги , так як відповідає випадку максимального звуження перетину каналу провідності біля стоку. В даному режимі польовий транзистор може використовуватися як підсилювач сигналів.

Із подальшим збільшенням напруги  відбувається збільшення падіння напруги біля горловини каналу провідності на фоні зростання електричного поля в каналі, що призводить до пробою (область III на рис.1.16, *а*).

**Основні переваги польових транзисторів з керуючим p-n-переходом:**

          менший рівень шуму ніж в біполярних транзисторах, особливо в області низьких частот, внаслідок уніполярності приладу, що дозволяє використовувати ПТ на частотах до сотень MГц;

          незначні зворотні струми через затвор (10 пA÷10 нA), що рівні зворотнім струмам зворотнозміщеного *p-n*-переходу, що дозволяє здійснювати керування за допомогою напруги (= 0,5÷10 В) при досить незначній потужності;

          великий вхідний опір (107÷109 Ом), що є опором зворотнозміщеного *p-n*-переходу;

          термостабільність, так як з ростом температури в польовому транзисторі збільшується опір , що призводить до зниження струму стоку.

**Основні недоліки польових транзисторів з керуючим p-n-переходом:**

          у порівнянні із біполярними транзисторами мають меншу крутизну вихідної характеристики в лінійній області, що є недоліком при роботі в ключовому режимі;

          залежність від температури (рис.1.16, *б*), так як присутні зміни струму стоку , крутизни вихідної характеристики та зворотного струму через затвор, і необхідність роботи близько до термостабільної точки (т. А на рис.1.16, *б*);

          наявність паразитних ємностей (≈1÷20 пФ), які треба враховувати, особливо при роботі в ключовому режимі.

На рис.1.17, *а-в* наведені основні схеми включення польових транзисторів.

Рис. 1.17 Основні схеми включення польових транзисторів:

а) із спільним витоком; б) із спільним затвором;

 в) із спільним стоком (витоковий повторювач)

Найбільш типовою для польових транзисторів є схема із спільним витоком (рис.1.17, *а*). Для схем з’єднання польових транзисторів із спільним витоком та спільним затвором (рис.1.17, *б*) на низьких частотах вихідний опір , а в схемі із спільним стоком (рис.1.17, *в*)– .

Вхідний опір в схемах із спільним витоком та стоком , а в схемі із спільним затвором – .

Крутизна на витоко-затворних характеристиках дорівнює

.

Максимальна крутизна будь-якого польового транзистора визначається згідно виразу .

Крутизну можна також обчислити використовуючи вираз

,

 де струм стоку рівний .

**До основних параметрів польового транзистора відносяться:**

 початковий  струм стоку;

 напруга відсічки;

 – максимальна напруга сток-витік;

 – максимальна напруга затвор-витік;

 – максимальна напруга затвор-сток;

 – максимальний стоковий струм;

 – максимальна розсіювана потужність;

 зворотній струм на затворі  за даної напруги сток-витік;

 – крутизна характеристики;

 – максимальна робоча частота;

 – вхідна (між затвором і стоком) ємність;

 – вихідна (між стоком та витоком) ємність;

 – прохідна (між затвором та витоком) ємність;

Як приклад, в табл. 1.5  приведено параметри двох польових транзисторів з керуючим *p-n*-переходом і каналом *n*-типу.

*Таблиця 1.5*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   | КП307Г | BFQ10 |
| , мА | 8…24 | – |
| , В | 1,5…6 | 3.5 |
| , В | 25 | 30 |
| , В | 30 | – |
| , В | 30 | 30 |
| , мА | 25 | 10 |
| , мВт | 250 | 250 |
| (, В), нА | 1 (-10) | 0,1 (–) |
|  (, В), мА/В | 6…12 (10) | 1 (–) |
| , МГц | – | – |
| , пФ | 5 | 8 |
| , пФ | 1,5 | – |
| , пФ | – | – |

На рис.1.18, *а-б* зображено основні структури *MOSFET-транзисторів*. Характерною особливістю польових *MOSFET*-транзисторів перед польовими транзисторами із керуючим *p-n*-переходом є наявність тонкого слою діелектрика між електродом затвора і робочою зоною напівпровідникового приладу, що забезпечує ще більший вхідний опір (1010÷1014 Ом).

