

1. ЗАДАЧІ ТВЕРДОТІЛОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Одні електронні пристрої на напівпровідникових структурах сходять з історичної арени, інші - лише розпочинають свій триумфальний похід. Так, наприклад, сучасний комп'ютер складається з електровакуумного приладу (кінескоп), твердотілих елементів (транзистори, мікросхеми тощо) та мікропроцесора, який найближчим часом може бути реалізований на біочіпах.

Біомедична електроніка випадає з переліку класичної фізичної електроніки, оскільки вивчає фізичні ефекти в неживій і живій природі, які є основою нових класів електронних приладів. Особлива увага при використанні біологічних матеріалів електроніки (білки, ферменти, віруси, мікроби) приділяється технології виготовлення біопристроїв, оскільки це потребує складної апаратури, високих температур та виконання умов високої стерильності.

Основна задача твердотілої електроніки – мікромініатюризація та мінімальні топологічні розміри (МТР). За величиною МТР сучасну інтегральну електроніку поділяють на:

- мікроелектроніку (максимальне значення габаритних розмірів мікроелементів $h = 0,25 - 1,0$ мкм);
- субмікронну електроніку ($h = 0,75 - 1,0$ мкм);
- наноелектроніку (h - менше 100 нм).

Виготовлення пристроїв з такими габаритними розмірами мікроелементів потребує особливих видів технологій. На сьогодні до базових технологічних процесів слід віднести:

- стандартні планарно - епітаксійні процеси з використанням роздільної дифузії;
- КІД - технологія (колекторна ізолююча дифузія);
- БІД - технологія (базова ізолююча дифузія);
- Декаль - технологія (ізоляція повітряними зазорами);
- КНД – технологія (ізоляція матеріалом підкладки).

З підвищенням рівня мікромініатюризації домінуюче положення в мікроелектроніці займають МДН- та МОН – структури, базовим активним елементом якого виступає транзистор. Інерційність фізичних процесів в ньому обумовлена дифузією, дрейфом та рекомбінацією нерівноважних носіїв заряду, а також перезарядкою бар'єрної ємності. У цьому випадку при розробці ВЧ- та НВЧ - приладів необхідно "зжимати" до мінімуму прольотні відстані, а також зменшувати вклад паразитних RC- параметрів, що досягається зменшенням площі структури. Таким чином, мікромініатюризація в цілому сприяє підвищенню граничних частот активних елементів, а це вимагає використання нових літографічних процесів з короткохвильовим діапазоном УФ – і рентгенівського випромінювання.

2. ДІОДНІ СТРУКТУРИ

2.1 Класифікація та система позначень діодів

Напівпровідникові діоди – це електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом та двома виводами.

Залежно від області використання розрізняють випрямлювальні, універсальні (високоомні), імпульсні, надвисокочастотні, тунельні обернені діоди, варикапи, стабілітрони, фото- та світлодіоди. За типом переходу розрізняють площинні та точкові діоди. Площинні діоди мають *p-n*-перехід, лінійні розміри якого, що визначають площу переходу, значно перевищують його товщину. До точкових належать діоди, лінійні розміри переходу яких менші товщини запірного шару.

Система позначень діодів, прямий струм яких не перевищує 10А, згідно з ГОСТ 10862-72 має 6 елементів.

Перший елемент – літера або цифра, яка визначає вихідний матеріал виготовлення. При цьому літера вживається для приладів, які призначено до використання в пристроях широкого застосування, а цифра – для діодів у пристроях спеціального застосування. Наприклад, Г або І –германій або сполуки, К або 2 –кремній або його сполуки, А або 3 –сполуки галію.

Другий елемент – літера, яка визначає підклас приладу. відрізняється від попередньої третім, четвертим та п'ятим елементами згідно з таблицею 4.1. Наприклад, Д- випрямлювальний, імпульсний або універсальний діод, С- стабілітрони, В – варикапи, ФД –фотодіоди, Л – світлодіоди, И(І) – тунельні, або обернені, діоди.

Третій елемент – цифра від 1 до 9, що вказує на призначення приладу.

Четвертий та п'ятий елементи (від 01 до 99) - порядковий номер розробки.

Шостий елемент – літера від А до Я - вказує на параметричну групу технологічного типу.

Стабілітрони мають свою особливу систему позначень (таблиця 2.1) .

Система позначень діодів, розроблених до 1964 р., має два або три елементи. Перший елемент – літера Д. Другий елемент – цифра, що вказує на класифікаційну групу діодів. Третій елемент – літера, що характеризує різновид діода в даній групі.

Таблиця 2.1

Елемент позначення	Напруга стабілізації		
	$U_{ст} < 19В$	$10В < U_{ст} < 99В$	$100В < U_{ст} < 199В$
Третій елемент: $P_{\max} \leq 0,3Вт$	1	2	3
$0,3Вт < P_{\max} \leq 5Вт$	4	5	6
$5Вт < P_{\max} \leq 25Вт$	7	8	9
Четвертий та п'ятий елементи	Від 01 до 99 (четвертий елемент вказує на ціле число, а п'ятий – на десяті частки напруги стабілізації)	Від 10 до 99 (позначають номінальну напругу стабілізації у вольтах)	Від 00 до 99 (позначають різницю між напругою стабілізації та 100В)

2.1.1 Випрямлювальні діоди

Випрямлювальні діоди (ВД) призначені для випрямлення змінного струму і складають найбільш поширений підклас діодів. Залежно від значення середнього випрямленого струму розрізняють:

ВД малої потужності ($I_{всер} \leq 0,3А$; третій елемент позначень – 1);

ВД середньої потужності ($0,3А < I_{всер} \leq 10А$; третій елемент позначень – 2); ВД силової ($I_{всер} > 10А$).

Робочі частоти ВД малої та середньої потужностей не

перевищують 20 кГц, силові діоди працюють на частоті 50Гц.

Оскільки допустима густина струму через p - n -перехід $j_{np,фч} \leq 2А/мм^2$, то для одержання названих значень $I_{всер}$ використовують площинні p - n -переходи, виготовлені сплавним або дифузійним способом. Велика ємність таких переходів не впливає істотно на роботу ВД у названому діапазоні частот.

