

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання курсового проекту

з дисципліни

**„ТВЕРДОТІЛА ЕЛЕКТРОНІКА“**

152 „Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка“

(освітня програма: „Якість, стандартизація та сертифікація“);

153 „Мікро- та наносистемна техніка“

(освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“)

денної й заочної форм навчання

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни „Твердотіла електроніка” 152 „Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка“ (освітня програма: „Якість, стандартизація та сертифікація“); 153 „Мікро- та наносистемна техніка“ (освітня програма: „Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої“) денної й заочної форм навчання / Укл.: А. В. Коротун, Н. А. Смирнова, Н. М. Нагорна. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 60 с.

Укладачі: А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук,  
Н. А. Смирнова, ст. викладач,  
Н. М. Нагорна, ст. викладач

Рецензент: В. В. Погосов, проф., д-р фіз.-мат. наук

Відповідальний за випуск: А. В. Коротун, доц., канд. фіз.-мат. наук

Затверджено  
на засіданні кафедри  
мікро- та наноелектроніки

Протокол №8  
від “ 26 ” лютого 2020 р.

Рекомендовано до видання  
НМК ФРЕТ  
Протокол №7  
від “ 27 ” лютого 2020 р.

## ЗМІСТ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Мета і завдання курсового проекту.....                                                     | 6  |
| 1.1 Завдання на проект.....                                                                  | 7  |
| 1.2 Організаційні вказівки.....                                                              | 7  |
| 1.3 Методичні вказівки до виконання розділів курсового проекту.....                          | 8  |
| 1.4 Вказівки щодо оформлення і захисту курсового проекту...                                  | 10 |
| 2 Розрахунок деяких параметрів напівпровідника і $p$ - $n$ -переходу.....                    | 11 |
| 2.1 Концентрація власних носіїв заряду.....                                                  | 11 |
| 2.2 Концентрація основних і неосновних носіїв заряду.....                                    | 11 |
| 2.3 Рухливість носіїв заряду.....                                                            | 12 |
| 2.4 Коефіцієнт дифузії носіїв заряду, дифузійна довжина і питомий опір.....                  | 12 |
| 2.5 Розрахунок концентрації домішкових атомів за заданим питомим опором напівпровідника..... | 13 |
| 2.6 Коефіцієнт лавинного множення і напруга лавинного пробую $p$ - $n$ -переходу.....        | 14 |
| 2.7 Товщина збідненого шару.....                                                             | 15 |
| 2.8 Контактна різниця потенціалів.....                                                       | 16 |
| 3 Випрямляючий діод.....                                                                     | 16 |
| 3.1 Вихідні дані і результати розрахунків.....                                               | 16 |
| 3.2 Розрахунок параметрів діоду.....                                                         | 17 |
| 3.2.1 Розрахунок робочої зворотної напруги.....                                              | 17 |
| 3.2.2 Розрахунок зворотного струму діода.....                                                | 17 |
| 3.2.3 Максимальний прямий струм діоду і максимальне пряме падіння напруги.....               | 18 |
| 3.2.4 Бар'єрна ємність діоду.....                                                            | 19 |
| 3.2.5 Час відновлення зворотного опору.....                                                  | 20 |
| 3.3 Розрахунок характеристик.....                                                            | 20 |
| 3.3.1 Пряма гілка ВАХ.....                                                                   | 20 |
| 3.3.2 Зворотна гілка ВАХ.....                                                                | 20 |
| 3.3.3 Температурна залежність прямого падіння напруги діоду.....                             | 21 |
| 3.3.4 Температурну залежність зворотного струму.....                                         | 21 |
| 3.4 Розрахунок перехідного процесу.....                                                      | 21 |
| 4 Біполярний транзистор.....                                                                 | 25 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Вихідні дані і результати розрахунків.....                                                               | 25 |
| 4.2 Розрахунок параметрів.....                                                                               | 26 |
| 4.2.1 Коефіцієнт передачі струму в схемі з загальною базою...                                                | 26 |
| 4.2.2 Робоча напруга колекторного переходу.....                                                              | 27 |
| 4.2.3 Струм спокою транзистора.....                                                                          | 29 |
| 4.2.4 Максимальний струм колектора.....                                                                      | 30 |
| 4.3 Розрахунок енергетичної діаграми.....                                                                    | 30 |
| 4.4 Малосигнальні параметри.....                                                                             | 32 |
| 4.4.1 Розрахунок параметрів $T$ -подібної еквівалентної схеми...                                             | 32 |
| 4.4.2 Параметри транзистора як чотирьохполюсника.....                                                        | 35 |
| 4.5 Частотні параметри транзистора.....                                                                      | 35 |
| 4.6 Розрахунок характеристик і залежностей.....                                                              | 36 |
| 4.6.1 Розрахунок залежності коефіцієнта підсилення транзистора від напруги колектора.....                    | 36 |
| 4.6.2 Розрахунок впливу ступеня легування вихідного кристалу на коефіцієнт підсилення.....                   | 36 |
| 4.6.3 Розрахунок впливу ступеня легування вихідного кристалу на максимальну напругу колекторного переходу... | 37 |
| 4.6.4 Розрахунок вихідної характеристики транзистора виконується за схемою з ЗЕ.....                         | 37 |
| 5 Тиристор.....                                                                                              | 40 |
| 5.1 Вихідні дані і результати розрахунків.....                                                               | 40 |
| 5.2 Розрахунок параметрів і характеристик тиристора.....                                                     | 41 |
| 5.2.1 Структура і принцип дії.....                                                                           | 41 |
| 5.2.2 Струми насичення переходів.....                                                                        | 43 |
| 5.2.3 Коефіцієнт передачі.....                                                                               | 44 |
| 5.2.4 Опір шунтування.....                                                                                   | 44 |
| 5.2.5 Робоча напруга тиристора.....                                                                          | 45 |
| 5.2.6 Струм включення.....                                                                                   | 45 |
| 5.2.7 Струм закритого тиристора.....                                                                         | 47 |
| 5.2.8 Вольт-амперна характеристика відкритого тиристора.....                                                 | 49 |
| 5.2.9 Максимальний прямий струм відкритого тиристора.....                                                    | 50 |
| 5.2.10 Максимальна напруга відкритого тиристора.....                                                         | 50 |
| 5.2.11 Робоча напруга закритого тиристора.....                                                               | 50 |
| 5.2.12 Струм закритого тиристора.....                                                                        | 50 |
| 5.2.13 Розрахунок ВАХ тиристора (пряма гілка).....                                                           | 52 |
| 5.2.14 Розрахунок зворотної гілки ВАХ.....                                                                   | 54 |
| Перелік рекомендованих посилань.....                                                                         | 56 |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Додаток А Приклад оформлення титульної сторінки.....     | 57 |
| Додаток Б Вихідні параметри випрямляючого діоду.....     | 58 |
| Додаток В Вихідні параметри біполярного транзистора..... | 59 |
| Додаток Г Вихідні параметри кремнієвого тиристора.....   | 60 |

## 1 МЕТА І ЗАВДАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект виконується відповідно до встановленого навчального плану в п'ятому семестрі й є обов'язковою формою звіту.

Метою виконання курсового проекту є формування у студентів навичок самостійної науково-дослідницької діяльності й оформлення отриманих результатів. Задачі курсової роботи полягають у систематизації, закріпленні і розширенні теоретичних знань, отриманих на лекціях і семінарах.

За бажанням студент може надати підготовлену до друку наукову статтю (наприклад, огляд літератури з актуальної теми), тези доповіді на науковій конференції, що не є обов'язковим для всіх студентів, але враховується при захисті курсової роботи.

Завданням курсового проекту є підготовка студента до виконання більш складної задачі – дипломного проекту. Він залучає студентів до самостійної творчої роботи з літературою, привчає виділяти в ній основні положення, що стосуються обраної проблеми, підбирати, обробляти і аналізувати конкретний матеріал, складати таблиці і діаграми, і на їх базі робити відповідні висновки. Крім того, студент привикає чітко, послідовно і грамотно викладати свої думки при аналізі теоретичних проблем і вчиться творчо застосовувати теорію, пов'язувати її з практикою; закріплює навички роботи на комп'ютері в процесі пошуку необхідної інформації і оформлення роботи.

Курсовий проект спрямований на закріплення теоретичних знань з твердотільної електроніки і практичне освоєння методик розрахунку електричних параметрів і характеристик напівпровідникових приладів – випрямляючих діодів, біполярних транзисторів і тиристорів та елементної бази інтегрованих схем.

Темою курсового проекту за узгодженням із викладачем може бути розрахунок електричних параметрів, характеристик і топології інших напівпровідникових приладів і елементів інтегрованих схем, поглиблена розробка окремих питань фізики напівпровідникових приладів або розрахунок і математичне моделювання основних фізичних процесів у напівпровідникових приладах, елементній базі мікросхем, наукові дослідження тощо.

Всі розрахунки виконуються на прикладі ступінчастих  $p$ - $n$ -переходів.

Під час виконання завдання студент повинен користуватися лекціями з дисциплін, підручниками, довідковою літературою, діючими стандартами, патентними матеріалами та оригінальною вітчизняною та закордонною науковою літературою. Розрахунки виконуються на комп'ютері.

Пояснювальна записка супроводжується переліком використаної літератури із посиланням на неї по тексту у квадратних дужках ([1]).

### **1.1 Завдання на проект**

Грунтуючись на методичних вказівках по виконанню курсової роботи сформувати курсову роботу відповідно до обраної теми та варіанту, підготувати для її захисту презентацію.

### **1.2 Організаційні вказівки**

Особливу увагу студент повинен приділити всебічному і глибокому теоретичному освітленню проблеми, що вивчається, в цілому, так і окремих її частин. Важливо, щоб матеріал курсової роботи викладався логічно, послідовно і чітко.

Для повного і правильного розкриття змісту обраної теми курсової роботи студенту необхідно:

- вивчити наукові роботи з даної проблеми (монографії, статті);
- спиратися на навчальну літературу з відповідної дисципліни.

Однією з найважливіших вимог, що висувуються до студентів, є самостійне і творче виконання курсової роботи.

Етапи підготовки курсової роботи оцінює викладач. Відставання у строках впливає на загальну оцінку.

Виконання курсової роботи доцільно розбити на шість етапів:

- вибір тематики;
- підбір і вивчення літератури;
- складання плану роботи;
- збір і обробка фактичного і статистичного матеріалу;
- написання курсової роботи;
- захист курсової роботи.

Починати вивчення теми краще всього з ознайомлення з відповідними розділами підручників. Потім слід переходити до ознайомлення з більш складним матеріалом – загальною і спеціальною літературою. Вивчаючи матеріал, потрібно намагатись знайти ту інформацію, яка необхідна для роботи. Під час вивчення з'ясуються всі незнайомі слова і терміни. Для цього слід скористатися словниками і довідниками.

Після проведення попередньої і, мабуть, найбільш трудомісткої роботи, можна переходити до написання окремих розділів курсового проекту.

Курсові проекти повинні відповідати вимогам СТП 15-1 за змістом і оформленням.