Рис. 1.18 Структурні схеми n-канальних МДН-транзисторів:

а) із наведеним каналом провідності; б) із вбудованим каналом провідності

Усі MOSFET-транзистори поділяються на два основні класи:

1.        Із наведеним каналом;

2.        Із вбудованим каналом.

Як і польові транзистори із керуючим *p-n*-переходом усі *MOSFET*-транзистори також поділяються як на *n*-, так і *p*-типу, що визначається типом каналу, який наводиться або вбудований в підложку протилежного типу провідності.

На рис.1.19, *а* та  *б*  наведено основні вольт-амперні характеристики *MOSFET-транзистора n-типу з наведеним каналом.*

Рис. 1.19 Основні характеристики MOSFET-транзистора із наведеним каналом n-типу:

а) вихідна (стокова) характеристика; б) стоково-затворна характеристика.

В *MOSFET*-транзисторах із наведеним каналом при наявності напруги  та відсутності керуючої напруги () струм стоку майже нульовий  і зростає тільки починаючи з певного значенні напруги затвор-витік  (рис.1.19, *б*). В даному типі транзисторів по мірі росту напруги затвор-витік (при ) за рахунок ефекту поля під поверхнею діелектрика у підложці утворюється збіднена на основні носії область, а трохи глибше ОПЗ. Із подальшим ростом керуючої напруги () на поверхні напівпровідника під затвором утворюється інверсійний прошарок (рис.1.18, *а*), що і є каналом провідності. Як і у випадку із транзисторами з керуючим *p-n*-переходом у даних транзисторах напруга на затворі  рівномірно регулює глибину каналу провідності та ОПЗ, а значення струму стоку  – збільшує ширину каналу від стоку до витоку. За деякого значення  та напруги  (рис.1.19, *а*) канал провідності біля сильнолегованої області стоку перекривається і струм стоку досягає значення насичення, тобто опір каналу стає максимальним і майже не змінюється . Тобто *MOSFET*-транзистор працює в режимі збагачення.

Як і транзистори із керуючим *p-n*-переходом *MOSFET*-транзистори із наведеним каналом на вихідній характеристиці (рис.1.19, *а*) мають омічну область (область I), область насичення (область II) та область лавинного пробою (область III). Основні параметри *MOSFET*-транзисторів відрізняються від основних параметрів польових транзисторів тільки відсутністю .

 На рис.1.20, *а-б* приведено умовні позначення МДН-транзисторів із наведеним каналом.

Рис. 1.20 Умовне позначення MOSFET-транзистора із наведеним каналом:

а)   n-типу; б)  p-типу

На рис.1.21, а-б наведено основні вольт-амперні характеристики  *MOSFET-транзистора n-типу із вбудованим каналом.*

Рис. 1.21 Основні характеристики MOSFET-транзисторів із вбудованим каналом:

а) – вихідна (стокова) характеристика; б) стоково-затворна характеристика.

В *MOSFET*-транзисторах із вбудованим каналом за відсутності напруги затвор-виток () як і в транзисторах із керуючим *p-n*-переходом присутній початковий струм стоку , наявність якого пояснюється провідністю вбудованого каналу. В випадку *MOSFET*-транзистора із вбудованим каналом *n*-типу (рис.1.18,*б*) зменшення напруги на затворі () призводить до виводу електронів із каналу провідності і збільшення ОПЗ. Відбувається процес збіднення і вже при досягненні  канал провідності транзистора майже повністю перекривається, тобто . І навпаки, з зростом напруги на затворі () канал провідності збагачується основними носіями заряду.

