Лабораторна робота №5

Ідентифікація та дослідження моделей напівпровідникових діодів та стабілітронів

Теоретичні відомості

Діод - це твердотілий прилад (ТП) з одним випрямляючим контактом. Таким контактом може бути електронно-дірковий перехід (ЕДП), контакт метал-напівпровідник (діод Шоткі) або гетероперехід. Найпоширеніші в електроніці випрямні діоди, засновані на ЕДП. Удосконалення технології виготовлення ТП привело до розробки випрямних діодів з контактом метал-напівпровідник n-типу. Діоди, засновані на гетеропереходах, поки що не вийшли із стадії лабораторних досліджень.

Для формування ЕДП монокристал напівпровідника легують почергово акцепторною і донорною домішками так, щоб з різних боків кристалу сформувались області діркової p і електронної n провідностей (рис. 1.1,а). Через технологічні особливості виготовлення діодів найпоширеніші несиметричні ЕДП, у яких область з найбільшою концентрацією легуючої домішки називається емітером і позначається n^+, як показано на рис.1.1,а. У потужних випрямних діодах використовуються p^+-емітери. Область напівпровідникового кристала з меншим ступенем легування називають базою. Оскільки на межі поділу областей існує різкий перепад концентрацій основних носіїв, то електрони переходять із n^+-області в p-область, залишаючи позитивно заряджені атоми донорної домішки, а дірки - у протилежному напрямі, залишаючи негативно заряджені атоми акцепторів. При цьому електрони, перейшовши із n^+- в p-область, рекомбінують поблизу поділу цих областей з дірками p-області, а дірки, які перейшли із p-області в n^+-область, рекомбінують з електронами цієї області. В районі контакту формується подвійний електричний шар, утворений нерухомими позитивним об'ємним зарядом донорів і негативним об'ємним зарядом акцепторів.

Подвійний шар іонізованих атомів домішок має великий опір, тому що позбавлений рухомих носіїв заряду. Його ще називають запірним шаром або областю просторового заряду (ОПЗ) .

Запірний шар діє як потенціальний бар'єр, висота якого дорівнює контактній різниці потенціалів φ_0.Для германія $\varphi_0{}^{Ge}$ = (0,3…0,5) В, для кремнія $\varphi_0{}^{Si}$ = (0,7…0,9) В, тобто у напівпровідника з більшою шириною забороненої зони величина φ_0 також більша.

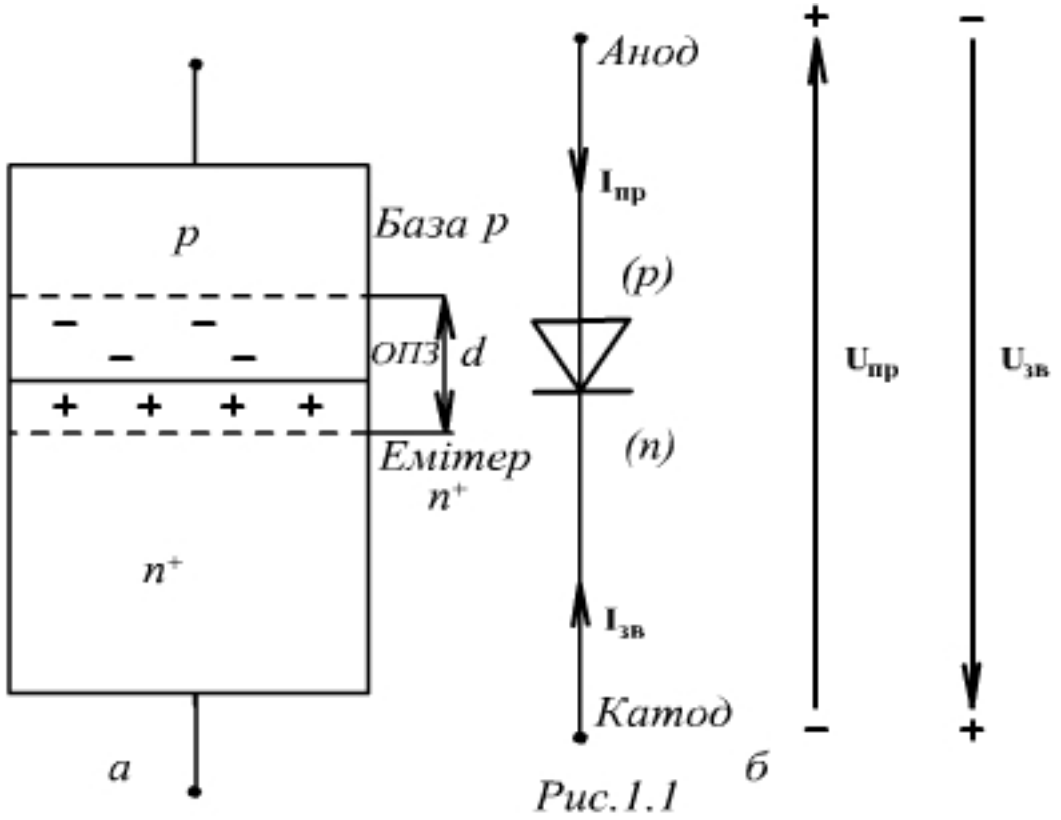


Рис.1.1

При подачі на діод зворотної напруги зовнішнє електричне поле додається до електричного поля ЕДП, збільшує висоту потенціального бар'єра до рівня ($\varphi_0 + U_{зв}$), ширина ОПЗ розширюється. Через ЕДП протікає малий зворотний струм $I_{зв}$, зумовлений екстракцією неосновних носіїв із областей, що прилягають до ЕДП, термогенерацією носіїв заряду всередині ЕДП, каналами і витоком по поверхні кристалу. Чим більша φ_0, тим менший зворотний струм. Для малопотужного германієвого діода $I_{зв}^{Ge} \approx$ 1…100 мкА, а для кремнієвого $I_{зв}^{Si} \approx$ 1…100 нА.

Оскільки концентрація генерованих носіїв заряду всередині ЕДП пропорційна його ширині, то зворотний струм реального діода залежить від зворотної напруги. У теорії ідеалізованого діода розглядається тільки явище екстракції, тому зворотний струм такого діода, позначений символом I_o, не залежить від $U_{зв}$.

Під'єднаний до діода прямої напруги (рис.1.1,б) знижує різницю потенціалів на межах ЕДП. Висота потенціального бар'єра знижується до рівня (φ_o-$U_{пр}$) і зростає ймовірність подолання цього бар'єра. Електрони із n^+-області переходять в р-область, а дірками – із р-області в n^+-область. Концентрація неосновних носіїв заряду, подолавши потенціальний бар'єр, пропорційна больцмановському множнику $\exp\left(\frac{U_{пр}}{\varphi_T}\right)$.

Явище надбар'єрного переходу носіїв заряду при прикладанні прямого зміщення називається інжекцією неосновних носіїв заряду.

У випадку несиметричного ЕДП концентрація інжектованих електронів із n^+- області в р-область (у базу на рис.1.1,а) буде набагато більшою за концентрацію дірок, інжектованих в емітер. Тому розглядають тільки електронну складову струму. До появи електронів р-база була електронейтральна. Щоб зберегти електронейтральну базу після прикладання $U_{пр}$ та інжекції електронів, які складають об'ємний заряд, із зовнішнього кола надходить додаткова кількість дірок, що дорівнює кількості інжектованих електронів.У результаті в зовнішньому ланцюгу потече прямий струм діода $I_{пр}$, значення якого пропорційне концентрації інжектованих у базу неосновних носіїв:

$$I_{пр} = I_o \, e^{\frac{U_{пр}}{m\varphi_T}}, \qquad (1.1)$$

де I_o – зворотний струм діода, який не залежить від величини $U_{зв}$;

$1 \le m \le 2$ – коефіцієнт неідеальності ВАХ діода; $\varphi_т$ – температурний потенціал, рівний 0,0258 В при Т = 300 К.