### **1.3 Методичні вказівки до виконання розділів курсового проекту**

Курсовий проект має бути написаний літературною мовою. Мова, стиль викладення, вміння будувати стислі речення, виражати свою думку в зрозумілій формі, що не допускає розбіжностей, має велике значення.

Слід дотримуватись одноманітності у застосуванні термінів, умовних позначень і скорочень слів. Щоб запобігти стилістичних помилок, рекомендовано використовувати сучасні видання словників, довідників і енциклопедій.

Курсовий проект складається з:

- реферативного огляду, систематизації і аналізу публікацій з певної тематики, пов'язаної з спеціальністю, що вивчається.
- дослідження актуальної задачі зі спеціальності;
- розробки програмного забезпечення.

Реферативний огляд включає наступні розділи:

- обґрунтування актуальності обраної тематики і опис мети виконання роботи;
- систематизація і аналіз матеріалів, знайдених у наукових друкованих виданнях, мережі Інтернет й ін.;
- висновки;
- пропозиції з використання результатів роботи в конкретних областях і можливі напрямки подальших досліджень.

Дослідження актуальної задачі включає наступні розділи:

- опис (постановка) задачі;
- обґрунтування актуальності задачі;
- огляд інформації, знайденої у відкритих джерелах, де освітлюється дана задача або області дослідження;
- дослідження задачі.

Текст курсового проекту оформлюється згідно до вимог СТП 15-

1. Структура курсового проекту така:

- титульний лист;
- зміст;
- вступ;
- основна частина;
- висновки;
- перелік використаних джерел;
- додатки.

Приклад оформлення титульного листа і змісту наведені у Додатку А.

Вступ містить короткий огляд роботи, де освітлюється загальне уявлення про проблему, яка досліджується, і отримані результати. Обсяг вступу 1–4 сторінки.

Починати Вступ доцільно з постановки проблеми, обґрунтування вибору теми і розкриття змісту основних понять, що фігурують у назві роботи. Коротко слід зупинитись на розкритті основних теоретичних положень:

- *актуальність* теми дослідження – коротко наводиться ступінь її важливості для вирішення проблеми питання або задачі;
- *мета роботи* – що ми отримаємо при проведенні дослідження (розрахунку);
- *постановка задачі* – формулювання задачі проекту згідно з темою;
- *об'єкт дослідження* – процес або явище, вибране для вивчення;
- *предмет дослідження* – те, що знаходиться в межах об'єкта. Об'єкт і предмет дослідження співвідносяться між собою як ціле і частина, або як загальне і часткове.
- *Задача дослідження* – це ті дослідницькі дії, які необхідно виконати для досягнення поставленої в роботі мети, рішення

проблеми або для перевірки сформульованої гіпотези дослідження.

- *Методи дослідження* – вказуються методи і методики, за допомогою яких було проведено дослідження з вказівкою літературних джерел.

В основній частині розкривається зміст теми. Основна частина складається з теоретичної і експериментальної частин:

- Розділ 1. Теоретична частина
  - 1.1
  - 1.2
  - ...
- Розділ 2. Експериментальна частина
  - 2.1 Мета, задачі дослідження
  - 2.2 Методика дослідження
  - 2.3 Результати дослідження
  - 2.4 Обговорення результатів
- Висновки

Висновки містять коротке викладення основних результатів, отриманих у роботі (1–3 стор.). В нього можуть включатись рекомендації відносно перспектив продовження даної роботи.

Перелік використаних джерел є обов'язковою частиною курсової роботи. Приклад оформлення переліку наведений на стор. 52.

#### **1.4 Вказівки щодо оформлення і захисту курсового проекту**

Друкувати текст слід на одній стороні аркуша формату А4 (210х297 мм) з полями: верхнє і нижнє – 20 мм, ліве – 25 мм, праве – 10 мм. Текст друкується через півтора інтервали, відступ першого рядка – 1,25 мм. Шрифт: Times New Roman Сутг, розмір шрифту – 14 пт.

Сторінки роботи слід нумерувати арабськими цифрами, дотримуючись наскрізної нумерації по всьому документу. Титульний лист включається в загальну нумерацію, але номер сторінки на ньому не проставляється. Ілюстрації, таблиці, графіки, розташовані на окремих аркушах, включаються в загальну нумерацію сторінок.

## 2 РОЗРАХУНОК ДЕЯКИХ ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКА І Р-N-ПЕРЕХОДУ

### 2.1 Концентрація власних носіїв заряду

Концентрація власних носіїв заряду в напівпровідникові визначається його шириною забороненої зони та температурою і може бути обчислена за формулою

$$n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\Delta E_g^0}{2k_B T}}, \quad (2.1)$$

де  $k_B$  – стала Больцмана

( $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К  $= 0,8616 \cdot 10^{-4}$  еВ/К);

сталі  $\Delta E_{g0}$  (наведена ширина забороненої зони) та  $A$  залежать від типу напівпровідника:

для кремнію  $A = 3,87 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{К}^{-3/2}$ ,  $\Delta E_{g0} = 1,21 \text{ еВ}$ ;

для германію  $A = 1,76 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{К}^{-3/2}$ ,  $\Delta E_{g0} = 0,875 \text{ еВ}$ .

### 2.2 Концентрація основних і неосновних носіїв заряду

Концентрація електронів і дірок в некомпенсованому напівпровідникові може бути обчислена за наступними формулами:

для напівпровідника типу  $p$

$$p = \frac{1}{2} \left( \sqrt{N_a^2 + 4n_i^2} + N_a \right), \quad n = \frac{n_i^2}{p}, \quad (2.2)$$

для напівпровідника типу  $n$

$$n = \frac{1}{2} \left( \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2} + N_d \right), \quad p = \frac{n_i^2}{n}. \quad (2.3)$$

В тих випадках, коли виконується наближення невласного напівпровідника (тобто коли  $n_i \ll N$ ), розрахунок концентрації  $p$  та  $n$  спрощується:

для напівпровідника  $p$ -типу

$$p = N_a, \quad n = \frac{n_i^2}{p},$$

для напівпровідника типу  $n$

$$n = N_d, \quad p = \frac{n_i^2}{n}.$$

### 2.3 Рухливість носіїв заряду

Рухливість носіїв заряду в напівпровідникові залежить від концентрації домішкових атомів і температури. Залежність рухливості від температури розраховується за формулою

$$\mu = \mu^{300} (T - 300)^{-b}, \quad (2.4)$$

де  $\mu^{300}$  – рухливість при температурі 300 К ;

$b$  – стала, значення якої дорівнює:

|            |                |      |
|------------|----------------|------|
| в кремнії  | для електронів | 2,50 |
|            | для дірок      | 2,70 |
| в германії | для електронів | 1,66 |
|            | для дірок      | 2,38 |

Залежність рухливості носіїв заряду від концентрації домішкових атомів складна, її можна представити тільки графіком або таблицею експериментальних даних. Для розрахунку цієї залежності можна використати метод інтерполяції.

Розрахунок рухливості носіїв заряду за заданими величинами концентрацій домішкових атомів і температур кристалу рекомендується виконувати на ЕОМ.

### 2.4 Коефіцієнт дифузії носіїв заряду, дифузійна довжина і питомий опір

Коефіцієнт дифузії носіїв заряду пов'язаний з його рухливістю співвідношенням:

$$D = \varphi_T \mu, \quad (2.5)$$

де  $\varphi_T = \frac{kT}{q}$  – тепловий потенціал, але його зручніше обчислювати за наступною формулою:

$$\varphi_T = 0,0258 \frac{T}{300}. \quad (2.6)$$

Дифузійна довжина для нерівноважних носіїв заряду зв'язана з коефіцієнтом дифузії і часом життя співвідношенням:

$$L = \sqrt{D\tau}, \quad (2.7)$$

Питомий опір напівпровідника можна розрахувати за концентрацією домішкових атомів

$$\rho = \frac{1}{e\mu_0 N}, \quad (2.8)$$

де  $\mu_0$  – рухливість основних носіїв заряду.

Остання формула справедлива, якщо виконується наближення невластного напівпровідника.

## **2.5 Розрахунок концентрації домішкових атомів за заданим питомим опором напівпровідника**

З формули (2.8) одержуємо:  $N = \frac{1}{e\mu_0 \rho}$ . Але складність

полягає у тому, що при виконанні розрахунку необхідно враховувати залежність рухливості від концентрації домішкових атомів в напівпровідникові. В зв'язку з цим, остання формула повинна бути записана наступним чином:

$$N = \frac{1}{q\mu_0(N)\rho}.$$

Тому задача розрахунку  $N$  зводиться до рішення рівняння

$$e\mu_0(N)\rho N - 1 = 0,$$

основна складність вирішення якого полягає в тому, що функція  $\mu_0(N)$  не має аналітичного опису.

## 2.6 Коефіцієнт лавинного множення і напруга лавинного пробою $p$ - $n$ -переходу

Припустимо, що  $p$ - $n$ -перехід є східчастим і несиметричним. Для визначення коефіцієнта лавинного множення зазвичай використовують емпіричну формулу:

$$M = \left[ 1 - \left( \frac{U_{зв}}{U_{л}} \right)^n \right]^{-1}, \quad (2.9)$$

де  $U_{зв}$  – зворотна напруга, прикладена до переходу;

$n$  – емпірична стала;

$U_{л}$  – напруга лавинного пробою переходу, В.

Розрахунок напруги лавинного пробою виконують за формулою:

$$U_{л} = m(\rho)^k, \quad (2.10)$$

де  $\rho$  – питомий опір високоомної області, Ом·см;

$m, k$  – емпіричні сталі.

Якщо, наприклад, розраховується напруга лавинного пробою переходу типу  $p^+-n$ , то в формулу (2.10) слід підставити питомий опір  $n$  області.

Значення емпіричних констант  $n, m, k$  залежать від типу переходу напівпровідника та обираються за допомогою табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення емпіричних констант  $n, m, k$

| Матеріал | Тип переходу | $n$ | $m$  | $k$  |
|----------|--------------|-----|------|------|
| Кремній  | $p^+-n$      | 5   | 86   | 0,65 |
|          | $n^+-p$      | 3   | 23   | 0,75 |
| Германій | $p^+-n$      | 3   | 83,4 | 0,61 |
|          | $n^+-p$      | 6   | 52   | 0,61 |

## 2.7 Товщина збідненого шару

Товщина збідненого шару східчастого переходу визначається за формулою:

$$L = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_k - U)}{eN_{\text{âô}}}}, \quad (2.11)$$

де

$$N_{\text{ef}} = \frac{N_{ap}N_{dn}}{N_{ap} + N_{dn}}, \quad (2.12)$$

де  $N_{ap}, N_{dn}$  – концентрація домішкових атомів в  $p$ - та  $n$ -областях відповідно.

З іншого боку  $L$  можна представити у вигляді суми:

$$L = l_p + l_n, \quad (2.13)$$

де  $l_p$  – товщина тієї частини збідненого шару, що знаходиться в  $p$ -області;

$l_n$  – товщина тієї частини збідненого шару, що знаходиться в  $n$ -області.