 На рис.1.22, *а-б* приведено умовні позначення *MOSFET*-транзисторів із вбудованим каналом.

Рис. 1.22 Умовне позначення MOSFET-транзистора із вбудованим каналом:

а)  n-типу; б)  p-типу

За призначенням усі *MOSFET*-транзистори можна поділити на:

1.        Малопотужні інтегральні транзистори, що використовуються в мікроелектроніці;

2.        Малопотужні дискретні  транзистори для підсилення, генерації і комутації;

3.        Потужні транзистори для роботи в перетворювачах та підсилювачах.

**Серед основних переваг MOSFET-транзисторів порівняно з польовими транзисторами  із керуючим p-n-переходом слід відзначити:**

          практична відсутність зворотних струмів через ізольований затвор (≥1 пA);

          ще більший вхідний опір (1010÷1014 Ом), що забезпечується діелектриком;

          ще більші робочі частоти (до ~2 ГГц);

          більша крутизна вихідної характеристики (5÷40 мА/В);

          можливість створення на базі *MOSFET*-транзисторів із наведеним каналом комутуючих елементів для великих потужностей;

          у випадку використання *MOSFET*-транзисторів із наведеним каналом, можливість використання однополярних імпульсів керування.

**До основного недоліку MOSFET-транзисторів** відноситься підвищений рівень шумів, внаслідок процесів на межі напівпровідник-діелектрик, тобто Si-SiO2).

Нижче в табл.1.6 наведено параметри двох *MOSFET*-транзисторів транзисторів із наведеним та двох *MOSFET*-транзисторів із вбудованим каналом.

*Таблиця 1.6*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   | із наведеним*р*-каналом | з вбудованим*n*-каналом |
|   | КП301Б | 2N3882 | КП305Д | 3N98 |
| , В | 2,7…5,4 | 3 | 6 | 6 |
| , В | 20 | 30 | 15 | 32 |
| , В | – | – | ±15 | – |
| , В | 30 | 20 | ±15 | 6 |
| , мА | 16 | 30 | 15 | 15 |
| , мВт | 200 | 200 | 150 | 150 |
| (, В), нА | 0,3 | 25 (–) | 1 | – |
|  (, В), мА/В | 1 (15) | 1…25 (–) | 5,2...10,5 (10) | 1…3 (–) |
| , МГц | 100 | – | 250 | – |
| , пФ | 3,5 | 3 | 5 | 7 |
| , пФ | 1 | – | 0,8 | – |
| , пФ | 3,5 | – | – | – |
| , мА |   | – | 7,7 |

На рис.1.23, *а* зображено структуру *потужного MOSFET-транзистора із наведеним n-каналом* (англ. **POWFET** або **POWER MOSFET**), що має вертикальну структуру. Умовні позначення потужних *MOSFET*-транзисторів із наведеним каналом приведені на рис.1.23, *б-в*.

Рис. 1.23 Потужний MOSFET-транзистор із наведеним каналом:

а) структура транзистора; б) умовне графічне позначення транзистора n-типу;

в) умовне графічне позначення транзистора p-типу

За принципом дії даний тип транзисторів подібний до *MOSFET*-транзисторів із наведеним *n*-каналом, за винятком конструктивних особливостей побудови, що пов’язані із великою потужністю (на кристалі площею 1 см2 вміщується та паралельно з’єднується до 800 000 таких транзисторів). При прикладенні до такого *n*-канального транзистора (рис.1.23, *а*) напруги сток-витік  і прикладенні до керуючого електроду позитивної напруги в *р-*-зоні *р*-прошарку, між сильно та слабо легованою *n*-зонами, утворюється інверсійний канал, через який основні носії (електрони) від витоку надходять до дрейфової *n-*-зони, через яку вони дрейфують до вільної від заряду *n+*-зони, а звідти до стоку. Тобто потужний вертикальний *MOSFET*-транзистор, як і звичайний польовий транзистор, є уніполярним приладом.