З метою стабілізації параметрів ВД під час дії на них вологості, атмосферного тиску, забруднення, зміни температури діоди поміщають у металево-керамічний або металево-скляний корпус, який забезпечує ефективно відведення теплоти, що виділяється на p - n -переході.

У ВД малої потужності тепло розсіюється безпосередньо корпусом (діод 2Д207, КД108, Д226 тощо). У ВД середньої потужності тепло відводиться масивним гвинтом, за допомогою якого діод прикріплюється до шасі апаратури, яка виконує функцію радіатора. З метою запобігання електричного контакту між діодом і корпусом застосовують різноманітні ізоляційні прокладки, а також шайби з високою теплопровідністю. До таких діодів належать, наприклад, 2Д216, КД203, Д231. Для силових діодів потрібне примусове повітряне охолодження або таке що здійснюється спеціальними радіаторами.

Згадані діоди здатні випрямляти змінний струм порівняно невисокої напруги (до 500-700В). З метою випрямлення більш високої напруги використовують послідовне з'єднання діодів у спеціальних випрямлювальних стовпах та блоках, що виготовляються в уніфікованих корпусах і мають елемент позначення - літеру Ц.

ВАХ кремнієвих та германієвих діодів відрізняються одна від одної (рисунок 2.1).

Оскільки ширина ЗЗ у кремнію більша, ніж у германію, то зворотний струм германієвого діода більший, ніж кремнієвого при однакових конструкції та потужності. Повна відсутність ділянки насичення на зворотній гілці ВАХ кремнієвого діода пояснюється у п.3.1.3. У зв'язку з більшим $I_{3в}$ у германієвих діодів більш імовірний пробій у кремнієвих – лавинний.

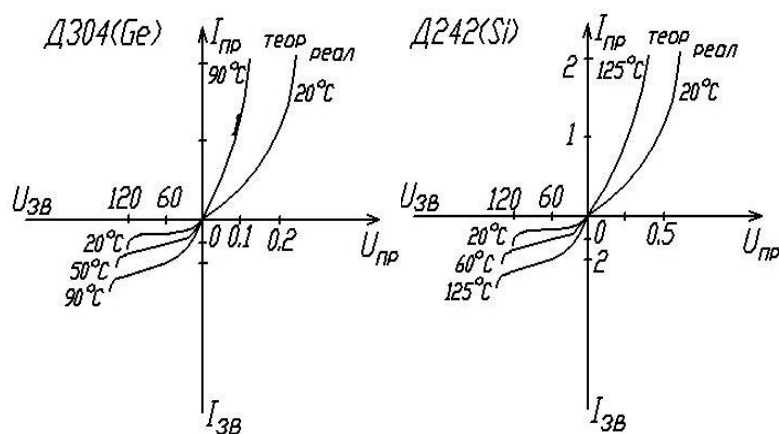


Рисунок 2.1. ВАХ випрямлювальних діодів

Для області малих значень U_{np} рівняння теоретичної ВАХ (2.19) під час використання перших двох членів розкладення в ряд Тейлора функції $\exp(U_{np} / \varphi_T)$ набуває вигляду:

$$I_{np} = I_s \frac{U_{np}}{\varphi_T}. \quad (2.1)$$

З (2.1) випливає, що крутизна прямої гілки ВАХ $S = \frac{dI_{np}}{dU_{np}}$ пропорційна до зворотного струму. Тому в германієвих діодів крутизна характеристики при малих U_{np} більша. Крім того, оскільки зворотний струм кремнієвого діода менший, його прямий струм, що і в германієвого діода, досягається при більших прямих напругах. Тому потужність, що розсіюється при однакових струмах, у германієвих діодів менша, ніж у кремнієвих.

Струм насичення і струм генерації діодів істотно залежать від температури навколишнього середовища. Для струму насичення справедлива при температурі T рівність:

$$I_s(T) = I_s(T_0)e^{(T-T_0)/a}, \quad (2.2)$$

де $I_s(T_0)$ – струм насичення при температурі T_0 ;

$a=0,09$ 1/К – для германію;

$a = 0,13$ 1/К – для кремнію.

Для приблизної оцінки можна вважати, що при зростанні температури на 10°C зворотний струм германієвих діодів збільшується вдвічі, а кремнієвих – в 2,5 рази. Незважаючи на те, що швидкість зростання I_{ze} кремнієвих діодів зі збільшенням температури більша, абсолютний температуру значно більший. Ця обставина призводить до того, що при збільшенні температури значення зворотної напруги, за якої відбувається тепловий пробій германієвих діодів, зменшується. В кремнієвих діодах, навпаки, зі зростанням температури пробій напруги лавинного пробою збільшується.

Це пояснюється тим, що в кремнію з підвищенням температури зростає теплове розсіювання рухомих носіїв, зменшується довжина їх вільного пробігу, і для того, щоб електрон протягом меншого шляху набув кінетичної енергії, достатньої для іонізації нейтральних атомів, треба мати більш прискорювальне поле.

Параметри випрямлювальних діодів

До цих параметрів належать:

постійна U_{np} , вимірена при даному постійному I_{np} ;

постійний I_{ze} , вимірений при даній постійній U_{ze} ;

середнє значення випрямленого струму $I_{всер}$ - усереднюється за період;

прямий R_{np} та зворотний R_{ze} опори діода при даних U_{np} та U_{ze} ;

диференційний опір діода $r_g = dU / dI$;

максимально допустима зворотна напруга $U_{ze\max}$;

максимально допустимий середній прями́й струм $I_{np\,сep\,max}$;

максимально допустима середня розсіювана потужність $P_{сep\,max}$ тощо.

Схема однопівперіодичного випрямляча з активним навантаженням допускає середню розсіювану потужність $P_{сep\,max}$ тощо. В цій схемі струм через діод та опір навантаження протікає тільки за час дії половини періоду змінної напруги U_2 . Як бачимо з рисунка 2.2, такий струм має пульсуючий характер і протікає в одному напрямку, змінюючись за величиною від максимального значення I_{2m} до нуля.