Оскільки прямий $I_{пр}$ і I_o струми діода течуть у протилежних напрямах (рис.1.1,б), то їх алгебраїчна сума описує ВАХ діода:

$$I_{пр} = I_o \, (e^{\frac{U_{пр}}{m\varphi_T}} - 1) . \qquad (1.2)$$

ВАХ діодів із германію та кремнію зображено на рис. 1.2. Ця залежність має різко несиметричний вигляд, характерний для випрямних приладів. Через меншу ширину забороненої зони $I_{зв}^{Ge} >> I_{зв}^{Si}$,а $U_{зв}^{Ge} << U_{зв}^{Si}$. Пряме падіння напруги на діоді при більших прямих струмах прямує до контактної різниці потенціалів φ_o.

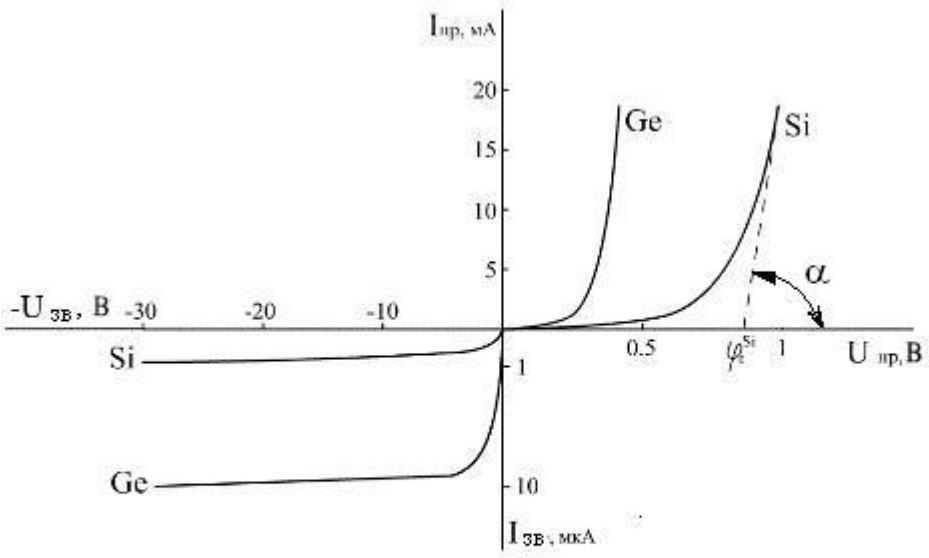


Рис. 1.2

З рис.1.2 випливає, що φ_o – значення $U_{пр}$ у точці перетину прямої лінії, апроксимуючої ВАХ в області великих струмів, з віссю напруги. Оскільки крутизна прямої вітки ВАХ більша, зручніше задавати прямий струм діода, а не напруги, тому говорять, що діод – це прилад, керований струмом. Беручи до уваги сказане, перепишемо рівняння (1.2) у вигляді:

$$U = m\varphi_т \ln\left(\frac{I}{I_0}+1\right) \qquad (1.3)$$

або, враховуючи падіння напруги на опорі бази :

$$U = m\varphi_т \ln\left(\frac{I}{I_0}+1\right) + Ir_б\,. \qquad (1.4)$$

Поки струм $I_{пр}$ малий, значення $I_{пр}r_б$ також мале і ВАХ описується рівнянням (1.2) або (1.3). В області великих прямих струмів лінійна функція зростає швидше за логарифмічну, тому нахил ВАХ практично визначається величиною $r_б$ (рис. 1.2):

$$\operatorname{ctg}\alpha \approx r_б\,. \qquad (1.5)$$

Випрямні діоди характеризуються такими статичними параметрами: напругою $U_{пр}$ при заданому струмі $I_{пр}$, струмом $I_{зв}$ при заданій напрузі $U_{зв}$, максимально допустимими значеннями $I_{пр.max}$ і $U_{зв.max}$, які обмежуються максимальною потужністю P_{max}, розсіюваною діодом.

Властивості діода характеризують опори:

- диференціальний

$$r_{диф} = \frac{\partial U_{пр}}{\partial I_{пр}} = \frac{m\varphi_T}{I + I_0}\ ; \qquad (1.6)$$

- прямий і зворотний по постійному струму

$$r_{пр.д} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} = \frac{U_{пр}}{I_0} e^{\frac{-U}{m\varphi_T}}\ ; \qquad (1.7)$$

$$r_{зв.д} = \frac{U_{звр}}{I_{звр}} \approx \frac{U_{звр}}{I_0}\ . \qquad (1.8)$$

Випрямні властивості діодів характеризуються коефіцієнтом випрямлення:

$$K_B = \frac{I_{пр}}{I_{звр}} = \frac{r_{зв.д}}{r_{пр.д}} \qquad (1.9)$$

Щоб розрахувати схеми, які містять діод, його замінюють моделлю, яка включає в себе еквівалентну схему, аналітичний опис і таблицю параметрів. У режимі великого сигналу діод є нелінійним елементом. Нелінійні статичні моделі діода з джерелом струму, керованим напругою, і джерелом напруги, керованим струмом, показані на рис.1.3. Обидві моделі мають по три параметри - I_o, m і $r_б$, значення яких обчислюється опосередковано за результатами вимірювань ВАХ.

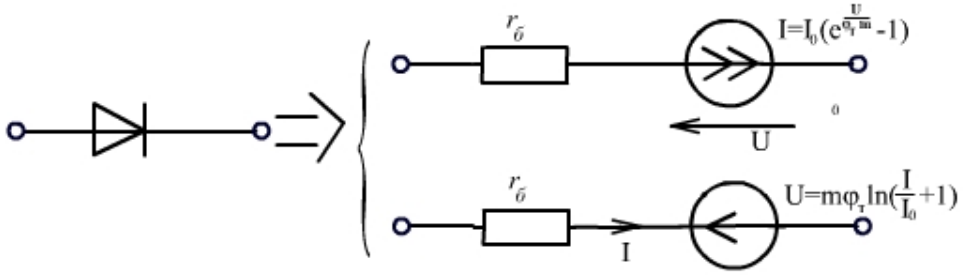


Рис. 1.3

У режимі малого сигналу, коли змінна складова $U_{\sim}$ набагато менша від постійної $U_{=}$ ($U_{\sim} << U_{=}$), діод заміщають лінійною моделлю (рис.1.4), яку дістають з нелінійної переходом до диференціального параметра $r_{диф}$ у робочій точці $I_{пр}^{o}$ (наприклад, $I_{пр}^{o}$ = 50 мА). Параметри цієї моделі є $r_б$ і $r_{диф} = \frac{m\varphi_T}{I_{пр}^0}$

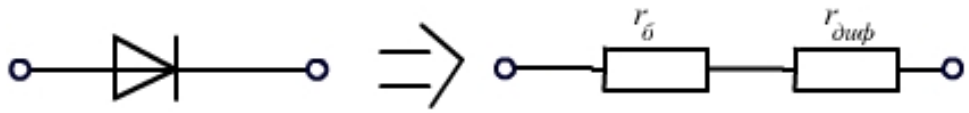


Рис. 1.4

У динамічному режимі діод спотворює форму імпульсів, амплітуду і фазу періодичного сигналу. Ці спотворення зумовлені впливом реактивностей – бар'єрної Сб і дифузійної Сд ємностей діода.