Потужні вертикальні *MOSFET*-транзистори із наведеним каналом мають вихідну вольт-амперну характеристику (рис.1.24, *а*) подібну до вихідної характеристики горизонтальних аналогів, проте стоково-затворна характеристика (рис.1.24, *б*) у даного типу транзисторів найчастіше більш лінійна та є симетричною відносно центру лінійної ділянки ().

Рис. 1.24 Основні характеристики потужних MOSFET-транзисторів із наведеним каналом:

а) вихідна (стокова) характеристика; б) стоково-затворна характеристика.

Завдяки малій зміні крутизни характеристики (максимум ±20%) ці транзистори можливо підключати паралельно із рівномірним розподілом струму між ними. При цьому можна суттєво збільшити максимальний струм комутації, а саме паралельне з’єднання розглядати як *MOSFET*-транзистор із сумарною крутизною  та новим током насичення .

Однак при цьому неодмінно треба враховувати, що зростає сумарна паразитна ємність, яка обов’язково збільшить час переключання. Для реалізації мінімального часу (~20÷30 нс) переключання даний тип транзисторів повинен працювати від генераторів, що мають малий вихідний опір.

За сукупністю частотних, часових та енергетичних параметрів потужні *MOSFET*-транзистори із наведеним каналом переважають над потужними біполярними транзисторами, проте поступаються біполярним транзисторам із ізольованим затвором (БТІЗ, англ. IGBT), що розвилися на базі цих же потужних *MOSFET*-транзисторів.

**Основні переваги потужних MOSFET-транзисторів із наведеним каналом:**

          великі комутуючі потужності;

          невеликий опір у ввімкненому стані (при напрузі сток-витік до  та струмі стоку не більше );

          невелику потужність, що використовується для управління;

          відносно висока швидкодія у випадку використання одного транзистора (комутація струму 20 А за час ~70÷100 нс);

          можливість керування однополярними імпульсами.

**Основні недоліки потужних MOSFET-транзисторів із наведеним каналом:**

          значне зростання опору на транзисторі у відкритому стані при зростаючих значеннях напруги сток-витік >300 B;

          наявність в конструкції даних транзисторів паразитного діода сток-витік на межі *р+*-*n-*, який вносить додаткові втрати потужності у відкритому стані.

В табл.1.7. приведено основні параметри потужних *MOSFET*-транзисторів із наведеним каналом.

*Таблиця 1.7*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   | **КП744А** | **IRF520A** |
| , В | 2…4 | 2…4 |
| , В | 100 | 100 |
| , В | – | – |
| , В | 20 | 20 |
| , А | 9,2 | 8 |
| , Вт | 60 | 40 |
| (, В), нА | – | 100 |
|  (, В), мА/В | – | 2700 |
| , МГц | – | – |
| , пФ | – | 370 |
| , пФ | – | 38 |
| , пФ | – | 95 |

*Біполярний транзистор з ізольованим затвором (БТІЗ, англ. IGBT)*– це повністю керований напівпровідниковий прилад, що є розвитком технології силових MOSFET і суміщає в своїй структурі потужний *MOSFET*-транзистор із наведеним каналом та вихідний біполярний каскад (рис.1.25, *а*). Тому структура БТІЗ (рис.1.25,*б*) дуже подібна до структури потужних МДН-транзисторів із наведеним каналом (потужних MOSFET) і відрізняється від останніх наявністю зони перед колектором після дрейфової зони. Ввімкнення або вимкнення БТІЗ виконується подачею і знаттям напруги між затвором і витоком *MOSFET*-транзистора всередині структури (рис. 1.25, *а*).