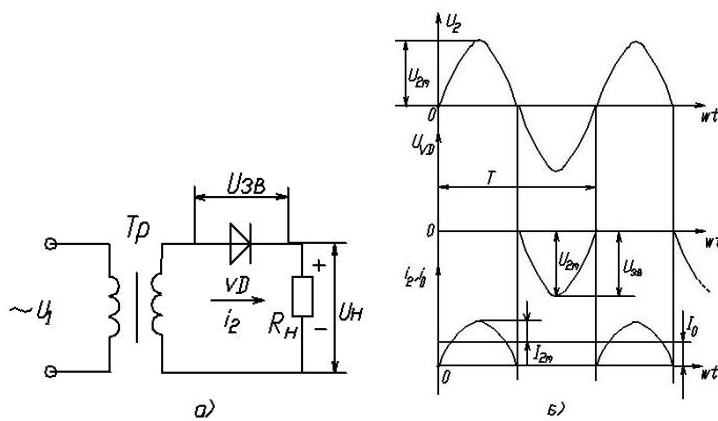


Рисунок 2.2 – Однопівперіодний випрямляч: а-схема випрямляча; б-графіки струмів і напруг

Показана на рис.2.2 б постійна складова випрямленого струму I_0 являє собою значення струму, який проходить за період через опір навантаження R_H . Користуючись графіком (рис. 2.2 б), можна записати рівність

$$I_0 T = \int_0^{\frac{T}{2}} i_2 dt \quad (2.3)$$

Якщо струм i_2 змінюється за синусоїдальним законом

$$i_2 = I_{2m} \cdot \sin wt, \text{ тоді}$$

$$\text{Звідки } I_0 = \frac{2I_{2m}}{\pi} = \frac{I_{2m}}{\pi} = 0,318I_{2m}. \quad (2.4)$$

Постійну складову випрямленої напруги U_0 на опорі R_H можна знайти за законом Ома

$$U I_2 T = \int_0^{\frac{T}{2}} I_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot dt = I_{2m} \frac{\cos \omega t}{\omega} \Big|_0^{\frac{T}{2}} = 2 \frac{I_{2m}}{\omega} \cdot 0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H, \quad (2.5)$$

де $I_{2m} R_H = U_{2m}$,

тоді $U_0 = 0,318 U_{2m} = \frac{U_{2m}}{\pi}$.

Якщо замінити $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, отримаємо

$$U_0 = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \approx 0,45 U_2 \quad (2.6)$$

Якщо напруга мережі U_1 відома, то коефіцієнт трансформації трансформатора T_r , повинен дорівнювати

$$n = U_2 / U_M. \quad (2.7)$$

Із розглянутої роботи схеми випливає, що у від'ємний півперіод діод знаходиться під напругою, яка діє на зажимах вторинної обмотки трансформатора, тому найбільша зворотна напруга, прикладена до діода, дорівнюватиме

$$U_{зв} = U_{2m} = 3,14 U_0 \quad (2.8)$$

Підбираючи діод для роботи в однопівперіодній схемі, необхідно стежити за тим, щоб

$$U_{зв. доп.} \geq U_{зв} = 3,14 U_0 \quad (2.9)$$

де $U_{зв. доп.}$ – максимальна допустима зворотна напруга вибраного діода

Якщо нерівність (2.9) не виконується, необхідно або взяти ільш високою допустимою напругою, або ввімкнути кілька однотипних діодів послідовно. Кількість послідовдіод із бно з'єднаних діодів розраховується за формулою $k = U_{зв} / U_{зв. доп.}$, при цьому струм

$$I_{сер} \leq I_{сер. доп.} \geq I_0 \quad (2.10)$$

Якщо нерівність (2.10) не виконується, то необхідно підібрати діод з більш високим значенням $I_{сер. доп.}$ або ввімкнути кілька однотипних діодів паралельно один до одного.

Кількість діодів розраховують з формули

$$m = I_0 / I_{\text{сер. доп}} \cdot \quad (2.11)$$

2.1.2 Напівпровідникові стабілітрони

Стабілітронами називають діоди, які призначені для стабілізації рівня напруги в електронних схемах. З цією метою використовують діоди, ВАХ яких має ділянку зі слабкою залежністю напруги від струму, що проходить. Як стабілітрони використовують площинні кремнієві діоди, на зворотній гілці ВАХ яких ділянка стабілізації створюється внаслідок лавинного або тунельного пробію.

Низьковольтні стабілітрони ($U_{\text{см}} < 6\text{В}$) виготовляють із сильнолегованого кремнію (з великими концентраціями N_A та N_D), p - n -перехід у них вузький, у ньому тунельний пробій відбувається при невеликих напругах. Стабілітрони з $U_{\text{см}} > 8\text{В}$ виготовляють з малою концентрацією домішок, p - n -перехід у них широкий, і в ньому більш імовірним є лавинний пробій.

Концентрація домішок впливає не лише на величину $U_{\text{проб}}(U_{\text{см}})$, а й на зміну

ВАХ. При напругах стабілізації від 6 до 8 В у стабілітронах може бути як лавинний, так і тунельний пробій.

Для стабілітронів з малою концентрацією домішок зростання температури спричинює збільшення числа вільних носіїв заряду і зменшення їх рухомості. Тому в таких стабілітронах при зростанні температури розвиток лавиноподібного процесу розмноження носіїв унаслідок ударної іонізації почнеться при більшій зворотній напрузі, тобто $U_{\text{проб}}$ збільшується. Такий випадок показано на рисунку 2.3.

У низьковольтних стабілітронах (з великою концентрацією домішок) зі зростанням температури зменшується ширина ЗЗ, зростає ймовірність тунельного пробію (переходу носія з ЗЗ однієї області в ЗП іншої області), який і відбувається при менших напругах, ніж це було при початковій температурі, тобто $U_{\text{проб}}$ зменшується.