Ці величини пов'язані наступним співвідношенням:

$$l_p = \frac{N_{dn}}{N_{ap}} l_n. \quad (2.14)$$

З останніх двох формул одержуємо:

$$l_n = \frac{N_{ap}}{N_{ap} + N_{dn}} L, \quad (2.15)$$

$$l_p = \frac{N_{dn}}{N_{ap} + N_{dn}} L. \quad (2.16)$$

Приведені формули дозволяють знаходити величини  $L, l_p, l_n$ .

## 2.8 Контактна різниця потенціалів

Контактна різниця потенціалів  $p$ - $n$ -переходу розраховується за формулою:

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{N_{ap} N_{dn}}{n_i^2}. \quad (2.17)$$

## 3 ВИПРЯМЛЯЮЧИЙ ДІОД

### 3.1 Вихідні дані і результати розрахунків

Для виготовлення випрямляючих діодів в якості вихідного напівпровідникового матеріалу в більшості випадків використовується кремній. Випрямляючий діод звичайно має структуру  $p^+-n$ . Формування емітерної (низькоомної) області з акцепторним типом провідності дозволяє отримати більш високі напруги пробою. В зв'язку з цим розрахунки параметрів і характеристики діоду рекомендується виконувати в припущенні, що діод є кремнієвим і має структуру типу  $p^+-n$ .

Вихідні дані для виконання розрахунків:

$d$  – діаметр кремнієвої структури;

$h$  – товщина кремнієвої пластини;

$w$  – глибина залягання  $p$ - $n$ -переходу;

$N_{\delta}$  – концентрація домішкових атомів у вихідному кремнії;

$N_e$  – концентрація домішкових атомів в емітерній області;

$\tau_{\delta}$  – час життя нерівноважних носіїв у вихідному кремнії;

$R_T$  – тепловий опір корпусу діоду.

В результаті розрахунків повинні бути отримані значення основних електричних параметрів діоду:

$U_{зв}$  – робоча зворотна напруга діода;

$I_{зв}$  – зворотний струм діоду;

$I_m$  – максимальний прямий струм діоду;

$j_m$  – максимальна густина струму  $p$ - $n$ -переходу;

$U_F$  – пряме падіння напруги діоду;

$t_{відн}$  – час відновлення зворотного опору.

Разом з цими параметрами повинні бути розраховані наступні характеристики:

- падіння напруги на переході, падіння напруги на базовій області і повне падіння напруги діоду як функції прямого струму;
- зворотний струм діоду як функція зворотної напруги;
- температурна залежність прямого падіння напруги діоду;
- зворотний струм діоду як функція температури кристалу;
- перехідний процес при переключенні діоду.

Параметри  $I_m$ ,  $U_F$  розраховуються для максимально допустимої температури кристалу 413 К, інші параметри – для температури 300 К.

### 3.2 Розрахунок параметрів діоду

**3.2.1 Розрахунок робочої зворотної напруги** виконується за умовою:

$$U_{зв} = 0,7 \min \{ U_{л}, U_{прок} \}, \quad (3.1)$$

де  $U_{л}$  – напруга лавинного пробою;

$U_{прок}$  – напруга проколу (напруга замикання).

Множник 0,7 має сенс коефіцієнта запасу. Розрахунок  $U_{л}$  розглядається в п. 2.6. Напруга проколу розраховується з умови рівності товщини збідненого шару товщині бази:

$$L(U_{прок}) = w_6.$$

Використовуючи для  $L(U)$  формулу східчастого переходу, одержуємо:

$$U_{прок} = \frac{qN_6 w_6^2}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (3.2)$$

**3.2.2 Розрахунок зворотного струму діода** виконується за умови, що на діод діє зворотна напруга, що дорівнює  $U_{зв}$ . Зворотний струм діоду

$$I_{\text{зв}} = M(I_s + I_g), \quad (3.3)$$

де  $M$  – коефіцієнт лавинного множення (формула 2.8);  
 $I_s$  – струм насичення переходу:

$$I_s = eSn_i^2 \left( \frac{L_{\delta}}{\tau_{\delta}N_{\delta}} + \frac{L_e}{\tau_eN_e} \right), \quad (3.4)$$

де  $L_{\delta}, L_e$  – дифузійні довжини нерівноважних носіїв заряду (формула 2.7).

Час життя нерівноважного носія заряду зворотно пропорційний ступеню легування кристалу, тому

$$\tau_e N_e = \tau_{\delta} N_{\delta}. \quad (3.5)$$

З урахуванням цієї рівності одержуємо

$$I_s = \frac{eSn_i^2}{\tau_{\delta}N_{\delta}} (L_{\delta} + L_e). \quad (3.6)$$

Генераційний струм переходу

$$I_g = \frac{eSLn_i}{2\tau_{\delta}}. \quad (3.7)$$

Товщину збідненого шару  $L$  і коефіцієнт лавинного множення  $M$  слід розраховувати для напруги  $U_{\text{зв}}$ .

**3.2.3 Максимальний прямий струм діоду і максимальне пряме падіння напруги** знаходяться з умови рівності потужності, що виділяється при проходженні струму через діод, і теплової потужності, що віддається в навколишнє середовище:  $P_{\text{ел}} = P_{\text{тепл}}$ .

Електрична потужність дорівнює:  $P_{\text{ел}} = IU(I)$ .

Теплова потужність визначається перепадом температур між  $p$ - $n$ -переходом і зовнішньою поверхнею корпусу діоду:

$$P_{\text{тепл}} = \frac{T_{jm} - T_k}{R_T},$$

де  $T_{jm} = 413 \text{ К}$  – максимально допустима температура переходу;

$T_k = 300 \text{ К}$  – температура корпусу діоду.

Рівність величин  $P_{\text{ел}}$  і  $P_{\text{тепл}}$  дає рівняння

$$IU(I) - \frac{T_{jm} - T_k}{R_T} = 0. \quad (3.8)$$

Падіння напруги діоду для струму  $I$

$$U(I) = \varphi_T \ln \frac{I}{I_s} + R_{\bar{\sigma}}(I)I. \quad (3.9)$$

Опір бази площинного випрямляючого діоду залежить від струму діоду (ефект модуляції опору бази). Залежність  $R_{\bar{\sigma}}(I)$  описується наступними співвідношеннями:

$$R_{\bar{\sigma}} = \frac{R_{\bar{\sigma}_0}}{x_{\bar{\sigma}} A} \ln \frac{(C - A)(B + A)}{(C + A)(B - A)}; \quad (3.10)$$

$$\text{де } A = \sqrt{1 + \alpha^2}; \quad B = 1 + \alpha; \quad C = 1 + \alpha e^{x_{\bar{\sigma}}}; \quad \alpha = I/I_x;$$

$$I_x = \frac{\phi_T x_{\bar{\sigma}} \operatorname{ch} x_{\bar{\sigma}}}{R_{\bar{\sigma}_0}}; \quad x_{\bar{\sigma}} = w_{\bar{\sigma}} / L_{\bar{\sigma}}.$$

Струм, що задовольняє рівнянню (3.8), представляє собою потрібний параметр – максимальний прямий струм діоду  $I_m$ . Максимальне падіння напруги розраховується за допомогою (3.9) для  $I = I_m$ .

Разом з максимальним струмом діоду слід також розрахувати максимальну густину струму  $p$ - $n$ -переходу  $j_m$ .

**3.2.4 Бар'єрна сміність діоду при нульовому зміщенні**  
розраховується за формулою:

$$C_{\sigma_0} = S \sqrt{\frac{q \varepsilon \varepsilon_0 N_{\sigma}}{2 \varphi_k}}. \quad (3.11)$$

**3.2.5 Час відновлення зворотного опору** визначається шляхом розрахунку перехідного процесу переключення діоду.

### 3.3 Розрахунок характеристик

**3.3.1 Пряма гілка ВАХ** розраховується наступним чином. Представимо падіння напруги на діоді у вигляді суми:

$$U_F = U_j + U_{R_{\sigma}},$$

де  $U_j$  – падіння напруги на переході;

$U_{R_{\sigma}}$  – падіння напруги на опорі бази.

Напруга переходу зв'язана зі струмом співвідношенням:

$$U_j = \varphi_T \ln \left( \frac{I}{I_s} + 1 \right), \quad (3.12)$$

а напруга на опорі бази:

$$U_{R_{\sigma}} = R_{\sigma}(I)I. \quad (3.13)$$

Функція  $R_{\sigma}(I)$  знаходиться за допомогою співвідношень (3.10).

**3.3.2 Зворотна гілка ВАХ** описується формулою:

$$I_{3\sigma} = M(I_s + I_g), \quad (3.14)$$

де  $M$  – коефіцієнт лавинного множення (формула 2.9);

$I_s$  – струм насичення переходу (формула 3.6);

$I_g$  – генераційний струм переходу, залежність якого від  $U_{3\sigma}$

описується формулою:

$$I_g = B \sqrt{\varphi_k + U_{3\sigma}}, \quad (3.15)$$

де

$$B = \frac{n_i S}{\tau_{\delta}} \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0}{2 N_{\delta}}} . \quad (3.16)$$

**3.3.3 Температурна залежність прямого падіння напруги діоду** розраховується для фіксованого струму, рівного  $I_m$ . Так як опір бази дуже слабко залежить від температури, величину  $U_{R_{\delta}}$  можна вважати константою. При розрахунку температурної залежності  $U_j$  потрібно враховувати в першу чергу вплив температури на концентрацію власних носіїв. Такі параметри, як рухливість і дифузійна довжина носіїв заряду, які від температури залежать відносно слабко, можна вважати константами; обчислити їх можна для середньої температури (300 К).

**3.3.4 Температурну залежність зворотного струму** слід розраховувати для температур в діапазоні 300 – 400 К. Лавиноутворення не враховувати. Зворотну напругу прийняти рівною робочій зворотній напрузі.

При виконанні розрахунку, так як і в попередньому випадку, вважати, що величиною, яка залежить від температури, є  $n_i$ .

### 3.4 Розрахунок перехідного процесу

Розрахунок перехідного процесу виконується для схеми на рис. 3.1. На діод разом з опором навантаження  $R$  діє напруга джерела, що в деякий момент часу стрибком змінює полярність. Зміна напруги джерела і струму діоду з часом зображена на рис. 3.2. Викид зворотного струму при переключенні полярності напруги називається «ефект накопичування» і пов'язаний з розрядом дифузійної ємності переходу (тобто з накопичуванням заряду інжектуємих та основних носіїв в базі діоду).

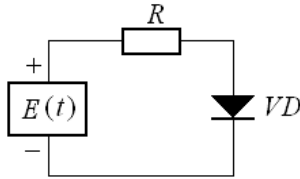


Рисунок 3.1 – Схема для розрахунку перехідного процесу

Еквівалентна схема для розрахунку перехідного процесу представлена на рис. 3.3. Літерою  $\Pi$  позначена активна провідність  $p$ - $n$ -переходу. Так як опір бази малий у порівнянні з опором навантаження, він не враховується.