Рис. 1.25 Біполярний транзистор з ізольованим затвором БТІЗ (IGBT):

*а)*схематичне представлення IGBT у вигляді потужного МДН-транзистора і БТ;

*б)*традиційна структура біполярного транзистора з ізольованим затвором (IGBT);

*в-г)*умовні графічні позначення БТІЗ (IGBT)

Умовно БТІЗ позначають одним із двох способів (рис.1.25, *в-г*). Як і в потужних МДН-транзисторах із наведеним каналом, в момент включення БТІЗ, тобто при подачі на колектор  та на затвор  позитивної відносно емітера полярності напруги, в слаболегованій зоні створюється інверсний канал провідності крізь який електрони від емітера потрапляють в дрейфову зону і надходять до області перед колектором. Надходячи в сильно леговану позитивну область, електрони створюють умови для інжектування дірок із зони в зону. Інжектовані дірки проходячи крізь дрейфову зону будуть надходити до зони емітера і потім безпосередньо в сам емітер.

 Таким чином процес відмикання біполярного транзистора можна розділити на два етапи: відкриття потужного MOSFET всередині структури БТІЗ та наступне за цим виникнення струму між колектором і емітером (відкриття біполярного транзистора в структурі БТІЗ).

Основні характеристики біполярного транзистора з ізольованим затвором (рис.1.26, *а-б*) схожі із характеристиками потужного *MOSFET*-транзистора та мають більш круту область насичення.

Рис. 1.26 Основні характеристики біполярного транзистора

 з ізольованим затвором (БТІЗ) p-n-p-типу:

а) вихідна  характеристика; б)  перехідна характеристика.

По аналогії із вихідною характеристикою біполярних транзисторів, вихідна характеристика БТІЗ також має 3 робочі зони:

I.             Область насичення, в яку БТІЗ переключається при відкриванні (точка *А*на рис.1.26, *а*);

II.          Область підсилення, в якій використовується лише зона відсічки при запиранні даного транзистора (точка *В* на рис.1.26, *б*);

III.       Область лавинного пробою.

**Структура БТІЗ дозволяє сумістити найкращі переваги як БТ так і *MOSFET-*транзистора:**

          високий вхідний опір транзистора при значному струмі навантаження;

          дуже малий опір даного типу транзистора у ввімкненому стані, внаслідок насичення високоомної *n--*зони транзистора основними носіями;

          відсутність явища вторинного пробою, що характерне для БТ;

          велика частота комутації (до 50 кГц);

          незначні втрати на комутацію дуже великих потужностей;

**Основними недоліками біполярних транзисторів з ізольованим затвором є:**

          більший час при закритті („хвіст” струму колектора) аніж при відкритті, внаслідок зворотного збіднення дрейфової зони на електрони;

          необхідність використання додаткових ланцюгів перемикання при частотах більше 10-20 кГц та при номінальних струмах більше 100 А;

На сьогоднішній день  біполярні транзистори з ізольованим затвором використовуються в різних силових схемах виключно в ключовому режимі і можуть комутувати напруги від сотень вольт  до декількох кіловольт та струми від десятків ампер до декількох кілоампер. Для БТІЗ з номінальними напругами в діапазоні 600-1200 В падіння напруги на транзисторі в повністю відкритому стані складає усього 1,5-3,5 В, що набагато менше аніж для потужних *MOSFET-*транзисторів із наведеним каналом, працюючих на цих же напругах. Потужні ключі випускаються у вигляді IGBT-модулів, що місять два або більше транзистора, з’єднаних паралельно, та різноманітні додаткові ланцюги (захисту, керування, тощо).

**Внаслідок конструктивних особливостей БТІЗ перед звичайними БТ, даний тип транзисторів має деякі відмінності в основних характеристиках:**

          максимальний постійний струм колектора ;

          максимальний імпульсний струм колектора ;

          максимальна напруга колектор-емітер ;

          максимальна розсіювана потужність ;

          пробивна напруга колектор-емітер  та колектор-база ;

          напруга колектор-емітер насичення ;

          порогова напруга на затворі ;

          струм колектора при нульовому значенні напруги на затворі ;

          заряди на затворі  (сумарний),  (база-емітер), (база-колектор);

          час затримки ввімкнення  та вимикання ;

          час наростання та спадання  фронту

В табл. 1.8 приведені основні параметри для двох БТІЗ.