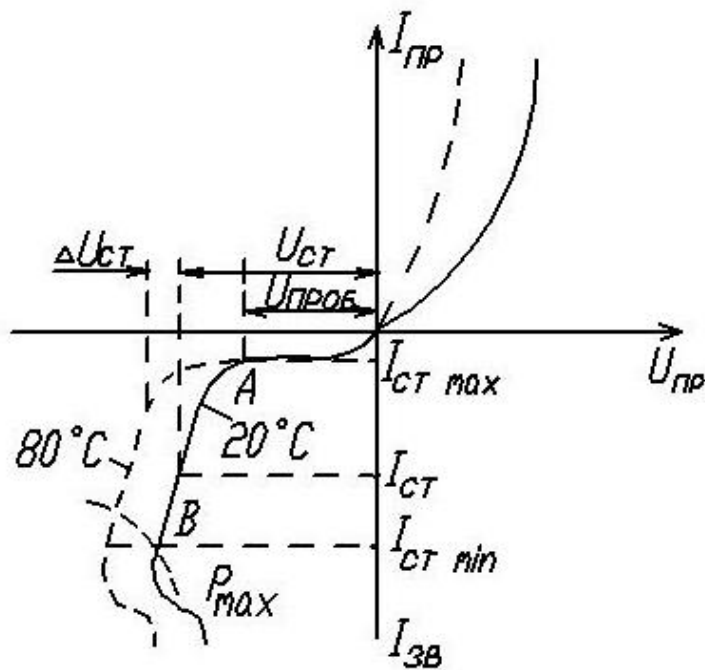


Рисунок 2.3 – ВАХ напівпровідникового стабілітрона та його зображення на схемах

Для стабілізації низьких напруг (біля одного вольта) використовують пряму гілку ВАХ діода при $U_{проб} > U_K$. В цьому режимі в кремнієвих діодах також спостерігається слабка залежність напруги від струму, що проходить. Такі прилади називають стабісторами, їх характеристика зображена на рисунку 2.4.

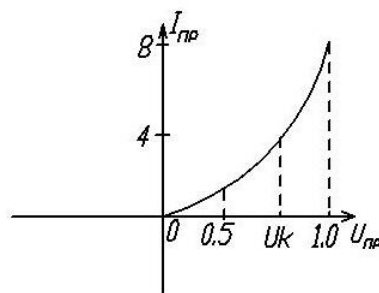


Рисунок 2.4 – Характеристика стабістора

До параметрів стабілітронів належать :

напруга стабілізації U_{cm} при даному струмі стабілізації;

мінімально допустимий струм стабілізації $I_{cm_{min}}$;

максимально допустимий струм $I_{cm_{max}}$;

максимально допустима потужність P_{max} , що розсіюється стабілітроном;

диференційний опір $r_{cm} = dU_{cm} / dI_{cm}$;

температурний коефіцієнт напруги стабілізації (ТКН), який визначається

відношенням відносної зміни напруги стабілізації ($\Delta U_{cm} / U_{cm}$) до абсолютної зміни температури при постійному I_{cm}

$$\alpha_{cm} = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T} 100\% . \quad (2.14)$$

Із розглянутої температурної зміни ВАХ стабілітронів випливає, що низьковольтні стабілітрони ($U_{cm} < 6\text{В}$) мають від'ємний ТКН, високовольтні ($U_{cm} > 8\text{В}$) - додатний ТКН. Для зменшення температурної залежності U_{cm} послідовно зі стабілітроном під'єднують у прямому напрямі діод, який має ТНК протилежного знаку. Цей спосіб використовується в прецизійних стабілітронах типу Д818, які мають усередині одного корпусу кілька послідовно з'єднаних переходів.

Прикладом стабілітрона може бути КС 168А – стабілітрон кремнієвий, призначений для пристроїв широкого вживання, напругстабілізації 6,8В, допустима максимальна потужність не перевищує 0,3Вт. / Приклад стабістора: 2С107А – стабістор кремнієвий для спеціального вживання, напруга стабілізації $U_{cm} = 0,7\text{В}$, допустима потужність $P_{\max} < 0,3\text{Вт}$.

Конструкція стабілітронів аналогічна до конструкції випрямлювальних діодів, вибір типу корпусу залежить від потужності розсіювання. Сучасні стабілітрони (діоди в яких контролюють лавинний процес) мають напругу стабілізації кілька сотень вольт, струми – до десятків ампер.

Для того щоб отримати більшу напругу стабілізації, стабілітрони під'єднують послідовно, при цьому для компенсації розходження параметрів інколи необхідно під'єднати до них урівнюючі резистори. Паралельне вмикання стабілітронів також допустимі, але при цьому резистори під'єднуються послідовно.

Застосування стабілітронів розглянемо на прикладі найпростішого параметричного стабілізатора постійної напруги (рисунок 2.5). При збільшенні U_{ex} початково одразу зростає $U_{вых}$, робоча точка на ділянці стабілізації зміщується донизу, що означає зменшення опору стабілітрона. Струм через стабілітрон I_{cm} зростає, загальний струм у колі I зростає (струм навантаження майже не змінюється, бо напруга на кінцях стабілітрона майже постійна), збільшується падіння напруги на гасильному резисторі R_r , і відбувається такий перерозділ напруг між R_r та R_H , що збільшення U_{ex} в усталеному режимі компенсується збільшенням U_r , $U_{вых} = U_{ex} - U_r = \text{const}$.

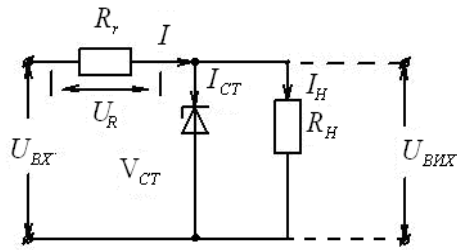


Рисунок 2.5 – Схема стабілізатора напруги

(струм навантаження майже не змінюється, бо напруга на кінцях стабілітрона майже постійна), збільшується падіння напруги на гасильному резисторі R_r , і відбувається такий перерозділ напруг між R_r та R_H , що збільшення $U_{вх}$ в усталеному режимі компенсується збільшенням U_r . Стабілітрон утримує незмінною вихідну напругу кола. Аналогічні процеси, тільки в зворотному напрямі, відбуваються при зменшенні вхідної напруги $U_{вх}$.

Форма вихідної напруги параметричного стабілізатора показана на рис. 2.6. Для стабілізації змінної напруги використовують два стабілітрони, які ввімкнені назустріч один одному (рис. 2.7 а). Форма його вихідної напруги показана на рис.2.7,б.