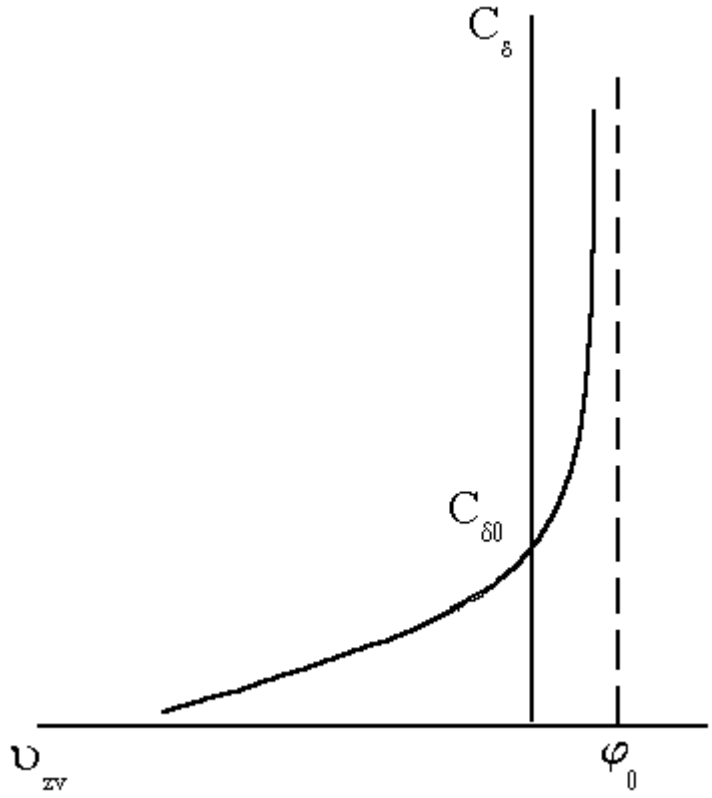


Рис 1.5

Бар'єрна (зарядна) ємність відображає процес перерозподілу зарядів у перехідному шарі при змінах зовнішньої напруги. На рис. 1.5 показано графік залежності Сб(U), яка описується виразом:

$$C_б = \frac{C_{б0}}{(I+U/\varphi_0)^n}, \qquad (1.10)$$

де Сб0 – рівноважне значення бар'єрної ємності; φ0 – висота потенціального бар'єра; n – показник розподілу домішок в ЕДП, n=0,3 для плавних і n=0,5 для різких ЕДП.

Зі збільшенням зворотньої напруги величина Сб зменшується, тому що ОПЗ розширюється. Бар'єрна ємність переважає при зворотних зміщеннях діода.

Дифузійна ємність Cg своєю назвою зобов'язана процесам дифузії (а значить, і нагромадження – розсмоктування) неосновних носіїв у електронейтральних областях діода.

Заведено так, що при прямих зміщеннях зміни заряду неосновних носіїв Qн характеризують величину Cg:

$$C_g = \frac{dQ_н}{dU} = \tau \frac{dU}{dI} \quad . \tag{1.11}$$

Для діодів з товстою базою (як правило, випрямних), товщина якої W більша ніж дифузійна довжина неосновних носіїв (W>Ln), параметр τ - це час життя неосновних носіїв (електронів). За цей час вони не встигають продифундувати від границь ЕДП до контакту діода без рекомбінації.

Для діодів з тонкою базою (універсальних, імпульсних і НВЧ), у яких W<<Ln , τ - це час дифузії (прольоту) неосновних носіїв через базу до контакту із зовнішнім колом.

Диференціюванням виразу (1.10) для ВАХ діода знайдемо:

$$C_g = \frac{\tau}{m\,\varphi_т}(1+I_0) \cdot \tag{1.12}$$

Розглянемо імпульсний режим роботи діода. Схема увімкнення-вимкнення діода VД при подачі відкриваючого імпульса Uвх наведена на рис. 1.6. Резистор R1 служить для лінійного перетворення струму діода Iпр, що вимірюють, у напругу, яку спостерігають на екрані осцилографа.

Осцилограми рис. 1.7 ілюструють перехідні прцеси, які відбуваються у цій схемі. Напруга на діоді Uпр (рис. 1.7,а) складається із падіння напруги на ЕДП Uедп=mφтln(Iпр/Io) (рис. 1.8,а) і опору бази Uб= Iпрrб (рис 1.8,б). У міру накопичення неосновних носіїв у базі (електронів для діода з n+ -емітером, як показано на рис. 1.1,а) зростає прямий струм діода (рис. 1.7,в) і напруга на ЕДП, прямуючи до значення mφтln(Iпр.n/Io) , тобто заряджується дифузійна ємність. Одночасно відбувається зменшення (модуляція) опору бази rб через збільшення концентрації основних носіїв, які надходять із зовнішнього кола для підтримки електронейтральності бази. Модуляцію rб описують таким рівнянням:

$$r_6 = \frac{r_{60}}{1 + \frac{I_{пр}}{I_v}} \quad , \tag{1.13}$$

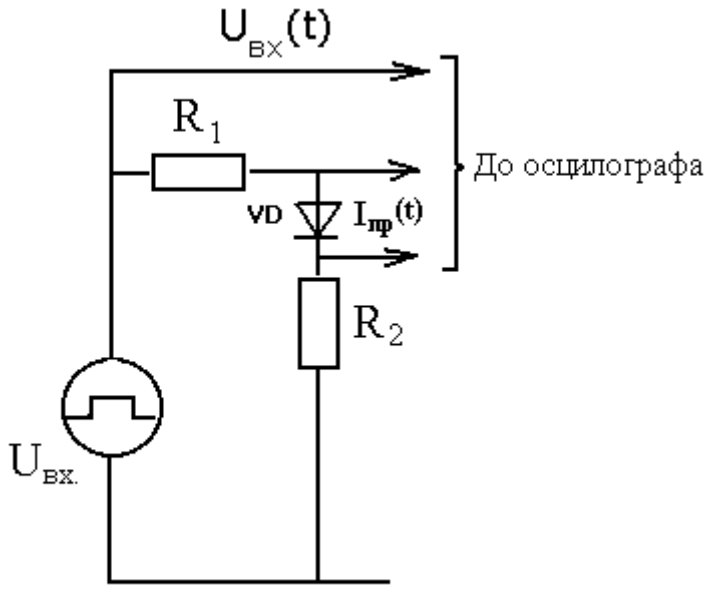


Рис. 1.6

де rб0 – немодульований опір бази; Iv – прямий струм діода, при якому починаються високі рівні інжекції у базі. Таким чином, осцилограми Uб(t) і Uпр(t) мають чітко виражений максимум, амплітуда якого визначається немодульованим опором бази. Отже:

$$r_{60} = \frac{I_{прi}}{U_{прi}} \quad . \tag{1.14}$$

Вочевидь,чим швидше встановлюється Iпр.д (див. рис. 1.7,в), тобто чим точніше виконується умова джерела струму на вході, тим точніше визначається величина rб.0.

Напруга, яка встановлюється на діоді після увімкнення, залежить від висоти потенціального бар’єра. Тому германієві діоди мають менший час встановлення tвст і менші втрати в увімкненому стані, ніж кремнієві.

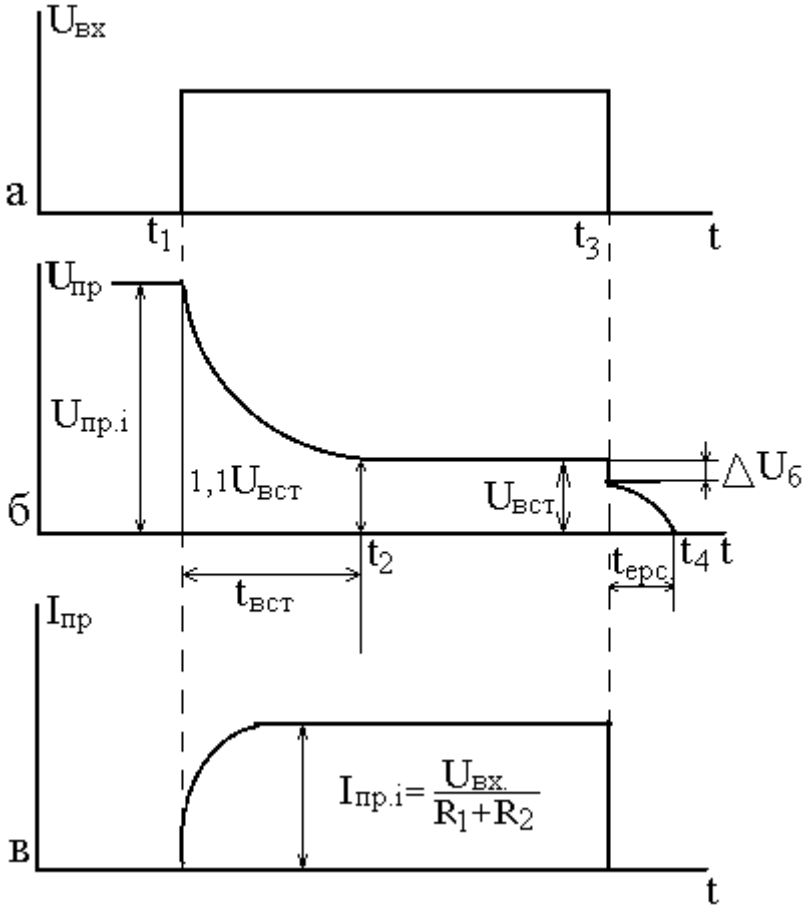

Uвх
а
t1
t3
t
Uпр
Uпр.i
1,1Uвст
Uвст
△Uб
б
t2
t4
t
tвст
tерс
Iпр
Iпр.i= Uвх. / R1+R2
в
t