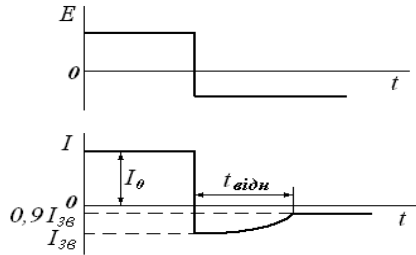


Рисунок 3.2 – Графіки зміни напруги джерела та струму діоду з часом

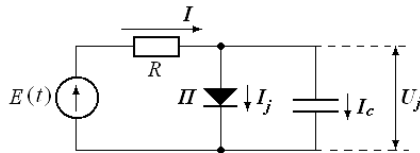


Рисунок 3.3 – Еквівалентна схема для розрахунку перехідного процесу

При вирішенні задачі вважати, що зміні полярності напруги джерела відповідає момент часу  $t = 0$ . Розрахунок виконати за умови, що  $E(0) = U_{3e}$ , де  $U_{3e}$  – робоча зворотна напруга діоду. Опір навантаження вибрати таким чином, щоб до моменту переключення через діод протікав струм, рівний максимальному прямому струму діоду  $I_m$ .

Зміна напруги переходу з часом описується диференціальним співвідношенням:

$$\frac{dU_j}{dt} = \frac{I_c}{C}. \quad (3.17)$$

Ємнісний струм діоду дорівнює різниці повного та активного струмів переходу:

$$I_c = I - I_j. \quad (3.18)$$

Повний струм діоду, в свою чергу, зв'язаний з падінням напруги на навантаженні  $R$ :

$$I = \frac{E - U_j}{R}. \quad (3.19)$$

Активна складова струму переходу описується діодною формулою:

$$I_j = I_s \left( \exp \frac{U_j}{\varphi_T} - 1 \right). \quad (3.20)$$

Зі співвідношень 3.17–3.20 одержуємо диференціальне рівняння для  $U_j$ :

$$\frac{dU_j}{dt} = \frac{1}{C} \left[ \frac{E - U_j}{R} - I_s \left( \exp \frac{U_j}{\varphi_T} - 1 \right) \right]. \quad (3.21)$$

Ємність  $p$ - $n$ -переходу складатиметься з дифузійної та бар'єрної. Основну роль в перехідному процесі відіграє дифузійна ємність. В той же час бар'єрна ємність проявляє незначний вплив на тривалість і характер перехідного процесу. В зв'язку з цим залежність бар'єрної ємності від напруги переходу при розрахунку перехідного процесу можна не враховувати, вважаючи її постійною та рівною  $C_{\delta_0}$ . Тоді ємність переходу буде дорівнювати:

$$C = C_{\delta} + C_g \quad \text{або} \quad C = C_{\delta_0} + \frac{\tau_{\delta}}{\varphi_T} I_j.$$

Використовуючи формулу 3.20, одержуємо:

$$C = C_{\bar{\sigma}_0} + \frac{\tau_{\bar{\sigma}}}{\phi_T} I_s \left( \exp \frac{U_j}{\phi_T} - 1 \right). \quad (3.22)$$

Якщо підставити формулу 3.22 у 3.21, одержимо остаточне рівняння для  $U_j(t)$ :

$$\frac{dU_j}{dt} = \frac{\frac{E - U_j}{R} - I_s \left( \exp \frac{U_j}{\phi_T} - 1 \right)}{C_{\bar{\sigma}_0} + \frac{\tau_{\bar{\sigma}}}{\phi_T} I_s \left( \exp \frac{U_j}{\phi_T} - 1 \right)}. \quad (3.23)$$

При рішенні останнього рівняння необхідно знати початкове значення напруги переходу  $U_j$ , що відповідає  $t = 0$ . Цю напругу можна знайти за значенням струму  $I_0$ , що протікає до переключення:

$$U_{j_0} = \phi_T \ln \left( \frac{I}{I_s} \right). \quad (3.24)$$

Значення  $I_0$  вибираємо рівним максимальному струму діода  $I_m$ . Вирішивши диференційне рівняння 3.23 і отримавши залежність  $U_j(t)$ , знаходимо залежність струму діоду від часу:

$$I(t) = \frac{E - U_j}{R}. \quad (3.25)$$

Результати розрахунку перехідного процесу пропонується оформити у вигляді таблиці і графіка, визначити час відновлення зворотного опору діоду  $t_{\text{відн}}$ :

$$I_{\text{зв}}(t_{\text{відн}}) = 0,1 I_{\text{зв}_m}, \quad (3.26)$$

де  $I_{\text{зв}_m}$  – амплітудне значення зворотного струму (рис. 3.2).

Для порівняння зробити розрахунок часу відновлення за спрощеною методикою за формулою:

$$t_{\text{відн}} = 0,63\tau_{\sigma}. \quad (3.27)$$

В заключній частині зробити висновок про те, що фізичні чинники в основному визначають тривалість процесу переключення діоду.

## 4 БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР

### 4.1 Вихідні дані і результати розрахунків

Вихідними даними для розрахунку параметрів і характеристик транзистора є:

- вигляд напівпровідникового матеріалу і структура транзистора;
- геометричні параметри;
- концентрація домішкових атомів в емітерній, базовій і колекторній областях;
- час життя нерівноважних носіїв заряду у відповідних областях;
- тепловий опір корпусу.

В результаті розрахунків повинні бути знайдені наступні параметри:

- коефіцієнт передачі струму в схемі з ЗБ;
- коефіцієнт підсилення в схемі з ЗЕ;
- напруга лавинного пробою колекторного переходу;
- напруга проколу;
- максимальна і робоча напруга колекторного переходу;
- максимальний струм колектора;
- параметри Т-образної малосигнальної еквівалентної схеми;
- параметри транзистора як чотирьохполюсника;
- частотні параметри.

Разом з цим повинні бути розраховані енергетична діаграма і наступні характеристики транзистора:

- залежність коефіцієнта підсилення транзистора від напруги на колекторі;

- залежність коефіцієнта підсилення від ступеня легування вихідного кристалу;
- залежність максимальної напруги колекторного переходу від ступеня легування вихідного кристалу;
- вихідна характеристика транзистора.

## 4.2 Розрахунок параметрів

**4.2.1 Коефіцієнт передачі струму в схемі з загальною базою** пов'язаний з внутрішніми параметрами транзистора співвідношенням:

$$\alpha = \gamma\beta^*M, \quad (4.1)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт інжекції емітера;

$\beta^*$  – коефіцієнт переносу;

$M$  – коефіцієнт лавинного множення колекторного переходу.

В даній курсовій роботі пропонується розрахунок початкового коефіцієнта передачі, що відповідає малим напругам колекторного переходу. В цьому випадку можливо припустити  $M = 1$ , тоді вираз для  $\alpha$  спрощується:

$$\alpha = \gamma\beta^*. \quad (4.2)$$

Коефіцієнт інжекції емітера пов'язаний з фізичними параметрами фізичної структури співвідношенням:

$$\gamma = 1 - \frac{\mu_e N_{\bar{o}} w_0}{\mu_{\bar{o}} N_e L_e}. \quad (4.3)$$

Коефіцієнт переносу розраховується за формулою:

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{w_0}{L_{\bar{o}}} \right)^2. \quad (4.4)$$

В наведених формулах  $\mu_e$ ,  $\mu_{\bar{o}}$ ,  $L_e$ ,  $L_{\bar{o}}$  – відповідно рухливості і дифузійні довжини неосновних носіїв заряду у відповідних областях кристалу;  $w_0$  – початкова (металургійна) товщина бази ( $w_{\bar{o}}$ ).

Коефіцієнт підсилення транзистора в схемі з загальним емітером пов'язаний з величиною  $\alpha$  простим співвідношенням:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (4.5)$$

**4.2.2 Робоча напруга колекторного переходу** розраховується за правилом:

$$U_{кр} = 0,7 \min \{U_{кт}, U_{прок}\}, \quad (4.6)$$

де множник 0,7 виконує роль коефіцієнта запасу;

$U_{кт}$  – максимальна зворотна напруга колекторного переходу, тому зворотному зміщенню колекторного переходу відповідає позитивне значення  $U_{кт}$ ;

$U_{прок}$  – напруга проколу транзистора, що розраховується як і для діоду:

$$U_{прок} = \frac{qN_{\delta}w_0^2}{2\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (4.7)$$

Максимальна напруга колекторного переходу знаходиться з умови:

$$\alpha(U_{кт}) = 1, \quad (4.8)$$

тобто  $U_{кт}$  представляє собою напругу, при якій коефіцієнт передачі стає рівним одиниці. Якщо підставити в формулу (4.8) формулу (4.1), отримаємо

$$\gamma(U_{кт})\beta^*(U_{кт})M(U_{кт}) = 1. \quad (4.9)$$

Залежність величин  $\beta^*$  і  $\gamma$  від  $U_{к}$  пов'язана зі зміною ефективної товщини базової області при зміні  $U_{к}$ .

Якщо підставити у вираз (4.9) наступну залежність  $M(U_{к})$ :

$$M = \left[ 1 - \left( \frac{U_{\kappa\tau}}{U_{\lambda\kappa}} \right)^n \right]^{-1}, \quad (4.10)$$

отримаємо наступне рівняння:

$$\beta^*(U_{\kappa\tau})\gamma(U_{\kappa\tau}) + \left( \frac{U_{\kappa\tau}}{U_{\lambda\kappa}} \right)^n - 1 = 0. \quad (4.11)$$

Для того, щоб вирішити рівняння (4.11), необхідно залежності  $\beta^*(U_{\kappa\tau})$  і  $\gamma(U_{\kappa\tau})$  уявити в явній формі. Для цього запишемо вирази для  $\beta^*$  і  $\gamma$  (формули (4.3), (4.4)), однак замість початкової товщини бази  $w_0$  використаємо ефективну товщину бази  $w$ :

$$\gamma = 1 - \frac{\mu_e N_\delta w}{\mu_\delta N_e L_e}, \quad (4.12)$$

$$\beta^* = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{w}{L_\delta} \right)^2. \quad (4.13)$$

Ефективна товщина бази дорівнює початковій за винятком товщини базової частини збідненого шару колекторного переходу  $l_\delta$ :

$$w = w_0 - l_\delta, \quad (4.14)$$

Якщо підставити для  $l_\delta$  наступну залежність від напруги, прикладеної до колекторного переходу:

$$l_\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 N_\kappa (\varphi_\kappa + U_{\kappa\tau})}{qN_\delta (N_\delta + N_\kappa)}}, \quad (4.15)$$

отримаємо

$$w = w_0 - D\sqrt{\varphi_\kappa + U_{\kappa\tau}}, \quad (4.16)$$

де стала  $D$  дорівнює:

$$D = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 N_\kappa}{qN_{\bar{\sigma}}(N_{\bar{\sigma}} + N_\kappa)}}. \quad (4.17)$$

Вирази (4.12), (4.13), (4.16) дозволяють уявити залежності  $\beta^*(U_{\kappa m})$  і  $\gamma(U_{\kappa m})$  в явній формі. Рівняння (4.11) вирішується чисельними засобами.