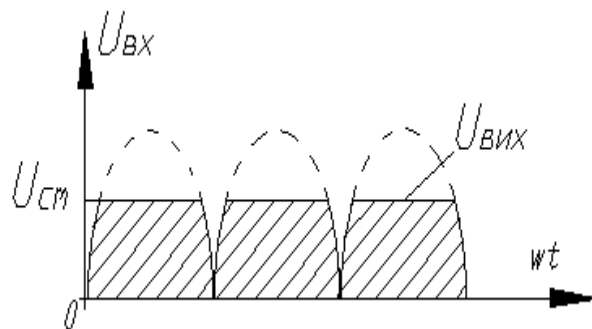


Рисунок 2..6 – Графік вихідної напруги

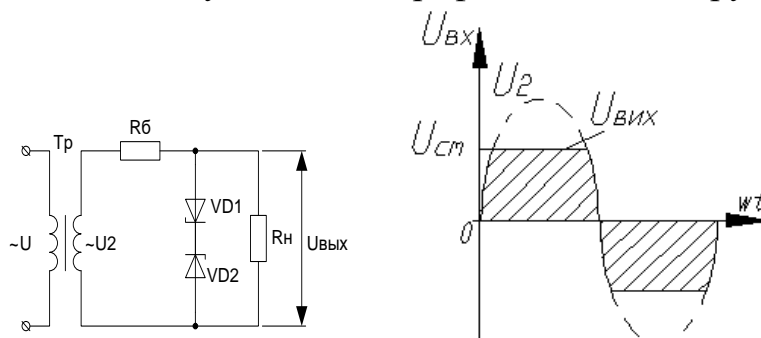


Рисунок 2..7 – Стабілізатор змінної напруги (а) і форма його вихідної напруги (б)

Для розширення діапазону стабілізованої напруги використовують додатково стабілітрони, стабістори або діоди, які

під'єднують послідовно з базовим стабілітроном, виконуючи необхідні умови при виборі цих елементів.

2.2 Окремі види та призначення напівпровідникових діодів

2.2.1 Універсальні діоди

До універсальних (високочастотних) діодів належать одноперехідні напівпровідникові прилади, що застосовують для випрямлення (при меншому електричному навантаженні), модуляції, детектування та інших нелінійних перетворювань електричних сигналів, частота яких не перевищує 1000 МГц. Третій елемент їх позначення – цифра 4.

На високих частотах можна вважати, що діод має односторонню провідність, якщо $Z_{зв} \gg Z_{np}$, де $Z_{зв}, Z_{np}$ - повні зворотний та прямий опори діода.

При прямому вмиканні діода ємність $C_{диф}$ зашунтована малим диференційним опором $r_{g_{np}}$ і можна вважати $Z_{np} = r_1 + r_{g_{np}}$. При зворотному вмиканні діода великий диференційний опір $r_{g_{зв}}$ зашунтований ємністю $C_{\bar{о}ар}$, і тому на високих частотах $Z_{зв} = r_1 + 1/j\omega C_{\bar{о}ар}$.

Тоді $Z_{np} = r_1 + r_{g_{np}}$; $Z_{зв} = \sqrt{r_1^2 + 1/\omega^2 C_{\bar{о}ар}^2}$, і умовою односторонньої провідності є $\sqrt{r_1^2 + 1/\omega^2 C_{\bar{о}ар}^2} \gg r_1 + r_{g_{np}}$, або остаточно

$$\frac{1}{\omega C_{\bar{о}ар}} \gg r_{g_{np}} \sqrt{1 + \frac{2r_1}{r_{g_{np}}}}. \quad (2.15)$$

Виконання цієї умови можливе при зменшенні ємності p - n -переходу. Це стає можливим при застосуванні точково-контактного або мікросплавного способів його виготовлення. Тому універсальні діоди – це здебільшого точкові або мікросплавні діоди. Останні розраховані на більші допустимі струми і мають кращі характеристики при зворотному вмиканні.

ВАХ універсального діода (рисунок 2.8) не має ділянки насичення на зворотній гілці. Це пояснюється, зокрема, нагріванням унаслідок незадовільного відведення тепла й ударною іонізацією, що викликається неоднорідністю електричного поля у переході.

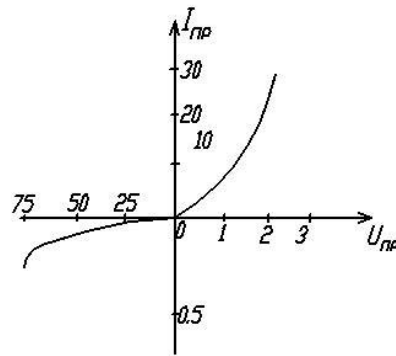


Рисунок 2.8 – ВАХ універсального діода

До параметрів універсальних діодів належать, крім перелічених у п.2.2.1, ємність діодів при заданій зворотній напрузі, а також діапазон робочих частот і температур.

2.2.2 Імпульсні діоди та перехідні процеси в них

Імпульсні діоди використовують як ключові елементи в пристроях імпульсної техніки. За конструкцією і характеристиками вони нагадують універсальні діоди. Крім високочастотних властивостей (мінімальної ємності $C_{бар}$), ці діоди повинні мати мінімальну тривалість перехідних процесів у момент вмикання та вимикання.

Перехідні процеси у діодах існують завжди й особливо виявляються при роботі з імпульсами малої тривалості або миттєвими перепадами напруг і струмів. Вони пов'язані з процесами накопичення та розсмоктування носіїв у базі діода.

Швидкодія імпульсних діодів збільшується за допомогою введення спеціальних легувальних домішок, які зменшують середню тривалість життя неосновних носіїв. Такими домішками до НП n -типу є, наприклад, золото.

Іншим способом зменшення часу відновлення зворотного опору бази є використання бази з нерівномірною концентрацією домішок. Це можна здійснити, наприклад, за допомогою дифузії акцепторів до НП n -типу. На рисунку 2.9 показано розподіл різниці концентрацій акцепторів та донорів і створення p - n -переходу у НП.