Рис. 1.7

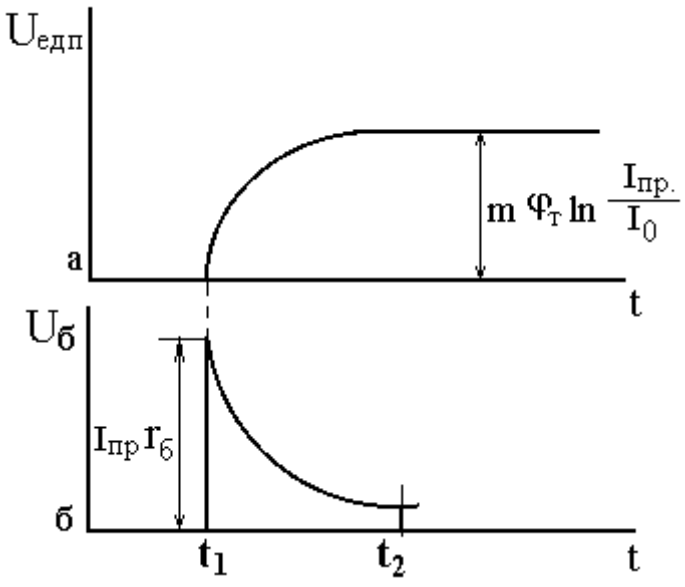

Uедп
m φт ln Iпр. / I0
а
t
Uб
Iпр rб
б
t1
t2
t

Рис. 1.8

Одним із основних імпульсних параметрів діода є час встановлення прямої напруги tвст, який визначається інтервалом від моменту подачі відмикаючого імпульса до досягнення рівня 1.1 Uвст: tвст=t2-t1 (рис. 1.7,б).

При увімкненні діода в момент t3 напруга на ньому зменшується на омічне падіння напруги на модульованому опора бази ΔUб (рис. 2.3,б). Знаючи це, можна визначити опір бази в момент t3:

$$r_б(t_3)=\frac{\triangle U_б}{I_{прі}} \quad . \tag{1.15}$$

Підставляючи значення rб(t3) і rб.0 у рівняння (1.13), знаходять значення струму Iv.

Розсмоктування неосновних носіїв шляхом рекомбінації після моменту t3 призводить до появи на діоді деякої післяінжекційної ЕРС, яка з часом спадає (рис. 1.7б). Час дії цієї ЕРС характеризується розрядом дифузійної ємності через прямий опір діода:

$$t_{ерс.}=t_4-t_3=c_g r_{пр.д}=\tau \ln\left(\frac{I_{пр.і}}{I_0}+1\right)\approx \tau \ln\frac{I_{пр.і}}{I_0} \quad . \tag{1.16}$$

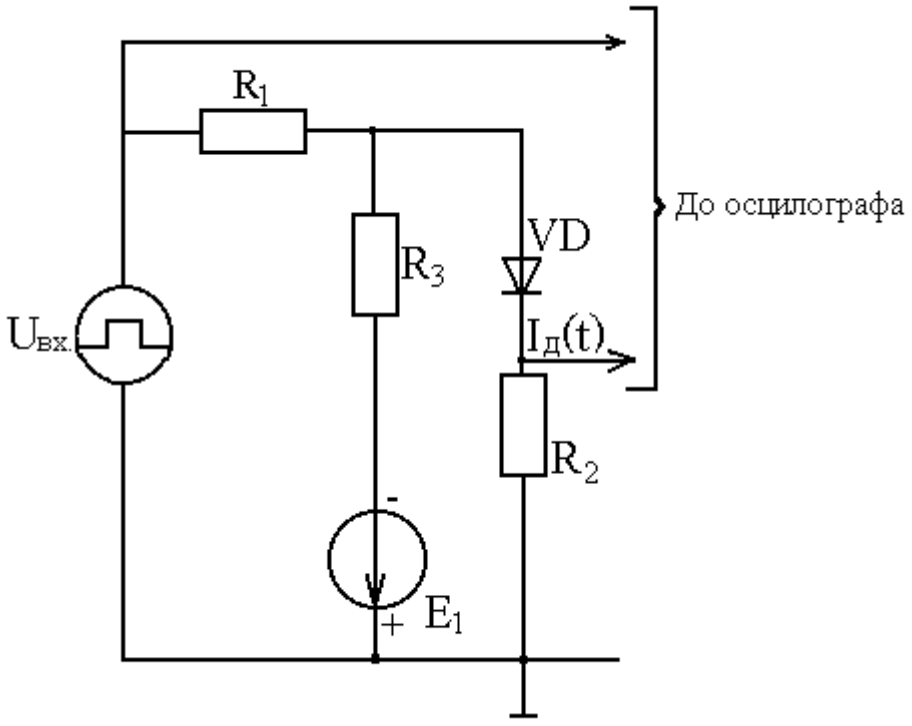


Рис. 1.9

Струм діода Іпр (рис. 1.7,в) у момент t3 миттєво зменшується.

Перемикання діода із закритого стану у відкритий можна спостерігати за схемою, зображеною на рис. 1.9.

Джерело Е1 через резистор R3 забезпечує зворотнє зміщення досліджуваного діода VD.

У момент t1 від генератора Uвх на діод надходить імпульс прямого струму:

$$I_{пр\,i} = \frac{U_{вх}}{R_1 + R_2} \cdot \qquad (1.17)$$

Для спостерігання осцилограми струму діода Ід при перемиканні послідовно вмикають резистор R2, падіння напруги на якому, як і в попередньому досліді, пропорційне величині Ig.(рис. 1.10)