*Таблиця 1.8*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   | КП731А | IRG4PH40U |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image109.gif, А | 40 | 41 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image110.gif, А | 80 | 82 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image133.gif, В | 600 | 1200 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image107.gif, Вт | 160 | 160 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image217.gif, В | 600 | 1200 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image229.gif, В | – | – |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image219.gif, В | 3 | 2,5…3 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image220.gif,В | 5,5 | 3…6 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image230.gif, мкА | 250 | 2…250 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image222.gif, нКл | 80 | 86 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image231.gif, нКл | 10 | 13 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image232.gif, нКл | 42 | 29 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image233.gif, нс | 26 | 24 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image234.gif, нс | 240 | 220 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image227.gif, нс | 37 | 24 |
| ftp://fel.kpi.ua/pub/books/EE/part1/images/image228.gif, нс | 230 | 180 |

**Контрольні питання**

1.        Назвіть основні напівпровідникові області біполярного транзистора.

2.        Назвіть робочі режими біполярного транзистора.

3.        Які із режимів роботи використовуються для підсилення сигналу, а які використовуються у ключовому режимі?

4.        Які основні схеми включення біполярних транзисторів в схему. Які є найбільш використовуваними?

5.        В яких схемах включення визначається коефіцієнт передачі по струму α та β, і як вони взаємопов’язані?

6.        Яка із схем включення біполярного транзистора має найкращі показники по підсиленню струму?

7.        Яка із схем включення має найкращі частотні показники передачі сигналу? Який вхідний опір даної схеми?

8.        Що є основним недоліком біполярних транзисторів?

9.        Що відбувається із вхідними характеристиками при зміні температури в схемах включення біполярного транзистора із спільним емітером та базою

10.   Назвіть основні типи польових транзисторів. Коротко опишіть принцип роботи цих типів польових транзисторів?

11.   Які основну конструктивну відмінність мають польові транзистори перед біполярними? Що досягається за рахунок цієї відмінності?

12.   Назвіть робочі режими польового транзистора. Які з цих режимів використовуються при підсиленні, а які в ключовому режимі роботи?

13.   Як зміниться стоково-затворна характеристика із підвищенням або зменшенням температури? Назвіть способи уникнення температурної нестабільності.

14.   Чи є небезпечними для польових транзисторів підвищення температури?

15.   Назвіть основні переваги та недоліки усіх польових транзисторів.

16.   Які існують схеми включення польового транзистора в схему? Які є найбільш використовуваними?

17.   Які типи МДН-транзисторів існують? Які їх конструктивні особливості?

18.   Які відмінності між вольтамперними характеристиками цих типів МДН-транзисторів?

19.   Які переваги польових МДН-транзисторів перед польовими транзисторами із керуючим *p-n*-переходом? Назвіть основний МДН-транзистора.

20.   Назвіть конструктивні відмінності будови потужних МДН-транзисторів від звичайних польових МДН-транзисторів.

21.   Чим характерна стоково-затворна характеристика даних транзисторів?

22.   Що досягається паралельним з’єднанням потужних МДН-транзисторів? Що при цьому треба враховувати?

23.   До яких значень напруг та струмів доцільно використовувати потужні МДН-транзистори?

24.   Назвіть основні переваги та недоліки МДН-транзисторів.

25.   Що конструктивно та функціонально відрізняє БТІЗ від потужного МДН-транзистора?

26.   Як можна умовно представити БТІЗ?

27.   Які робочі зони має БТІЗ?

28.   Які найкращі переваги біполярного та потужного польового транзистора в собі суміщає БТІЗ?

29.   Який діапазон роботи БТІЗ?