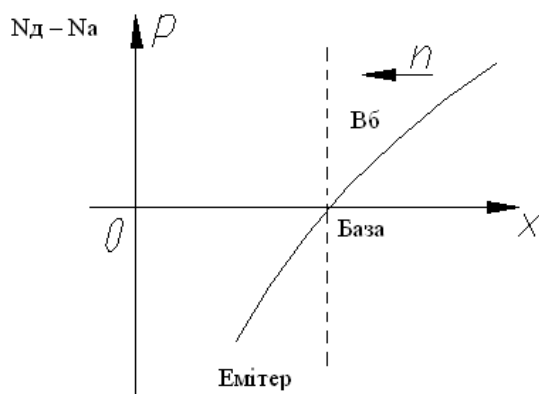


Рисунок 2.9 – Створення переходу дифузією акцепторів до НП n-типу

З рисунка видно, що концентрація домішок у базі при наближенні до p - n -переходу зменшується, тому нерівномірною буде й концентрація основних носіїв – електронів. Унаслідок цього електрони дифундують у бік p - n -переходу, залишаючи за собою некомпенсований заряд позитивних іонів. У базі виникає електричне поле E_{σ} , спрямоване в бік переходу. Під дією цього поля дірки, інжектвані до бази при вмиканні діода в прямому напрямі, накопичуються біля межі p - n -переходу. При перемиканні діода з прямого напрямку на зворотний ці дірки під дією поля p - n -переходу швидко виходять з бази до емітера, і час відновлення зворотногоопору зменшується. Діоди з такою технологією виготовлення називають діодами з накопиченням заряду.

Досить ефективним шляхом збільшення швидкодії імпульсних діодів є використання в них бар'єрів Шотткі. Як відомо, в таких діодах зовсім відсутня інжекція.

Основні спеціальні параметри імпульсних діодів: імпульсна пряма напруга U_{np} при даному імпульсі прямого струму; час усталення прямої напруги $t_{уст}$; час відновлення зворотного опору $t_{від}$. Останній параметр зашифровано в третьому елементі позначення діода (таблиця 2.2).

Приклад позначення імпульсних діодів: 2Д504А – кремнієвий, імпульсний, призначений для пристроїв спеціального застосування, час відновлення зворотного опору більший 150 нс, номер розробки 04, група А.

Таблиця 2.2

$t_{від}$	>150нс	30-150нс	5-30нс	1-5 нс	<1нс
Третій елемент позначення	5	6	7	8	9

Більшість імпульсних діодів має металево-скляне або скляне конструктивне оформлення.

2.2.3 Тунельні та обернені діоди

Тунельними називають діоди, які мають на прямій гілці своєї ВАХ ділянку з негативним диференційним опором унаслідок тунельного ефекту.

Тунельний ефект полягає у тунельному проникненні електрона через p - n -перехід, тобто такому проникненні, коли електрон з ВЗ однієї області прямо потрапляє до ЗП іншої області. Це стає можливим, якщо товщина переходу дуже мала (менша 150 \AA) і якщо енергетичним рівням, заповненим електронами в одній області, відповідають такі самі вільні дозволені рівні в сусідній області. Ці умови в p - n -переходах з НП, які мають високу концентрацію домішок ($10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$). Товщина p - n -переходів у цьому випадку має порядок 10^{-6} см , що зумовлює високу напруженість електричного поля переходу і забезпечує ймовірність тунельного ефекту. В таких НП атоми домішок внаслідок малої відстані взаємодіють між собою, і їх рівні розщеплюються в зони, які прилягають у НП p -типу до ВЗ, а в НП n -типу до ЗП. Такі напівпровідники називають виродженими, оскільки в них рівні Фермі розташовані в ЗП n -області і в ВЗ p -області.

Вигляд ВАХ тунельного діода можна пояснити за допомогою електричних діаграм (рисунок 2.10). На діаграмах рівні ВЗ та ЗП напівпровідників, що заповнені електронами, заштриховані.

При зовнішній напрузі $U = 0$ (рисунок 2.10,а) рівень Фермі всієї системи однаковий ($W_{\phi_n} = W_{\phi_p}$). Напроти зайнятих електронами рівнів p -області розміщуються зайняті рівні n -області. Тунельний перехід електронів неможливий, струм дорівнює нулю.

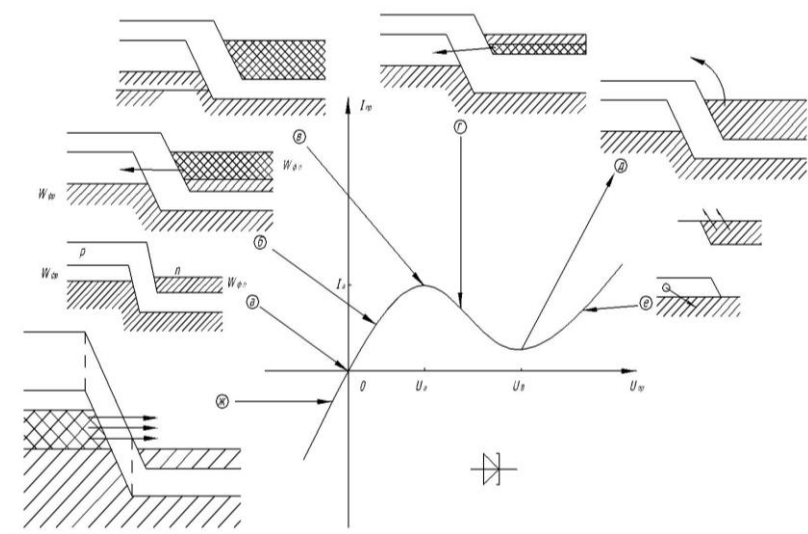


Рисунок 2.10 – ВАХ тунельного діода та її утворення

Під дією прямої U_{np} рівні Фермі зміщуються на величину $W = qU_{np}$ (рисунок 2.10,б), і напроти частини енергетичних рівнів, зайнятих електронами в n -області (подвійне штрихування), опиняться вільні рівні в p -області. Внаслідок цього відбувається тунельний перехід електронів з n -області до p -області й проходить прямий тунельний струм, величина якого пропорційна до площі перекриття вільних енергетичних рівнів ВЗ p -області й заповнених енергетичних рівнів ЗП n -області. Тунельний струм зростатиме доти, поки перекриття не стане максимальним (рисунок 2.10,в). Подальше зростання прямої напруги зменшує площу перекриття відповідних рівнів, і тунельний струм зменшується (рисунок 2.10,г). При певній прямій напрузі зайняті електронами енергетичні рівні ЗП n -області стануть напроти енергетичних рівнів ЗЗ p -області. Тунельний перехід електронів у цьому випадку стане неможливим і тунельний струм припиниться. В той самий час при прямих напругах у діоді відбувається, як правило, інжекція носіїв, що зумовлює проходження через нього дифузійного струму (рисунок 2.10Д,е), який при напрузі $U > U_e$ стає більшим, ніж тунельний струм.