**4.2.3 Струм спокою транзистора** представляє собою струм транзистора при відключеній базі:

$$I_{\kappa_0} = (1 + \beta)I_{\kappa_0 3\bar{\sigma}}, \quad (4.18)$$

де  $I_{\kappa_0 3\bar{\sigma}}$  – зворотний струм колекторного переходу, знайдений без урахування впливу емітерного переходу. Цей струм складатиметься з трьох складових:

$$I_{\kappa_0 3\bar{\sigma}} = I_{s_1} + I_{s_2} + I_g, \quad (4.19)$$

де  $I_{s_1}$  – струм насичення, відповідний центральній частині колекторного переходу, що лежить безпосередньо під емітером; знаходиться за формулою

$$I_{s_1} = \frac{qn_i^2 S_e D_{\bar{\sigma}}}{wN_{\bar{\sigma}}}; \quad (4.20)$$

$I_{s_2}$  – струм насичення периферійної частини колекторного переходу

$$I_{s_2} = \frac{qn_i^2 (S_\kappa - S_e) D_{\bar{\sigma}}}{HN_{\bar{\sigma}}}, \quad (4.21)$$

де  $H = h_e + w$  при  $h_e + w \leq L_{\bar{\sigma}}$ ,

або  $H = L_{\bar{\sigma}}$  при  $h_e + w > L_{\bar{\sigma}}$ ;

$I_g$  – генераційний струм колекторного переходу

$$I_g = \frac{qn_i L S_\kappa}{2\tau_\phi}, \quad (4.22)$$

де  $L$  – товщина колекторного переходу при робочій напрузі колекторного переходу  $U_{кр}$ .

**4.2.4 Максимальний струм колектора** розраховується з умови рівності потужності, що виділяється, потужності, що відводиться:

$$U_{кр} I_{кт} = \frac{T_{jm} - T_\kappa}{R_T}, \quad (4.23)$$

де  $T_{jm}$  – максимально допустима температура кристалу, що приймається рівною для кремнію 418 К, а для германію – 358 К;

$T_\kappa$  – температура зовнішньої поверхні корпусу, що приймається рівною 300 К;

$R_T$  – тепловий опір корпусу транзистора.

З формули (4.23) одержуємо робочу формулу для розрахунку:

$$I_{кт} = \frac{T_{jm} - T_\kappa}{R_T U_{кр}}. \quad (4.24)$$

### 4.3 Розрахунок енергетичної діаграми

Порядок розрахунку енергетичної діаграми (рис. 4.1) розглянемо на прикладі транзистора типу  $p$ - $n$ - $p$ . Положення рівня Фермі відносно середини забороненої зони кожної з трьох областей транзистора визначається величинами:

$$\begin{aligned} \Delta E_E &= (E_i - E_F)_E; \\ \Delta E_B &= (E_F - E_i)_B; \\ \Delta E_K &= (E_i - E_F)_K. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Ці величини розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned}
 \Delta E_E &= kT \ln(N_e/n_i); \\
 \Delta E_B &= kT \ln(N_\delta/n_i); \\
 \Delta E_K &= kT \ln(N_\kappa/n_i).
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

Зміщення рівня Фермі для емітерного і колекторного переходів позначимо:

$$\begin{aligned}
 \Delta E_{FE} &= E_{FB} - E_{FE}; \\
 \Delta E_{FK} &= E_{FK} - E_{FB}.
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

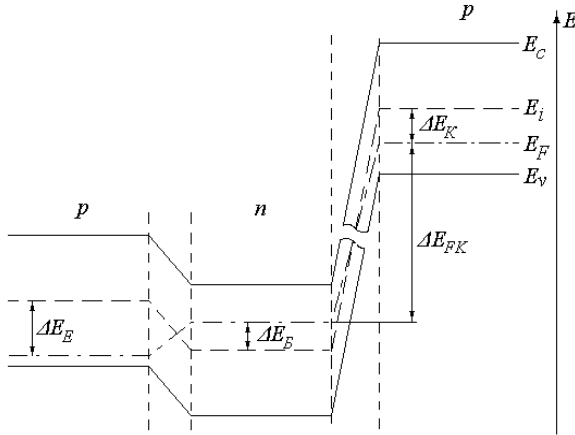


Рисунок 4.1 – Енергетична діаграма транзистора

Розрахунок енергетичної діаграми виконується для робочого (активного) режиму транзистора. Розглянемо спочатку методику розрахунку зміщення рівня Фермі емітерного переходу:

$$\Delta E_{FE} = qU_e.
 \tag{4.28}$$

Тому задача зводиться до обчислення напруги емітера  $U_e$  при проходженні через транзистор максимального струму. Зміщення  $U_e$  можна зв'язати з концентрацією дірок на границі емітерного переходу з боку бази:

$$U_e = \varphi_{ке} - \varphi_T \ln \frac{N_e}{p_{\delta e}}, \quad (4.29)$$

де концентрація дірок  $p_{\delta e}$ , в свою чергу, пов'язана зі струмом емітера:

$$p_{\delta e} = \frac{wI_e}{qS_e D_{p\delta}}. \quad (4.30)$$

Так як в робочому (активному) режимі коефіцієнт передачі струму транзистора близький до одиниці, струм емітера в останній формулі можна замінити струмом колектора:

$$p_{\delta e} = \frac{wI_k}{qS_e D_{p\delta}}. \quad (4.31)$$

Формули (4.31) і (4.29) дозволяють виконати розрахунок величини  $U_e$ , а після цього  $\Delta E_{FK}$ .

Зміщення рівня Фермі колекторного переходу розраховується за формулою:

$$\Delta E_{FK} = qU_k. \quad (4.32)$$

В якості  $U_k$  слід використати робочу напругу колекторного переходу.

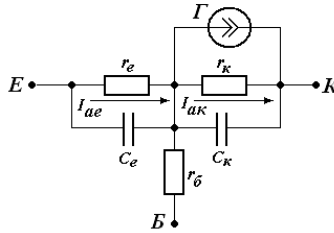
Товщини емітерного і колекторного переходів знаходяться за формулами, наведеними в п. 2.7.

Розрахована енергетична діаграма повинна бути виконана на міліметрівці.

## 4.4 Малосигнальні параметри

### 4.4.1 Розрахунок параметрів $T$ -подібної еквівалентної схеми.

$T$ -подібна еквівалентна схема транзистора, яка використовується для розрахунків електронних схем в режимі малого сигналу, показана на рис. 4.2. Еквівалентна схема побудована з 6 двополюсних елементів і її властивості визначаються шістьма параметрами:  $r_e$ ,  $r_k$ ,  $r_{\delta}$ ,  $C_k$ ,  $C_{\kappa}$ ,  $\alpha$ .

Рисунок 4.2 –  $T$ -подібна малосигнальна еквівалентна схема транзистора

Коефіцієнт передачі  $\alpha$  є параметром генератора струму  $\Gamma$ :

$$I_{\Gamma} = \alpha I_{ae}, \quad (4.33)$$

де  $I_{ae}$  – активна змінна складова з емітерного струму.

Опір емітера розраховується за відомою формулою для диференційного опору  $p$ - $n$ -переходу:

$$r_e = \frac{\varphi_T}{I_e}, \quad (4.34)$$

де  $I_e$  – постійна складова емітера, що визначає робочу точку транзистора.

Опір колектора транзистора визначається ефектом Ерлі (модуляція ефективної товщини бази при зміні напруги колекторного переходу). З урахуванням цього

$$r_k = \frac{2wU_k}{L_k I_e [2(1 - \beta^*) + (1 - \gamma)]}. \quad (4.35)$$

Величини  $I_e$ ,  $U_k$  визначають режим роботи транзистора. При розрахунку малосигнальних параметрів рекомендується вибрати наступний режим:

$$U_k = 0,5U_{кр}, \quad I_e = 0,5I_{кт}.$$

Опір бази визначається геометрією базової області і її питомим опором. Для транзистора, який має аксіальну геометрію, опір бази можна розрахувати за формулою:

$$r_{\delta} = \frac{\rho_{\delta}}{2\pi} \left( \frac{1}{4w} + \frac{1}{h_e + w} \ln \frac{d_{\kappa}}{d_e} + \frac{1}{h} \ln \frac{d_{\delta}}{d_{\kappa}} \right). \quad (4.36)$$

Геометричні параметри представлені на рис. 4.3.

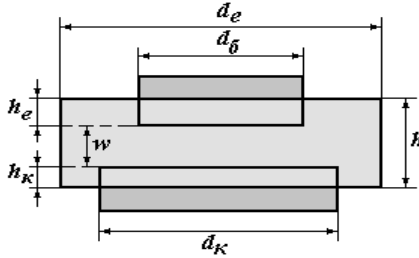


Рисунок 4.3 – Геометрія транзистора

Ємність емітерного переходу  $C_e$  має дифузійний характер і може бути обчислена за формулою:

$$C_e = \frac{\tau_n I_e}{\phi_T}, \quad (4.37)$$

де  $\tau_n$  – час прольоту неосновного носія через базу. Якщо база транзистора однорідна, тоді

$$\tau_n = \frac{w^2}{2D_{p_{\delta}}}. \quad (4.38)$$

Бар'єрна ємність емітерного переходу при роботі транзистора в активному режимі надзвичайно мала і може не враховуватися.

Ємність колекторного переходу включає в себе дві складові: бар'єрну ємність переходу й особливий різновид дифузійної ємності, зв'язаний з впливом напруги колекторного переходу (через його товщину) на кількість неосновних носіїв заряду в базі:

$$C_{\kappa} = C_{\delta\kappa} + C_{g\kappa}, \quad (4.39)$$

$$\text{де} \quad C_{\delta\kappa} = S_{\kappa} \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_{\delta}}{2(\phi_{\kappa} + U_{\kappa})}}, \quad (4.40)$$

$$C_{g\kappa} = \frac{wL_{\kappa}I_e}{2D_{p\delta}(\phi_{\kappa} + U_{\kappa})}. \quad (4.41)$$

#### 4.4.2 Параметри транзистора як чотирьохполосника

Розглянемо методику розрахунку  $r$ -,  $h$ -параметрів транзистора для схем з загальним емітером. Можна показати, що чотирьохполосникові параметри зв'язані з параметрами Т-образної еквівалентної схеми співвідношенням:

$$\begin{aligned} r_{11e} &= r_e + r_o; \\ r_{12} &= r_e; \\ r_{21e} &= r_e - \alpha r_{\kappa}; \\ r_{22} &= r_e + (1 - \alpha)r_{\kappa}. \end{aligned} \quad (4.42)$$

Індекс «е» вказує, що  $r$ -параметри відносяться до схеми з загальним емітером.

$h$ -параметри зв'язані з  $r$ -параметрами транзистора (для будь-якої схеми включення) наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} h_{11} &= r_{11} - \frac{r_{12}}{r_{22}}r_{21}; \\ h_{12} &= \frac{r_{12}}{r_{22}}; \\ h_{21} &= -\frac{r_{21}}{r_{22}}; \\ h_{22} &= \frac{1}{r_{22}}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

#### 4.5 Частотні параметри транзистора

Частотні параметри розраховують за формулами:

— граничні частоти

$$f_{\alpha} = \frac{0,387D_{p\delta}}{w^2}, \quad (4.44)$$

$$f_{\beta} = \frac{0,8}{\sqrt{\alpha}}(1 - \alpha)f_{\alpha}, \quad (4.45)$$

$$f_T = \frac{f_{\alpha}}{1,2}; \quad (4.46)$$

— максимальна частота генерації

$$f_m = \sqrt{\frac{\alpha f_{\alpha}}{30r_{\theta}C_{\kappa}}}. \quad (4.47)$$

## 4.6 Розрахунок характеристик і залежностей

### 4.6.1 Розрахунок залежності коефіцієнта підсилення транзистора від напруги колектора.

На першому етапі розраховується залежність коефіцієнта передачі від напруги на колекторному переході з урахуванням залежностей  $M(U_{\kappa})$ ,  $M(U_{\kappa})$ ,  $\gamma(U_{\kappa})$ :

$$\alpha(U_{\kappa}) = \gamma(U_{\kappa})M(U_{\kappa})M(U_{\kappa}). \quad (4.48)$$

Розрахунок виконується в інтервалі напруг  $U_{\kappa} = 0 \dots U_{\kappa m}$  в 10 точках.