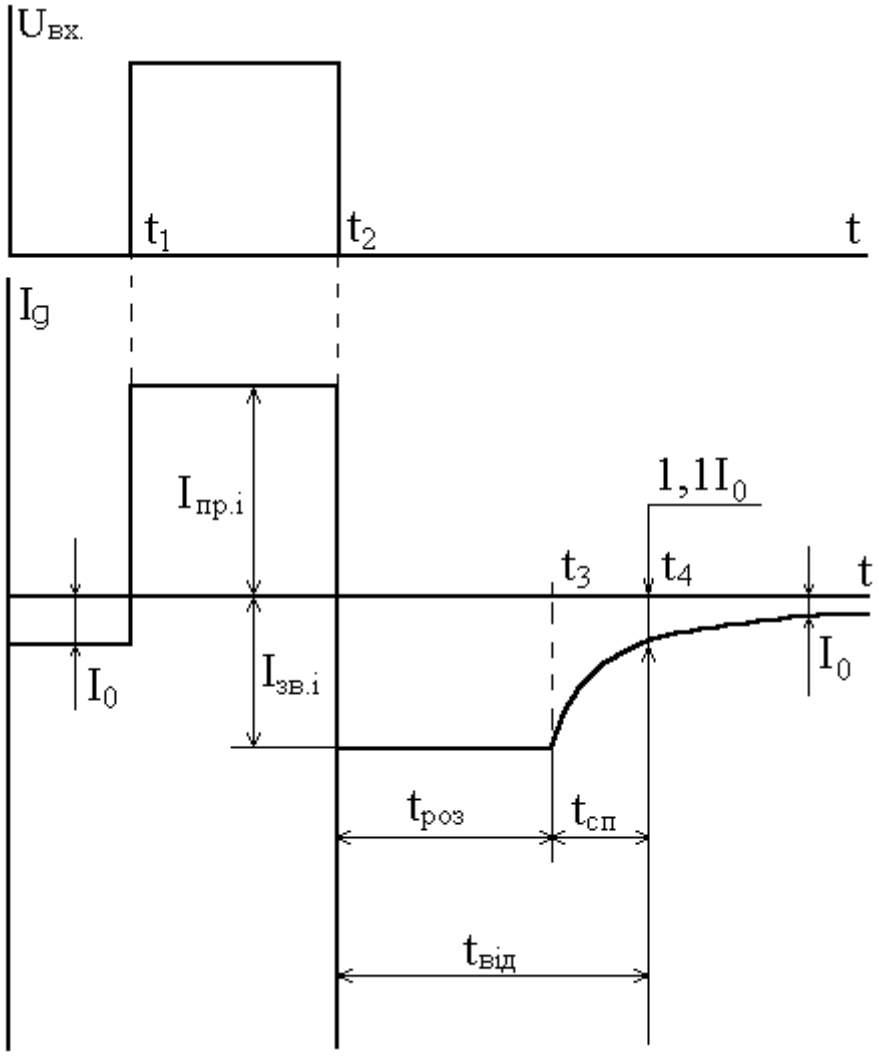


Рис. 1.10

Перемикання діода починається у момент t2, коли його струм змінює свій напрям. Опір діода виявляється малим внаслідок того, що нагромадились неосновні носії в електронейтральних областях за час проходження прямого струму. Тому за час розсмоктування tроз=t3-t2 відбувається розсмоктування носіїв і тим швидше, чим більше зворотний імпульсний струм:

$$I_{зв.i}=\frac{E_1}{R_2+R_3} \quad . \tag{1.18}$$

Час розсмоктування визначається за формулоє, аналогічною (1.16), тільки з тією відміною, що замість зворотнього струму I0 підставляють зворотній імпульсний струм:

$$t_{роз}=\tau \ln\left(\frac{I_{зв.i}}{I_{пр.i}}+1\right) \quad . \tag{1.19}$$

У момент часу t3 запирається ЕДП, оскільки концентріція неосновних носіїв біля його межі зменшилась до рівноважного значення. Але в середині електронейтральних областей продовжується рекомбінація неосновних носіїв, яка приводить до спадання зворотного імпульсного струму до величини I0 і повного запирання діода. Час спадання:

$$t_{сп.}=t_4-t_3=\tau \ln\frac{I_{звр.i}}{1,1I_0} \quad . \tag{1.20}$$

Відповідно, запирання діода відбувається не миттєво, а з деяким інтервалом, який називається часом відновлення зворотного опору tвід(tвід=tроз+tсп), за який у зовнішнє коло виводиться заряд неосновних носіїв, який називається зарядом перемикання:

$$Q_{пк}=\int_{t_2}^{t_4} I_{зв}\,dt \quad . \tag{1.21}$$

Основними динамічними параметрами діода є імпульсні значення Iпр.i, Iзв.i, Uпр.i та їх максимально допустимі значення, а також Uвст., tвст., tвід., Qпк.

Розрізняють два типи динамічних моделей діод: нелінійні(для великого сигналу) і лінійні (для малого сигналу). Еквівалентні схеми цих моделей зображені на рис. 1.11,а і б, відповідно:

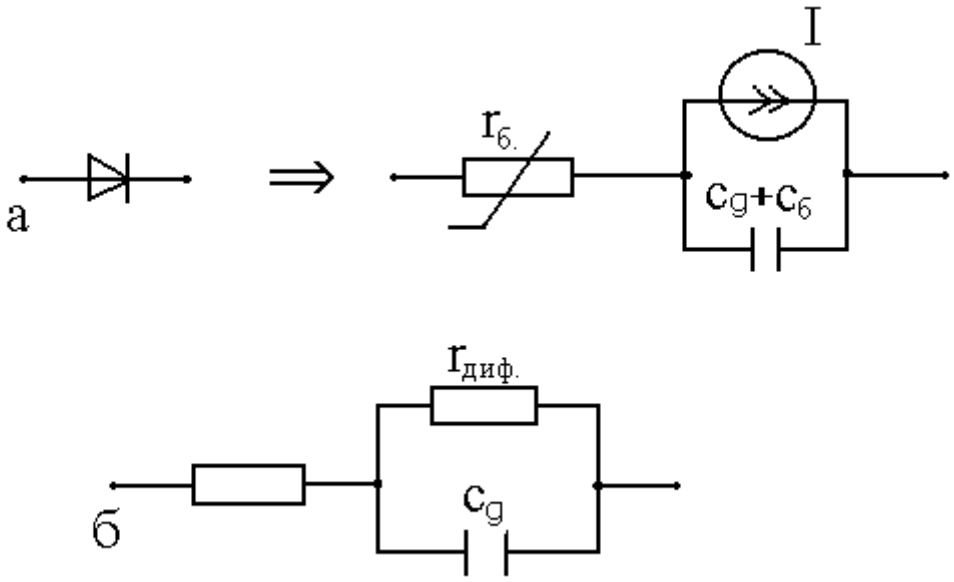


Рис. 1.11

Аналітичний опис нелінійної моделі складається із рівняння ВАХ діода (1.2) і (1.10), (1.12), (1.13) з таким списком параметрів: I0, m, rб0, Iν, Сб0, φ0, n,τ. При малих амплітудах Iпр.і ефектом модуляції опору бази можна знехтувати, тобто зменшити на один параметр Iν список. При більших амплітудах сигналів час перемикання визначається, в основному,часом перезаряду дифузійної ємності, тому можна вважати, що бар'єрна ємність Сб0 залишається сталою, тобто виключити із списка два параметри: φ0 і n.

Лінеризацією ВАХ у робочій точці будують лінійну динамічну модель діода(рис. 1.11,б). Для її опису використовують рівняння (1.5) і:

$$c_g = \frac{\tau}{r_{диф}} \quad . \tag{1.22}$$

Стабілітрон – це твердотільний діод, зворотна напруга якого в режимі електричного пробою слабо залежить від зміни струму. Ці властивості використовуються для стабілізації напруги від 3,3 до 200В. Стабілітрони виготовляють із кремнію. Германієві діоди не використовуються для стабілізації напруги у зв'язку з більшою ймовірністю теплового пробою ЕДП через відносно більше значення зворотного струму та його різкої температурної залежності. Принцип дії твердотільних стабілітронів заснований на використанні

властивостей електричних видів пробою (тунельного і лавинного), які мають зворотний характер.