Якщо діод увімкнути у зворотному напрямі, то рівні Фермі зміщуються так, як показано на рисунку 2.10,ж, і з'являється можливість тунельного переходу електронів із заповнених рівнів ВЗ p -області на вільні рівні ЗП n -області. Це приводить до проходження через діод великого зворотного тунельного струму.

P - n -переходи тунельних діодів одержують здебільшого способом сплавлення з германію, арсеніду галію та антимоніду галію. Оскільки для виготовлення таких діодів використовують вироджені НП, які за характером провідності наближаються до металів, то робоча температура приладів досягає 400°C .

Недоліком тунельних діодів є мала потужність із причини низьких робочих напруг (десяті частки вольт) і малих площ переходу.

За своїм призначенням тунельні діоди поділяються на підсилювальні (третьої елемент позначення – 1), генераторні (2) та перемикальні (3).

Приклади позначення тунельних діодів:

АИ201Г – діод тунельний генераторний, широкого застосування, з арсеніду галію, номер розробки 01, група Г.

ЗИ306Е – діод тунельний перемикальний, спеціального застосування, з арсеніду галію, номер розробки 06, група Б.

Тунельні діоди дозволяють будувати підсилювачі, генератори, змішувачі у діапазоні хвиль аж до міліметрових.

На тунельних діодах створюють і різноманітні імпульсні пристрої: тригери, мультівібратори з дуже малим часом перемикання.

Частковим випадком тунельних діодів є обернені діоди, у яких внаслідок тунельного ефекту провідність при зворотних напругах значно більша, ніж при прямих. *P-n*-переходи обернених діодів створюються напівпровідниками, що мають дещо меншу концентрацію домішок, і тому їх рівні Фермі збігаються з краями ЗП і ВЗ (рисунок 2.11,а). При вмиканні таких діодів у зворотному напрямі тунельні електрони з ВЗ *p*-області переходять на вільні рівні ЗП *n*-області, і через *p-n*-перехід тече великий зворотний струм. При прямому вмиканні діодів перекриття зон невідбувається, тунельний ефект не спостерігається, і прямий струм визначається лише дифузійним струмом. ВАХ оберненого діода показана на рисунку 2.11,б. Саме її форма дала назву даним діодам.

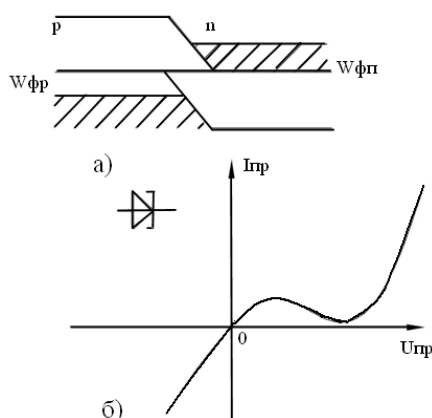


Рисунок 2.11 – Енергетична діаграма (а) та ВАХ (б) оберненого діода

Третій елемент їх позначення – цифра 4. Мала інерційність унаслідок тунельного ефекту і велика крутизна характеристики зумовлюють використання обернених діодів у детекторах і змішувачах діапазону надвисоких частот.

2.3 Варикапи

Варикапи – це напівпровідникові діоди, у яких використовується залежність бар'єрної ємності *p-n*-переходу від зворотної напруги. Варикапи поділяються на підстроювальні (третій елемент позначення – 1) і варактори (третій елемент – 2).

Підстроювальні варикапи використовуються, наприклад, для електронного підстроювання резонансної частоти коливальних контурів (рисунок 2.12). На схемі рисунок 2.12 конденсатор C запобігає замиканню напруги зміщення через котушку індуктивності L . Ємність конденсатора значно перевищує бар'єрну ємність варикапа $V1$. Тому резонансна частота

контура дорівнює

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{V1}}}, \quad (2.16)$$

де C_{V1} -ємність варикапа.

Регулюючи напругу зміщення, яка подається на варикап з потенціометра R_2 через резистор R_1 , можна змінювати ємність приладу, а, отже, і резонансну частоту контура. Резистор R_1 запобігає можливості шунтування коливального контура при переміщенні повзунка потенціометра. Опір R_1 вибирають більшим, ніж резонансний опір контура.

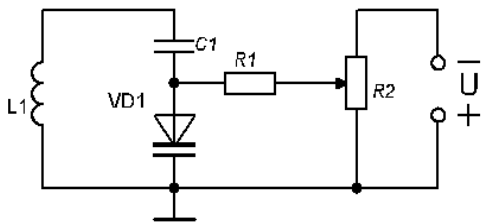


Рисунок 2.12 – Схема ввімкнення варикапа

Варикапи, які мають виражену нелінійну вольт-амперну характеристику, називають варакторами і використовують у пристроях параметричного підсилення і помноження частоти.

Основні параметри варикапів: номінальна ємність, виміряна при даній зворотній напрузі $U_{зв}$; максимально допустима зворотна напруга $U_{зв_{max}}$; добротність варикапа, яку визначають відношенням реактивного опору до опору втрат.

Розглянемо вплив параметрів еквівалентної схеми діодів на добротність варикапа.