На другому етапі розраховується залежність коефіцієнта підсилення транзистора від напруги колекторного переходу:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (4.49)$$

### 4.6.2 Розрахунок впливу ступеня легування вихідного кристалу на коефіцієнт підсилення.

Розрахунок виконується також, як і в попередньому випадку в два етапи: спочатку розраховується залежність  $\alpha(N_{\theta})$ , після цього  $\beta(N_{\theta})$ . Розрахунок коефіцієнта передачі  $\alpha$  виконується без врахування лавиноутворення в колекторному переході, тобто слід припустити, що  $M = 1$ . При виконанні розрахунків необхідно врахувати вплив ступеня легування бази на рухливість і коефіцієнт

дифузії носіїв заряду. Розрахунок виконати в 10 точках. Інтервал концентрації  $N_{\sigma}$  вказується в додаткових вихідних даних.

#### 4.6.3 Розрахунок впливу ступеня легування вихідного кристалу на максимальну напругу колекторного переходу.

Максимальна напруга колекторного переходу, при якому стає рівним одиниці, розраховується за методикою, описаною в п. 4.2.2. Розрахунок виконується для 10 значень  $N_{\sigma}$  в межах заданого інтервалу.

#### 4.6.4 Розрахунок вихідної характеристики транзистора виконується за схемою з ЗЕ.

Для цього можна скористуватися моделлю Еберса-Молла, що представлена на рис. 4.4 та відображає властивості транзистора в режимі постійного струму. Для розрахунку імпульсних властивостей транзистора в еквівалентній схемі необхідно врахувати ємності обох переходів транзистора.

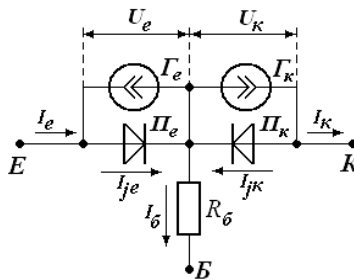


Рисунок 4.4 – Еквівалентна схема Еберса-Молла

Елементи  $\Pi_e$  і  $\Pi_k$  еквівалентної схеми відображають власні струми переходів транзистора, генератори струму  $G_e$ ,  $G_k$  враховують взаємний вплив струмів переходів один на одного. На відзнаку від малосигнальної схеми, що відображає роботу транзистора в активному режимі, модель Еберса-Мола описує роботу транзистора в будь-якому з 4 можливих режимів роботи (активний, інверсний, режим насичення і режим відсічки).

Властивості елементів  $\Pi_e$  і  $\Pi_k$  описуються рівняннями:

$$I_{je} = I_{se} \left( \exp \frac{U_e}{\varphi_T} - 1 \right), \quad (4.50)$$

$$I_{jk} = I_{sk} \left( \exp \frac{U_k}{\varphi_T} - 1 \right). \quad (4.51)$$

Струми генераторів  $\Gamma_e, \Gamma_k$  описуються рівняннями:

$$I_{\Gamma E} = \alpha_1 I_{jk}, \quad (4.52)$$

$$I_{\Gamma K} = \alpha_N I_{je}. \quad (4.53)$$

Параметрами моделі Еберса-Молла є величини  $I_{se}, I_{sk}, \alpha_N, \alpha_1, R_{\bar{o}}$ . Струми насичення переходів розраховуються за формулами:

$$I_{se} = \frac{qn_i^2 S_e D_{p\bar{o}}}{w N_{\bar{o}}}, \quad (4.54)$$

$$I_{sk} = \frac{qn_i^2 S_k D_{p\bar{o}}}{w N_{\bar{o}}}. \quad (4.55)$$

Коефіцієнт передачі транзистора в активному режимі  $\alpha_N$  розраховується з урахуванням ефекту Ерлі на основі співвідношення:

$$\alpha_N = \beta^* \gamma M. \quad (4.56)$$

Якщо підставити сюди вирази для  $\beta^*, \gamma, M$ , отримаємо:

$$\alpha_N = \frac{(1 - A_1 w^2)(1 - A_2 w)}{1 - (|U_k|/U_{лк})^n}, \quad (4.57)$$

$$\text{де} \quad A_1 = \frac{1}{2L_{p\bar{o}}^2}; \quad A_2 = \frac{\mu_{ne} N_{\bar{o}}}{\mu_{p\bar{o}} N_e L_{ne}}. \quad (4.58)$$

Ефективна товщина бази  $w$  залежить від напруги переходу  $U_k$ :

$$w = w_0 - \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\phi_\kappa - U_\kappa)}{qN_\delta}}. \quad (4.59)$$

Інверсний коефіцієнт передачі обчислюється за формулою:

$$\alpha_1 = \frac{S_e}{S_\kappa} \alpha_{N0}, \quad (4.60)$$

де  $\alpha_{N0}$  – значення прямого коефіцієнта передачі  $\alpha_N$ .

Опір бази  $R_\delta$  можна обчислити за формулою:

$$R_\delta = \frac{\rho_\delta}{8\pi w_0}. \quad (4.61)$$

Остання формула враховує тільки опір активної частини бази і отримана для транзистора, що має аксіальну геометрію.

Розглянемо висновок рівнянь для розрахунку вихідних характеристик транзистора. З еквівалентної схеми і рівнянь двополюсника випливають наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} I_e &= I_{je} - \alpha_1 I_{j\kappa}; \\ I_\kappa &= I_{j\kappa} - \alpha_N I_{je}; \\ I_\delta &= I_e + I_\kappa; \\ U_{ек} &= U_e - U_\kappa. \end{aligned} \quad (4.62)$$

Якщо знайти  $I_e$  з третього рівняння й об'єднати з другим, отримаємо:

$$\begin{aligned} I_e &= I_{je} - \alpha_1 I_{j\kappa}; \\ I_e &= I_\delta - I_{j\kappa} + \alpha_N I_{je}; \\ U_{ек} &= U_e - U_\kappa. \end{aligned} \quad (4.63)$$

Позбавимося величини  $I_e$ :

$$\begin{aligned} (1 - \alpha_N) I_{je} + (1 - \alpha_1) I_{j\kappa} - I_\delta &= 0; \\ U_{ек} &= U_e - U_\kappa. \end{aligned} \quad (4.64)$$

Якщо підставити вирази для власних струмів переходів і позбавитися  $U_{\kappa}$ , отримаємо рівняння для  $U_e$ :

$$(1 - \alpha_N) I_{se} \left( \exp \frac{U_e}{\phi_T} - 1 \right) + (1 - \alpha_1) I_{sk} \left( \exp \frac{U_e - U_{ek}}{\phi_T} - 1 \right) - I_o = 0. \quad (4.65)$$

Після того, як  $U_e$  знайдена, можна визначити струм колектора:

$$I_{\kappa} = I_{sk} \left( \exp \frac{U_e - U_{ek}}{\phi_T} - 1 \right) - \alpha_N I_{se} \left( \exp \frac{U_e}{\phi_T} - 1 \right). \quad (4.66)$$

При вирішенні цього рівняння слід врахувати залежність  $\alpha_N(U_{\kappa})$ .

Рівняння рекомендується вирішувати на ЕОМ. Розрахунок вихідних характеристик виконується для заданого інтервалу зміни  $U_{ek}$  в 10 точках. Значення базового струму рекомендується вибирати таким чином, щоб при робочій напрузі  $U_{ek}$  забезпечувався струм колектора, рівний половині максимального струму колектора.

## 5 ТИРИСТОР

### 5.1 Вихідні дані і результати розрахунків

Вихідними даними для виконання розрахунків є:

- структура тиристора і дані його геометрії;
- концентрація домішкових атомів і час життя нерівноважних носіїв в базових областях;

- тепловий опір тиристора і температура корпусу.

В результаті розрахунків повинні бути знайдені наступні параметри:

- струми насичення переходів;
- коефіцієнт передачі для базових областей;
- опір шунтування емітера;
- напруга лавинного пробію переходів;

- струм включення;
- максимальний струм тиристора;
- пряме падіння напруги при максимальному струмі;
- струм закритого тиристора.

Разом з означеними параметрами повинні бути розраховані характеристики:

- вольт-амперна характеристика відкритого тиристора;
- пряма гілка ВАХ;
- зворотна гілка ВАХ.

## 5.2 Розрахунок параметрів і характеристик тиристора

**5.2.1 Структура і принцип дії.** Структура діодного тиристора складається з чотирьох областей напівпровідника з типом електропровідності, що чергуються (рис. 5.1). Крім трьох випрямляючих переходів діод ний тиристор має два омічних переходи. Один з омічних переходів розташований між крайньою  $n$ -областю і металічним електродом, який називають катодом. Другий омічний перехід розташований між крайньою  $p$ -областю і металічним електродом, який називають анодом.

Більша частина зовнішньої прямої напруги падає на колекторному переході, оскільки він зміщений в зворотному напрямку. Тому перша ділянка (рис. 5.1, 1) прямої гілки ВАХ тиристора схожа на зворотну гілку ВАХ випрямляючого діода. Зі збільшенням анодної напруги, прикладеної між анодом і катодом, збільшується пряма напруга і на емітер них переходах. Електрони, інжектвані з  $n$ -емітера в  $p$ -базу, дифундують до колекторного переходу, втягуються полем колекторного переходу і потрапляють в  $n$ -базу. Подальшому руху електронів по структурі тиристора перешкоджає невеликий потенціальний бар'єр правого емітерного переходу. Тому частина електронів, опинившись в потенціальній ямі  $n$ -бази, утворюють надлишковий негативний заряд, який, знижуючи висоту потенціального бар'єра правого емітерного переходу, викликає збільшення інжекції дірок з  $p$ -емітера в  $n$ -базу. Інжектвані дірки дифундують до колекторного переходу, втягуються полем колекторного переходу і потрапляють в  $p$ -базу. Подальшому їх руху по структурі тиристора перешкоджає невеликий потенціальний бар'єр лівого емітерного переходу. Отже, в  $p$ -базі відбувається накопичення

надлишкового позитивного заряду, що обумовлює збільшення інжекції електронів з  $n$ -емітера. Таким чином, в структурі тиристора існує додатний зворотний зв'язок за струмом – збільшення струму через один емітерний перехід приводить до збільшення струму через інший емітерний перехід.