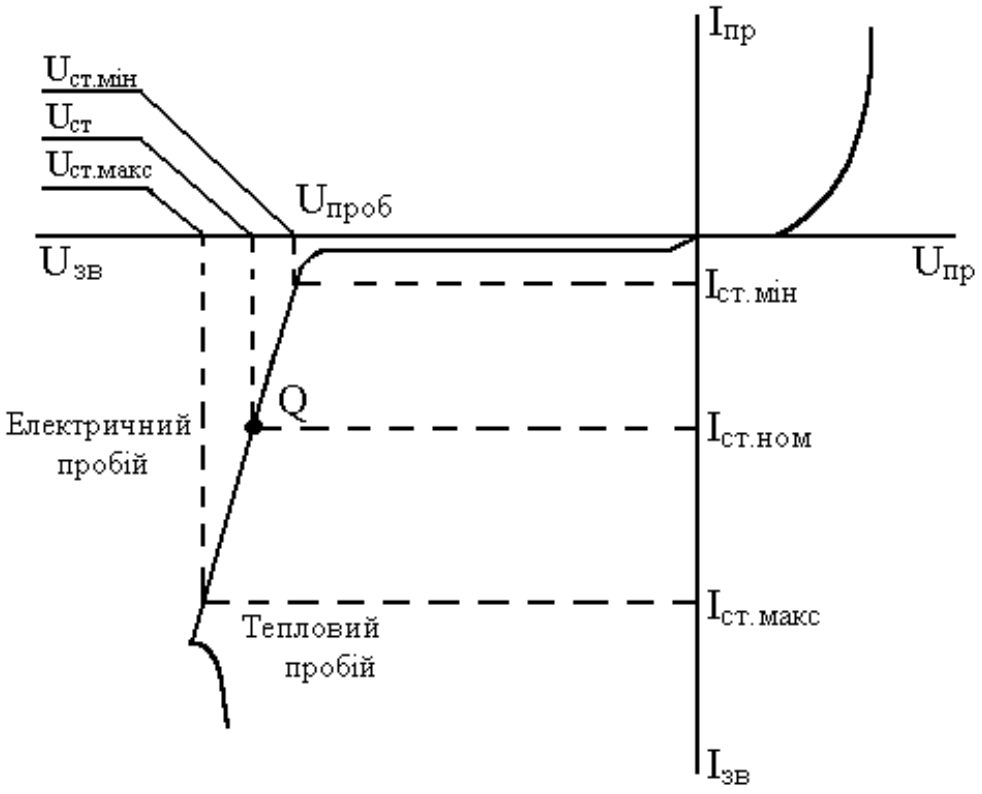


Рис. 1.12

Напруга пробою залежить від концентрації легуючої домішки, а отже, й товщини ЕДП. При високих рівнях легування ($>10^{16}$ см$^{-3}$) у дуже тонкій області ЕДП виникає сильне електричне поле і велика ймовірність тунелювання носіїв заряду через ЕДП при зворотних зміщеннях. У таких діодах розвивається тунельний пробій при напругах пробою 3,3В≤Uпроб≤5В.

При великій ширині ЕДП через низьку концетрацію легованої домішки при зворотних зміщеннях Uпроб≥7В виникає лавинний пробій. При 5В≤Uпроб≤7В механізм пробою змішаний. Оскільки ВАХ реального стабілітрона має різкий нахил у режимі пробою, то значення напруги стабілізації не збігається із Uпроб (рис. 1.12):

Для однозначного визначення Uст задається номінальним струмом стабілізації Іст.ном..

При струмі, меншому за мінімальний струм стабілізації Іст.мін, пробій стає нестійким. Максимально допустима розсіювана потужність стабілітрона

$$P_{max}=I_{ст.max}U_{ст.max} \qquad (1.23)$$

обмежує максимальне значення струму Іст.max і напруги Uст.max.

Нахил ВАХ стабілітрона в робочій області характеризується диференціальним опором:

$$r_{ст} = \frac{\partial U_{ст}}{\partial I_{ст}} \approx \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} \quad \bullet \tag{1.24}$$

Чим менший rст, тобто менший нахил ВАХ, тим вище якість стабілізації.

Статичний опір стабілітрона Rстат характеризує втрати в даній робочій точці Q (рис. 1.12):

$$R_{стат} = \frac{U_{ст}}{I_{ст.ном}} \quad \bullet \tag{1.25}$$

Коефіцієнт якості характеризується відношенням відносної зміни напруги стабілізації до викликаної нею відносної зміни струму стабілізації. Чим менший Qст, тим вище якість стабілізації

$$Q_{ст} = \frac{r_{ст}}{R_{стат}} = \frac{\partial U_{ст}}{U_{ст}} \Big/ \frac{\partial I_{ст}}{I_{ст}} \quad \bullet \tag{1.26}$$

Пряма ВАХ стабілітрона аналогічна ВАХ кремнієвого випрямного діода. Графічне позначення стабілітрона із вказівкою струму і напруги стабілізації показано на рис. 1.13:

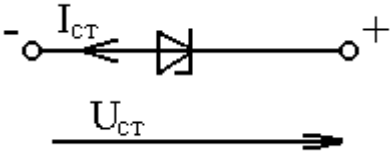


Рис. 1.13

Маркування стабілітронів складається з чотирьох елементів: перший елемент – К або 2 характеризує кремній, з якого зроблений стабілітрон; другий – літера С (стабілітрон); третій

елемент – тризначне число – визначає параметри; стабілітрони з Pmax<0,3Вт і Uст<10В-101-199, 10В<Uст<100В-201-299 і 100В<Uст<200В-301-399; Pmax≤5Вт – відповідно 402-499, 501-599, 601-699 і Pmax>5Вт – відповідно 701-799, 801-899, 901-999. Останні дві цифри показують числове значення номінальної еапруни стабілізації. Наприклад, у стабілітронів КС168А, 2С520Б і КС960А ця напруга становить відповідно 6,8; 20 і 160В.

Для моделювання ВАХ стабілітрона в режимі великого сигналу використовується нелінійна модель, схема заміщення якої зображена на рис. 1.14,а. Малосигнальна схема заміщення стабілітрона у робочому режимі показана на рис. 1.14,б.

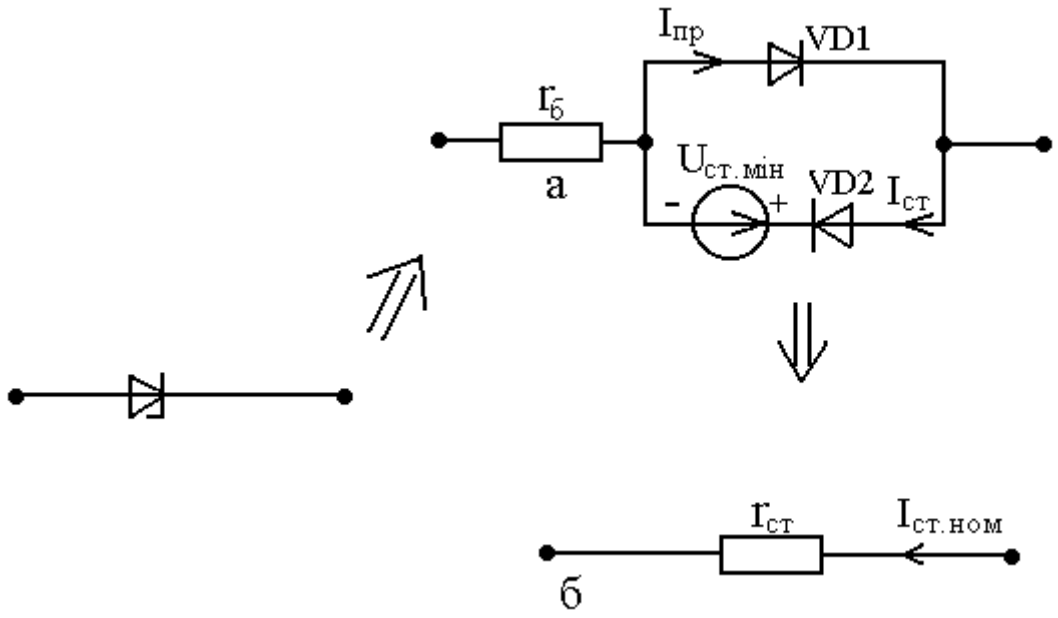


Рис. 1.14

У цій моделі резистор rб відображає опір матеріалу бази, діод VD1 моделює вітку ВАХ, яка описується рівнянням:

$$I_{пр} = I_0 \left(e^{\frac{U_{пр}}{m_1 \varphi_т}} - 1 \right). \qquad (1.27)$$

Джерело напруги Uст.min і діод VD2, який має різкий злам ВАХ, моделює зворотну вітку стабілізації. Рівняння цієї вітки:

$$I_{ст} = I_0 \left(e^{\frac{U_{зв} - U_{ст}}{m_2 \varphi_т}} - 1 \right), \qquad (1.28)$$

де Io – зворотний струм стабілітрона при |Uзв|<Uст.min; m1 і m2 – коефіцієнти неідеальності ВАХ.

Таким чином, параметрами нелінійної моделі є: Io, m1, m2, Uст.min і rб. Методика ідентифікації параметрів Io, m1, rб вище. Величину Uст.min вимірюють при струмі Iст.min або використовують її довідкове значення.

За нахилом ВАХ стабілізації у робочій точці Q (рис. 1.12) знаходять єдиний параметр лінійної моделі стабілітрона

$$r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}} = \frac{d(U_{зв} - U_{ст.min})}{d I_{ст}} = \frac{m_2 \varphi_т}{I_{ст.ном}} \cdot \qquad (1.29)$$

Отже, вимірюючи rст, ідентифікують параметр m2.