Комплексний опір діода при зворотному вмиканні:

$$\dot{Z}_{зв} = r_1 + \frac{r_{g_{зв}}}{1 + j\omega C_{\text{бар}} r_{g_{зв}}}. \quad (2.17)$$

З формули (2.17) випливає, що реактивна складова опору діода

$$x_C = \frac{\omega C_{\text{бар}} r_{g_{зв}}^2}{1 + \omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{зв}}^2}, \quad (2.18)$$

а активна –

$$R = \frac{r_{g_{зв}} (r_1 \omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{зв}} + \frac{r_1}{r_{g_{зв}}} + 1)}{1 + \omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{зв}}^2}. \quad (2.19)$$

З формул (2.18) та (2.19) можна записати вираз для добротності варикапа

$$Q = \frac{x_c}{R} = \frac{\omega C_{\text{бар}} r_{g_{36}}}{\omega^2 C_{\text{бар}} r_{g_{36}} r_1 + \frac{r_1}{r_{g_{36}}} + 1}. \quad (2.20)$$

В області низьких частот

$$\omega^2 C_{\text{бар}}^2 r_{g_{36}} r_1 \ll 1 + \frac{r_1}{r_{g_{36}}} \text{ і } Q \approx \omega C_{\text{бар}} r_{g_{36}}. \quad (2.21)$$

В області високих частот $\omega^2 C_{\text{бар}} r_{g_{36}} r_1 \gg 1 + \frac{r_1}{r_{g_{36}}}$ і тоді

$$Q = \frac{1}{\omega C_{\text{бар}} r_1}. \quad (2.22)$$

З виразів (2.21) та (2.22) випливає, що з метою збільшення добротності варикапа необхідно збільшувати зворотний опір його p - n -переходу і зменшувати опір бази.

Для виконання першої умови варикапи виготовляють з кремнію. Для одержання малого опору бази для варикапа використовують структуру $p^+ - n - n^+$, в якій база складається з двох шарів: n і n^+ (рисунок 2.13). n -шар бази має малу товщину, тому при зворотному вмиканні весь p - n -перехід розміщується в цьому шарі. Опір бази в цьому випадку утворено лише сильнолегованою n^+ -областю, і тому він має малу величину. Ця структура, крім того, дозволяє значно збільшити зворотну напругу варикапа.

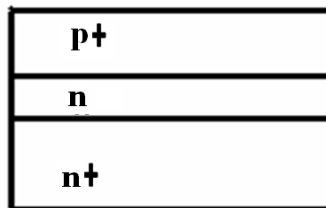


Рисунок 2.13 – Напівпровідникова структура варикапа

Якість варикапа визначається:

- ємністю та межами її можливого регулювання за допомогою прикладеної зворотної напруги;
- добротністю і частотним діапазоном;
- температурною стабільністю ємності і добротності.

Ємність варикапа

Для ємності варикапа можна записати $C = C_0 + C_v$, де C_v – ємність між електродами і виводами варикапа яка не залежить від прикладеної напруги;

C_0 – початкова ємність варикапа яка залежить від площі переходу Π і концентрації домішок у базі діоду N_d і становить від одиниць до десятків часток мікрофаради. Відносна зміна ємності шляхом зміни прикладеної зворотної напруги показана на рисунку 2.14

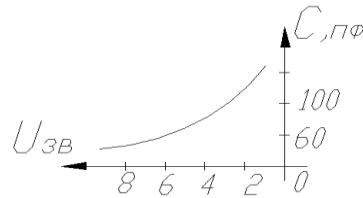


Рисунок 2.14 – Вольт-фарадна характеристика варикапа

ДІОДИ ГАННА

В 1963 році американський вчений Дж. Б. Ганн звернув увагу на те, що в однорідному напівпровіднику GaAs при прикладені напруги виникають електромагнітні коливання, тому його ще називають генератором НВЧ коливань або генератором Ганна. Його призначення - перетворення енергії джерела постійної напруги в енергію надвисокочастотних електромагнітних коливань.

Електрони нижньої долини – легкі електрони, мають рухливість μ_1 , електрони, які знаходяться в бокових долинах, називаються важкими електронами і мають рухливість μ_2 . Відношення між масами легких та важких електронів залежить від напруженості електричного поля. Якщо не спостерігається явище ударної іонізації, то концентрація в напівпровіднику буде незмінна:

$$n_0 = n_1 + n_2 .$$

При малих значеннях порогової напруги $U = E$ пор всі електрони знаходяться в нижній долині (струм визначається легкими електронами, діляночка 1 на ВАХ) :

$$I = gn_1 E .$$

При збільшенні напруженості електричного поля $U = E_{пор}$ електрони із верхньої долини переходять в бокові долини (діляночка 3 на ВАХ):

$$n_0 = n_1, \quad I = gn_2 E.$$

Для виникнення діляночки негативного диференційного опору на ВАХ необхідно, щоб відбувався одночасний перехід електронів із центральної долини в бокові долини (діляночка 2 на ВАХ). Практичну статичну ВАХ не вдається держати неперервною лінією внаслідок неоднорідності електронів біля аноду та катода, тому діляночка 2 зображена штриховою лінією.

Якщо на діод подавати постійну напругу, то електрони в напівпровіднику будуть всі легкими і струм визначається за формулою:

$$I_{\max} = gn_0 E \quad \text{при} \quad n_0 = n_1.$$

При збільшенні U $E_{\text{пор}}$ поблизу катода виникають легкі електрони, які рухаються швидше і мають менш негативний заряд відносно аноду, тому їх можна вважати некомпенсованими донорами; важкі електрони формують негативний заряд, який буде мати більш негативний заряд відносно аноду.

В середині домену виникає внутрішнє електричне поле, яке має теж направлення, що й зовнішнє поле. З ростом домену поле збільшується, а за його межами – зменшується. Внаслідок цього швидкість легких електронів зменшується, а важких – збільшується і може наступити момент, коли вони зрівняються:

$$V_1 = V_2$$

Ця швидкість визначається швидкістю від катода до аноду.

Домен формується біля катода і зникає біля аноду. При зникненні домену струм в діоді буде мінімальним. Виникнення і зникнення домену приводить до виникнення НВЧ коливань.

Загальний струм через діод Ганна визначається за формулою:

$$I = g (n_1 + n_2) E.$$

Параметри діоду Ганна:

- потужність НВЧ коливань в неперервному режимі до 100 мВт, в імпульсному – декілька сотен ватт;
- частота генерації 1-50 ГГц (30 Гц), НВЧ діапазон вище 300 МГц, частота генерації залежить від відстані між катодом і анодом;
- коефіцієнт корисної дії (1-30%, 24%);
- строк служби відносно малий, пов'язаний із перегрівом кристалу та зміною електричного поля,
- із-за наявності неоднорідностей створення домену, виникають частотні шуми. Рівень частотних і амплітудних шумів генераторів високий.