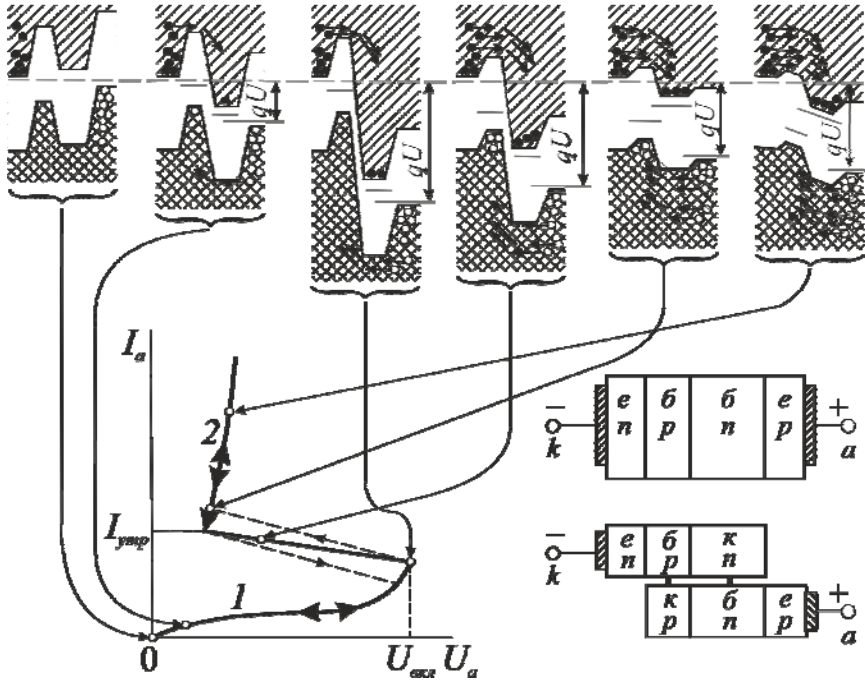


Рисунок 5.1 – Структура, ВАХ та енергетичні діаграми діодного тиристора

Накопичення нерівноважних носіїв в базових областях рівнозначно додатковій різниці потенціалів на колекторному переході, яка на відміну від зовнішньої різниці потенціалів прагне змістити колекторний перехід в прямому напрямку. Тому зі збільшенням струму через тиристор і, відповідно, зі збільшенням надлишкових зарядів основних носіїв заряду в базових областях абсолютне значення сумарної напруги на колекторному переході почне зменшуватися. Струм через тиристор при цьому буде обмежений тільки опором навантаження і ЕРС джерела живлення. Висота потенціального бар'єра колекторного переходу зменшується до

значення, що відповідає включенню цього переходу в прямому напрямку.

**5.2.2 Струми насичення переходів.** Розрахунок параметрів і характеристик тиристора розглянемо на прикладі тиристора, що має  $p$ - $n$ - $p$ - $n$ -структуру з керуючим виводом від  $p$ -області (рис. 5.2). Будемо вважати, що в цьому тиристорі використовується шунтування емітера. При виконанні розрахунків припускається, що всі області тиристорної структури є однаковими.

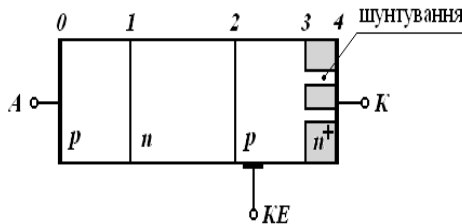


Рисунок 5.2 – Структура керованого тиристора

Технологія тиристора звичайно будується таким чином, що обидві  $p$ -області формуються одночасно шляхом дифузії домішки з обох сторін напівпровідникової пластини. Отже переходи 1 і 2 мають однакові характеристики.

Струм насичення переходу 1:

$$I_{s1} = \frac{qS_e n_i^2 L_{12}}{\tau_{12} N_{12}}. \quad (5.1)$$

Цифрові індекси вказують, що відповідні величини відносяться до області кристалу, що розташовані між переходами 1 і 2.

Струм насичення переходу 2 співпадає зі струмом насичення переходу 1:  $I_{s1} = I_{s2}$ .

Струм насичення переходу 3 дорівнює:

$$I_{s3} = \frac{qS_e n_i^2 L_{23}}{\tau_{23} N_{23}}, \quad (5.2)$$

де  $S_e = w_{12}d$  – площа емітера, тобто площа перетину  $n^+$ -області.

Часи життя для областей 12 і 23 пов'язані співвідношенням:

$$\tau_{23} = \tau_{12} \frac{N_{12}}{N_{23}}. \quad (5.3)$$

Розрахунок струмів насичення виконується для температури кристалу, що дорівнює заданій температурі корпусу приладу.

**5.2.3 Коефіцієнт передачі.** Через ідентичність переходів 1 і 2 і однорідність товстої бази прямий та інверсний коефіцієнти передачі  $\alpha_{12}$  і  $\alpha_{21}$  співпадають. Якщо лавиноутворення в переходах не враховувати, тоді

$$\alpha_{12} = \gamma_2 \beta_{12}^*. \quad (5.4)$$

Концентрація домішкових атомів в області 23 завжди на декілька порядків вища, ніж в області 12. В результаті цього коефіцієнт інжекції  $\gamma_2$  виявляється близьким до одиниці і не виявляє помітного впливу на  $\alpha_{12}$ . Коефіцієнт переносу  $\beta_{12}^*$ , в свою чергу, може бути розрахований за формулою:

$$\beta_{12}^* = \operatorname{sch} \frac{w_{12}}{L_{12}},$$

де  $\operatorname{sch} x$  – гіперболічний секанс ( $\operatorname{sch} x = 1 / \operatorname{ch} x = 2 / (e^x + e^{-x})$ ).

Отже, з (5.4) отримуємо:

$$\alpha_{12} = \operatorname{sch} \frac{w_{12}}{L_{12}}. \quad (5.5)$$

Для області 23 аналогічним чином отримуємо:

$$\alpha_{23} = \operatorname{sch} \frac{w_{23}}{L_{23}}. \quad (5.6)$$

**5.2.4 Опір шунтування.** Для забезпечення тривалої роботи тиристора використовується шунтування емітерного переходу 3. В нашому випадку емітерний перехід шунтується областями з  $p$ -типом

провідності (рис. 5.1). Опір шунтування можливо розрахувати наступним чином:

$$R_{ш} = \frac{\rho_{23} W_{34}}{S_{ш}}, \quad (5.7)$$

де  $R_{ш}$  – площа шунтованих областей, що знаходиться за формулою

$$S_{ш} = \pi m_{ш} r_{ш}^2, \quad (5.8)$$

де  $r_{ш}$  – радіус шунтуючої області;

$m_{ш}$  – кількість шунтуючих областей;

$\rho_{23}$  – питомий опір шару 23.

### 5.2.5 Робоча напруга тиристора.

Робоча напруга закритого тиристора визначається з умови:

$$U_{роб} = 0,6 U_{л2},$$

де  $U_{л2}$  – напруга лавинного пробію переходу 2;

0,6 має сенс коефіцієнта запасу.

### 5.2.6 Струм включення.

Розрахунок основних параметрів тиристора виконується за допомогою еквівалентної схеми, що представлена на рис. 5.3. Елементи  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$  еквівалентної схеми враховують власні струми  $p$ - $n$ -переходів.

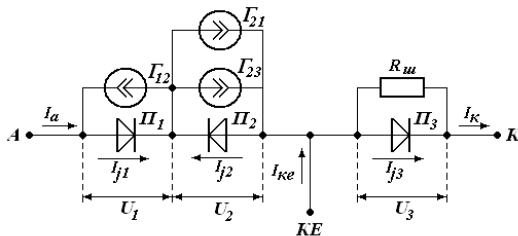


Рисунок 5.3 – Еквівалентна схема тиристора

Для опису залежності власного струму переходу з номером  $m$  від напруги може бути використана діодна формула:

$$I_{jm} = I_{sm} \left( e^{\frac{U_m}{\phi_r}} - 1 \right). \quad (5.9)$$

Генератори струму  $I_{12}$ ,  $I_{21}$ ,  $I_{23}$  враховують взаємодію  $p$ - $n$ -переходів, тобто взаємний вплив їхніх струмів в результаті переносу носіїв зарядів через базові області. Властивості генераторів струму описуються формулами:

$$\begin{cases} I_{r12} = \alpha_{12} I_{j2}; \\ I_{r21} = \alpha_{21} I_{j1}; \\ I_{r23} = \alpha_{23} I_{j3}. \end{cases} \quad (5.10)$$

Розглянемо роботу тиристора за відсутності керуючого струму. В цьому випадку з еквівалентної схеми і рівнянь її елементів одержуємо:

$$\begin{cases} I_a - I_{j1} + \alpha_{12} I_{j2} = 0; \\ I_a + I_{j2} - \alpha_{21} I_{j1} - \alpha_{23} I_{j3} = 0; \\ I_a - I_{j3} - \frac{U_3}{R_{ш}} = 0. \end{cases} \quad (5.11)$$

Знаходячи  $I_{j1}$  з першого рівняння, підставляючи його в друге і враховуючи, що  $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ , отримуємо:

$$(1 - \alpha_{12}^2) I_{j2} - \alpha_{23} I_{j3} + (1 - \alpha_{12}) I_a = 0. \quad (5.12)$$

Можна показати, що система рівнянь (5.11) має рішення лише за умови:  $I_{j2} \gg I_{s2}$ , причому рівність  $I_{j2} = -I_{s2}$  якраз відповідає моменту виключення тиристора. Підставив замість  $I_{j2}$  величину  $-I_{s2}$ , отримаємо рівняння, що описує стан тиристора в момент включення:

$$(1 - \alpha_{12}^2) I_{s2} - \alpha_{23} I_{j3} + (1 - \alpha_{12}) I_a = 0. \quad (5.13)$$

Отримане рівняння можна спростити, використовуючи виняткову малість величини  $I_{s2}$  у порівнянні зі струмами  $I_{s3}$  і  $I_a$ . Вважаючи  $I_{s2} = 0$ , одержуємо:

$$\alpha_{23}I_{j3} - (1 - \alpha_{12})I_a = 0. \quad (5.14)$$

Якщо підставити сюди величину  $I_a$  з третього рівняння системи (5.11), одержимо:

$$\alpha R_{\text{ш}} I_{s3} \left( e^{\frac{U_3}{\varphi_r}} - 1 \right) - U_3 = 0, \quad (5.15)$$

де

$$\alpha = \frac{\alpha_{12} + \alpha_{23} - 1}{1 - \alpha_{12}}. \quad (5.16)$$

Напруга  $U_3$ , що задовольнить рівнянню (5.14), відповідає моменту включення тиристора (тобто це мінімальна напруга включення тиристора). Позначимо її через  $U_3^e$ . Вирішивши рівняння (5.15) і знайшовши  $U_3^{\hat{a}}$ , можна знайти струм включення тиристора:

$$I_{\text{вмик}} = I_{s3} \left( e^{\frac{U_3^e}{\varphi_r}} - 1 \right) - \frac{U_3^e}{R_{\text{ш}}}. \quad (5.17)$$

Відзначимо, що рівняння (5.15) є трансцендентним і може бути вирішене тільки числовими засобами.