Оскільки електричний пробій є безінерціальним, то в моделях стабілітрона відсутні реактивні елементи.

Рівняння моделі напівпровідникового діода

Рівняння моделі – це рівняння, що описують співвідношення між струмом та напругою на полюсах діода, як у статичному режимі, так і в умовах змінного струму.

Статична модель

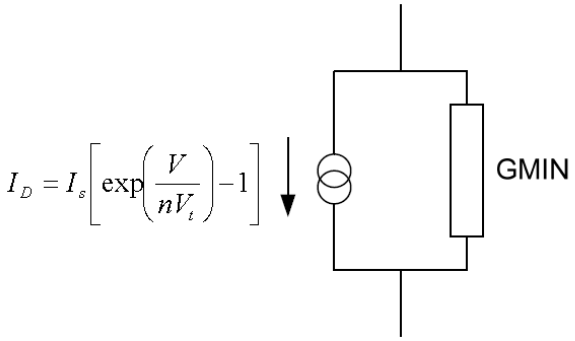
Просте рівняння постійного струму - це добре відоме рівняння Шоклі, тобто:

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{Vt} \right) - 1 \right]$$

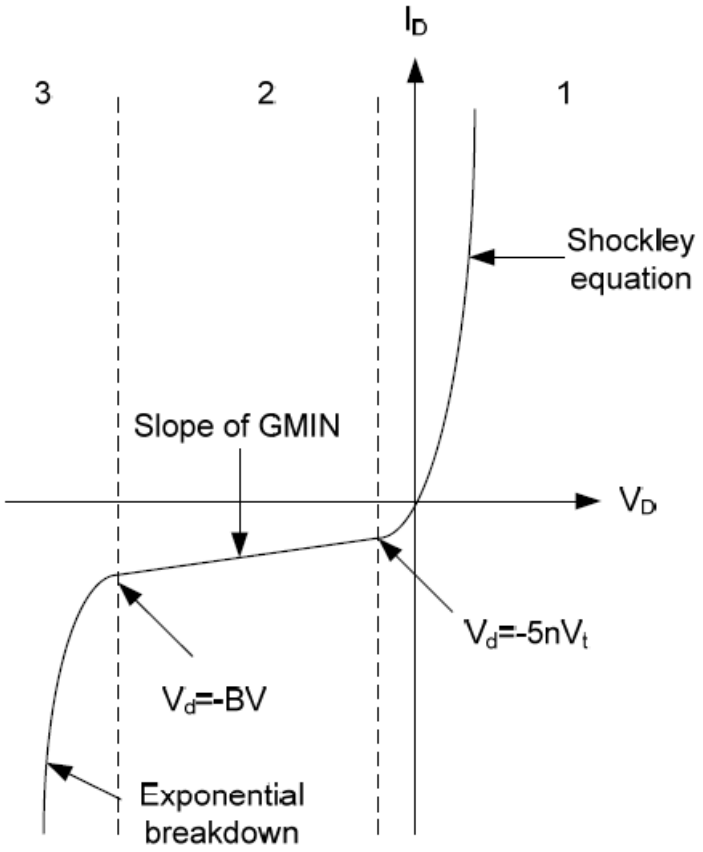
Де I_S – зворотній струм насичення діода, V - прикладена напруга, V_t - теплова напруга (дорівнює kT/q, яка становить близько 25 мВ при кімнатній температурі), а I_D - струм через пристрій.

Проста модель постійного струму, що використовується в SPICE, дуже схожа на рівняння Шоклі, з додаванням параметра *n* та допоміжної паралельної провідності GMIN. Основним рівнянням статичного режиму моделі діода є:

$$I_D = I_s\left[\exp\left(\frac{V}{nVt}\right)-1\right]+V_D GMIN$$



Параметр *n* - коефіцієнт неідеальності для діода, відомий також як коефіцієнт емісії. Він відповідає параметру SPICE під назвою N. У якісному діоді цей параметр буде прямувати до одиниці. Він підніметься вище 1, якщо є істотна рекомбінація носіїв у збідненому шарі. Таким чином n має тенденцію бути ближче до 1 під високим прямим зміщенням та більше 1 при малих напругах зміщення, тому що збіднений шар поступово зменшується при збільшенні прямого зміщення.



Іншим параметром SPICE з цього базового рівняння є тепловий струм IS.

Для того, щоб забезпечити більш швидке моделювання, вводиться просте наближення для помірних зворотніх зміщень. Коли $V_D < -5nV_t$, SPICE використовує припущення, що струм витікання через pn-перехід просто дорівнює IS.

Це означає, що загальний струм через повну статичну модель діода SPICE:

$$I_D = -I_s + V_D GMIN$$

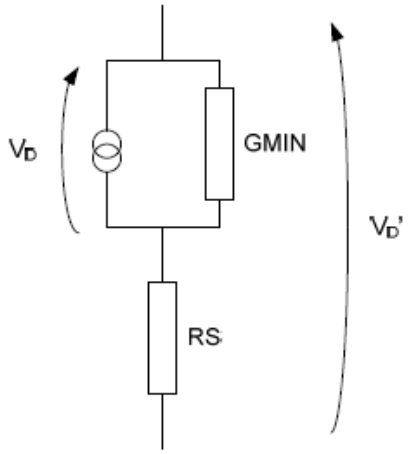
Модель також передбачає врахування режиму Зенерівського пробою, який описується параметрами SPICE BV та IBV, що відповідають напрузі та струму точки Зенера, або точки пробою.

Струм в області пробою моделюється рівнянням:

$$I_D = -I_s \left[\exp\left(\frac{BV + V_D}{V_t} \right) - 1 + \frac{BV}{V_t} \right]$$

У підсумку статична характерника моделі показана нижче:

Нарешті, до моделі діода додається послідовний опір для імітації опорів сполучних дротів та омічного контактного опору, що дає нам наступну просту статичну модель:



Таким чином $V_D' = V_D + I_D R_s$

Зведений перелік найважливіших параметрів статичної моделі діода:

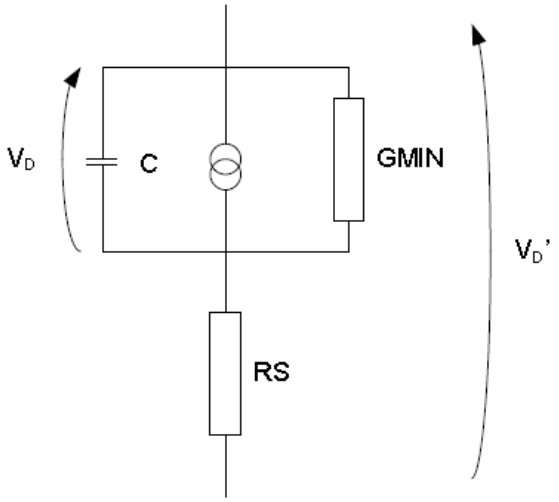
IS (*I s*)	Зворотний струм насичення
RS (*R s*)	Омічний опір контактів та проводів обв'язки
N (*n*)	Коефіцієнт емісії (або ідеальності)
BV	Напруга пробою (позитивне число)
IBV	Струм пробою (позитивне число)

Обмеження SPICE моделі діода

Модель діода SPICE першого рівня не включає ефекти високого рівня інжекції для потужних пристроїв.

Динамічна модель

Динамічні ефекти у діоді описуються за допомогою ємності, що включена між полюсами діода



Ця ємність складається з двох - дифузійної ємності та ємності бар'єру або збідненої області. Емність бар'єру домінує у зворотному зміщенні та дається наступним рівнянням:

$C_j = \dfrac{C_j(0)}{\sqrt{1 \pm \dfrac{V}{V_0}}}$ де знак залежить від напрямку прикладеної напруги, V_0 - висота потенційного бар'єру, $C_j(0)$ - бар'єрна ємність при нульовому зміщенні і залежить від характеристик pn-переходу

$$C_j(0) = A\sqrt{\frac{e\varepsilon N_A N_D V_0}{2(N_A + N_D)}}$$

Дифузійна ємність, Cd є домінуючою при прямому зміщенні. Ця ємність, пов'язана з неосновними носіями, інжектованими у нейтральні регіони. Рівняння дифузійної ємності, записується як:

$C_{диф} = I_D \tau \dfrac{e}{nkT}$, де τ - середній час прольоту через базу.

Зведений перелік найважливіших параметрів динамічної моделі діода:

CJ0 (Cj (0))	Бар'єрна ємність при нульовому зміщенні
TT (τ)	Час прольоту
VJ ($V0$)	Потенційний бар'єр переходу.

SPICE також має параметр області A, який може використовуватися для масштабування будь-якого pn переходу. Параметри IS , CJ0, RS та IBV увсі пропорційні площі пристрою. Отже, є два варіанти введення цих параметрів:

- ввести параметри для одиничного переходу та встановити відповідне значення A
- встановити A=1 та скоригувати геометричні параметри переходу відповідно до кількості пристроїв у області

Процедура ідентифікації моделі

Ідентифікацію параметрів моделі проводять за емпіричними даними за допомогою утіліти PARTS з комплекту pspice5, або ModelEditor з комплекту OrCAD 9+. Ці утіліти мають ідентичний функціонал.

Ідентифікація організована у вигляді послідовних етапів, на кожному етапі вводиться певний набір експериментальних чи табличних значень, розв'язується задача оптимізації та визначаються певні параметри моделі.

Крок 1: Моделювання струму прямого зміщення

Вхідні дані:

- Крива залежності прямого току Ifwd від прямого зміщення Vfwd. Для наближення функції, що близька до експоненціальної, необхідно та достатньо ввести три точки.

Отримані параметри моделі:

IS струм насичення

N коефіцієнт емісії

RS послідовний опір

IKF граничний струм для високого рівня інжекції

XTI температурний коефіцієнт струму насичення

EG ширина забороненої зони

Рекомендації:

Обирайте точки на кривій для малих струмів (у експоненціальній області), для середніх значень струму та для значень струму, де характеристика явно резистивна.

Параметри XTI та EG можуть бути відкориговані вручну. За замовчуванням вони встановлені у нормальні значення для кремнійових діодів.

Для діодів Шоткі вони мають бути встановлені у XTI=2 EG=0.69

Також бажано вводити криві для кількох значень температури.

Крок 2: Моделювання ємності переходу

Вхідні дані:

- Крива залежності бар'єрної ємності переходу Cj від зворотнього зміщення Vrev

Отримані параметри моделі:

CJO ємність за нульового зміщення

VJ потенціал переходу

M коефіцієнт не ідеальності переходу

FC коефіцієнт впливу ємності прямого зміщення

Рекомендації:

Цей крок призначений для оптимізації параметрів CJ0 та M відповідно до варикапної характеристики бар'єрної ємності переходу.

Параметр FC встановлений у нормальне значення для кремнійових діодів.

Як правило дял ключових діодів характеристика бар'єрної ємності не важлива при моделюванні на відміну від варикапів.

Слід зауважити, що у моделі не врахована ємність корпусу, яка при ретельному моделюванні має бути розрахована окремо.

Крок 3: Моделювання струму зворотнього зміщення

Вхідні дані:

- Крива залежності зворотнього струму (витікання) Irev від зворотнього зміщення Vrev
-

Отримані параметри моделі:

ISR рівень насичення струму рекомбінації

NR коефіцієнт емісії струму рекомбінації

Рекомендації:

Струм витікання моделює основний механізм витікання для зворотно зміщеного переходу – струм генерації-рекомбінації. Витікання може бути збільшене за рахунок від виробництва і враховане окремо.

Крок 4: Моделювання пробою

Вхідні дані:

Vz напруга у точці пробою (точці Зенера)

Iz струм у точці пробою

Zz імпеданс (нахил характеристики) у точці пробою

Отримані параметри моделі:

BV напруга пробою (позитивнее значення)

IBV струм пробою (позитивнее значення)

Рекомендації:

Параметри пробою мають бути ретельно змодельовані для стабілітронів. Значення відповідних параметрів моделі будуть знаходитись поблизу вказаної точки пробою з урахуванням експоненційності характеристики.

Особливе значення має точність вказаного нахилу характеристики.

Крок 5: Моделювання часу відновлення

Вхідні дані:

Trr час відновлення зворотнього струму

Ifwd значення прямого струму до переключення

Irev початкове значення зворотнього струму

Rl опір навантаження тестового стенду

Отримані параметри моделі:

TT час прольоту

Рекомендації:

На цьому кроці оцінюється значення часу прольоту через базу через визначення часу переключення діоду. Характеристики переключення подаються для діодів як правило у вигляді епюр струмів. Важливо врахувати у опорі навантаження опір вимірювального стенду та опір генератора.

Завдання

1. Обрати моделі діоду та стабілітрону відповідно до номеру варіанту
2. Отримати документацію на обрані моделі у бібліотеці
3. Провести ідентифікацію моделей обраних діодів
4. Для ключового діоду змоделювати схему для отримання його статичних характеристик.
5. Для стабілітрону змоделювати схему стабілізатора напруги без фільтрації
6. Порівняти статичні характеристики ключового діоду та рівень стабілізації стабілітрону із формальними значеннями та зробити висновки.

Варіанти

Варіант	Діод	Стабілітрон
1	DAN217T146	PDZVTR12B
2	HS1A	1N4727
3	UMP1NTR	YFZVFHTR3
4	BAW101	PDZVTR20B
5	UMN10NFHTR	PDZVTR13B
6	W7032DB	1N5221
7	BAW78	BZX84C2V4LT116
8	W7045MC	KDZLVTR75
9	1N4148W	RSBC6
10	STTH102	BZX84B15VLT116
11	SKN96	BZX84C2V7LT116
12	3RUS	PDZVTR36B
13	SKN152	1N746
14	DAN222MT2L	TFZVTR2
15	BAV199	PDZVTR22B
16	LS4148	VDZT2R4
17	BAW56	PDZVTR2
18	1N914WT	PDZVTFTR3
19	DAN217FHT146	TDZVTR6
20	1N4148	PDZVTR6
21	LH1	BZX84B13VLFHT116

Контрольні запитання

1. За яких ознак класифікують напівпровідникові діоди? Наведіть основні класи діодів.
2. Наведіть визначення випрямного діода.
3. Назвіть методи отримання p-n переходів випрямних діодів.
4. Наведіть переваги та недоліки германієвих і кремнієвих випрямних діодів.
5. Поясніть температурну залежність ВАХ діодів.

6. Чим зумовлена інерційність діодів до швидких змін струму та напруги?
7. Дати визначення бар’єрної і дифузійної ємності.
8. Яка ємність більша – Сб чи Сд?
9. Коли переважає бар’єрна і коли дифузійна ємність?
10. Побудувати графік Сб(U), Cg(U).
11. Як впливає характер розподілу домішок в переході на залежність бар’єрної ємності від напруги?
12. Що таке коефіцієнт нелінійності та коефіцієнт перекривання бар’єрної ємності?
13. Як зменшити tвід, tвст, tерс?
14. Які існують моделі діодів?
15. Як визначити динамічні парамнтри моделей діода?
16. Який діод – германієвий чи кремнієвий – є більш ідеальним ключовим елементом?
17. Який із параметрів tерс чи tроз більший і чому?
18. Види електричних пробоїв ЕДП.
19. Позначення стабілітронів.
20. Схема вмикання стабілітронів.
21. ВАХ і параметри стабілітронів.
22. Чим визначаються значення параметрів Іст.min, Іст.max, Uст.min, Uст,Uст.max?
23. Як змінюється Uст при підвищенні темперетури у різних типів стабілітронів?
24. Схема вимірювання ВАХ стабілітрона.
25. Які твердотільні прилади називаються стабілітронами?
26. Де використовують стабілітрони?
27. Моделі стабілітрона.
28. Як ідентифікують параметри моделей стабілітрона?