**5.2.7 Струм закритого тиристора.** Розглянемо роботу закритого тиристора при впливі на нього робочої напруги  $U_{\text{роб}}$ . У цьому випадку колекторний перехід 2 буде зворотнозміщений, а переходи 1 і 2 будуть знаходитися під впливом додатної напруги. Практично вся прикладена напруга буде падати на переході 2, тому можна вважати, що  $U_2 = -U_{\text{роб}}$ .

Зворотний струм переходу 2 розраховується з урахуванням генераційної компоненти:

$$I_{j2} = -\left(I_{s2} + B\sqrt{U_{\text{поб}}}\right), \quad (5.18)$$

де стала

$$B = \frac{n_i S}{\tau_{12}} \sqrt{\frac{q \varepsilon \varepsilon_0}{2 N_{12}}}. \quad (5.19)$$

Формули (5.18) і (5.19) дозволяють розрахувати струм переходу 2. Але повний струм тиристора буде включати ще струми генераторів  $\Gamma_{21}$ ,  $\Gamma_{23}$ . Струм генератора  $\Gamma_{12}$  буде дуже малий, тобто перехід 2 зворотнозміщений і не виробляє інжекцію носіїв заряду.

Якщо з еквівалентної схеми викинути генератор струму  $\Gamma_{12}$ , отримаємо  $I_a = I_{j1}$ . З урахуванням останнього з другого і третього рівнянь системи (5.11) отримаємо рівність:

$$(1 - \alpha_{12} - \alpha_{23})I_{j3} + (1 - \alpha_{12})\frac{U_3}{R_{\text{ш}}} + I_{j2} = 0. \quad (5.20)$$

Якщо виразити струм  $I_{j3}$  через напругу  $U_3$ , одержимо рівняння для  $U_3$ :

$$(1 - \alpha_{12} - \alpha_{23})I_{s3} \left( \exp \frac{U_3}{\varphi_T} - 1 \right) + (1 - \alpha_{12})\frac{U_3}{R_{\text{ш}}} + I_{j2} = 0. \quad (5.21)$$

Вирішивши це рівняння відносно  $U_3$ , можна знайти необхідний струм закритого тиристора:

$$I_{\text{закр}} = \frac{U_3}{R_{\text{ш}}}. \quad (5.22)$$

При розрахунку  $I_{\text{закр}}$  всі електрофізичні параметри повинні бути визначені для максимально допустимої температури кристалу 413 К.

Відзначимо, що рівняння (5.21) є трансцендентним і може вирішуватися лише чисельними засобами.

### 5.2.8 Вольт-амперна характеристика відкритого тиристора.

Відправною точкою для розрахунку ВАХ відкритого тиристора служить система рівнянь (5.11). Будемо вважати, що струм аноду заданий і необхідно визначити падіння напруги на тиристорі. Напругу переходу 3 виразимо через струм:

$$U_3 = \varphi_T \ln \left( \frac{I_{j3}}{I_{s3}} + 1 \right). \quad (5.23)$$

Використовуючи третє рівняння системи (5.11), одержуємо:

$$I_{j3} + \frac{\varphi_T}{R_u} \ln \left( \frac{I_{j3}}{I_{s3}} + 1 \right) - I_a = 0. \quad (5.24)$$

Отримане рівняння дасть можливість визначити струм переходу 3  $I_{j3}$ . Після цього послідовно знаходимо струми переходів 2 і 1:

$$I_{j2} = \frac{\alpha_{23}}{1 - \alpha_{12}^2} I_{j3} - \frac{I_a}{1 + \alpha_{12}}; \quad (5.25)$$

$$I_{j1} = I_a + \alpha_{12} I_{j2}. \quad (5.26)$$

Далі знаходимо напруги переходів 1 і 2:

$$U_1 = \varphi_T \ln \left( \frac{I_{j1}}{I_{s1}} + 1 \right); \quad (5.27)$$

$$U_2 = \varphi_T \ln \left( \frac{I_{j2}}{I_{s2}} + 1 \right). \quad (5.28)$$

Напругу  $U_3$  знаходимо за допомогою формули (5.23). Тоді повна напруга тиристора:

$$U = U_1 - U_2 + U_3. \quad (5.29)$$

### 5.2.9 Максимальний прямий струм відкритого тиристора.

Максимальний струм тиристора знаходиться з умови, що при протіканні струму теплова потужність, яка виділяється, нагріває кристал до максимально допустимої температури  $T_{jm}=417\text{ K}$ .

Потужність, що виділяється в тиристорі:

$$P_{\text{ел}} = IU(I).$$

Потужність, що віддається в навколишнє середовище, визначається температурою кристалу і тепловим опором корпусу:

$$P_{\text{тепл}} = \frac{T_{jm} - T_{\text{к}}}{R_T}.$$

Умовою теплового балансу є рівність:

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{тепл}} \quad \text{або} \quad IU(I) - P_{\text{тепл}} = 0. \quad (5.30)$$

Вирішивши останнє рівняння відносно  $I$ , отримаємо максимальний струм тиристора. Залежність  $U(I)$  розраховується за методикою, викладеною в п. 5.2.7.

### 5.2.10 Максимальна напруга відкритого тиристора. $U_F$

розраховується за методикою, викладеною в п. 5.2.7 для максимального струму відкритого тиристора.

**5.2.11 Робоча напруга закритого тиристора** знаходиться зі співвідношення:

$$U_p = 0,6U_{\text{л2}},$$

де  $U_{\text{л2}}$  – напруга лавинного пробою переходу 2.

### 5.2.12 Струм закритого тиристора.

Розглянемо роботу закритого тиристора при впливі на нього деякої робочої напруги. В цьому випадку перехід 2 знаходиться під впливом великої негативної напруги і через нього протікає деякий

зворотний струм. Переніс носіїв заряду від переходу 2 до переходу 1 не грає помітної ролі і генератор  $\Gamma_{12}$  струму в еквівалентній схемі тиристора можна не враховувати.

Повна напруга тиристора:

$$U = U_1 - U_2 + U_3. \quad (5.31)$$

Падіння напруги на прямо зміщених переходах 1 і 2 малі у порівнянні з падінням на зворотнозмщеному переході 3, тому можна вважати, що

$$U_2 = -U_p,$$

де  $U_p$  – робоча напруга тиристора, розрахована раніше.

При розрахунку зворотного струму переходу 2 необхідно поряд з об’ємним струмом врахувати генераційний струм збідненого шару. В цьому випадку струм переходу 2:

$$I_{j2} = -(I_{s2} + B\sqrt{U_p}), \quad (5.32)$$

де

$$B = \frac{n_i S}{\tau_{12}} \sqrt{\frac{q \varepsilon \varepsilon_0}{2 N_{12}}}. \quad (5.33)$$

Останні формули дозволяють визначити власний струм переходу 2. Але повний струм переходу буде включати ще струми генераторів  $\Gamma_{21}$ ,  $\Gamma_{23}$ .

Викинувши з еквівалентної схеми генератор  $\Gamma_{12}$ , замість першого рівняння системи (5.11) отримаємо рівність:

$$I_a = I_{j1}. \quad (5.34)$$

Використовуючи останнє рівняння, з системи (5.11) можна отримати наступне:

$$(1 - \alpha_{12} - \alpha_{23})I_{j3} + (1 - \alpha_{12})\frac{U_3}{R_{ui}} + I_{j2} = 0. \quad (5.35)$$

Якщо підставити замість  $U_3$  вираз (5.23), отримаємо рівняння для  $I_{j3}$ :

$$(1 - \alpha_{12} - \alpha_{23})I_{j3} + \frac{(1 - \alpha_{12})\varphi_T}{R_{uu}} \ln\left(\frac{I_{j3}}{I_{s3}} + 1\right) + I_{j2} = 0. \quad (5.36)$$

Знайшовши  $I_{j3}$ , можна обчислити струм закритого тиристора  $I_{a0}$ :

$$I_{a0} = \frac{\varphi_T}{R_{uu}} \ln\left(\frac{I_{j3}}{I_{s3}} + 1\right). \quad (5.37)$$

**5.2.13 Розрахунок ВАХ тиристора (пряма гілка).** Система керування тиристора з урахуванням генерації носіїв заряду в збідненому шарі переходу 2 має вигляд:

$$I_a = I_{j1} - \alpha_{12}I_{j2}; \quad (5.38)$$

$$I_a = -(I_{j2} - I_{g2}) + \alpha_{21}I_{j1} + \alpha_{23}I_{j3}; \quad (5.39)$$

$$I_a = I_{j3} + \frac{U_3}{R_{uu}}. \quad (5.40)$$

де  $I_{g2}$  – додатковий струм переходу 2, пов’язаний з генерацією в збідненому шарі і з лавиноутворенням.

Будемо вважати струм аноду заданим. Прослідкуємо алгоритм розрахунку напруги тиристора.

Розраховуємо величини  $I_{j3}$ ,  $U_3$  для рівняння (5.40). Для того, щоб зробити другий крок алгоритму, знайдемо  $I_{j1}$  з формули (5.38) і підставимо в (5.39). Після перетворення одержуємо рівність:

$$I_2 = \alpha_{23}I_{j3} - (1 - \alpha_{21})I_a, \quad (5.41)$$

$$\text{де} \quad I_2 = (1 - \alpha_{12}\alpha_{21})I_{j2} + I_{g2}. \quad (5.42)$$

Відзначимо, що струми  $I_{j2}$ ,  $I_{g2}$  можуть бути або обидва додатними (при  $U_2 > 0$ ), або обидва від'ємними (при  $U_2 < 0$ ). Отже, за знаком величини  $I_2$  можна судити про знак зміщення переходу 2.

Далі врахуємо наступні обставини. Якщо розрахунок величини  $I_2$  за формулою (5.41) дасть  $I_2 > 0$ , це означає додатне зміщення переходу 2. В такому випадку немає необхідності враховувати генерації ний струм переходу 2 і з формули (5.42) одержуємо:

$$I_{j2} = \frac{I_2}{(1 - \alpha_{12}^2)}. \quad (5.43)$$

Тут враховується, що в нашому випадку  $\alpha_{12} = \alpha_{21}$ .

Якщо розрахунок за формулою (5.41) дасть  $I_2 < 0$ , що означає від'ємне зміщення переходу 2, тоді, навпаки, в формулі (5.42) немає необхідності враховувати  $I_{j2}$  і, отже,  $I_2 = I_{g2}$ .

Генераційний струм, в свою чергу, з урахуванням лавиноутворення має вид:

$$I_{g2} = \frac{B\sqrt{|U_2|}}{1 - (|U_2|/U_{.12})^n}, \quad (5.44)$$

де  $n$  – емпірична константа, значення якої див. в табл. 2.1.

Останні дві рівності дозволяють отримати рівняння для  $U_2$ :

$$\frac{B\sqrt{|U_2|}}{1 - (|U_2|/U_{.12})^2} + I_2 = 0. \quad (5.45)$$

Відзначимо також, що, якщо для заданого  $I_a$  отримане  $I_2 < 0$ , немає сенсу враховувати вклад генератора  $I_{12}$ , тому що зворотнзмщений перехід 2 в цьому випадку не здійснює інжекцію. Тоді, вважаючи  $\alpha_{12} = 0$ , замість (5.38) отримуємо рівність

$$I_a = I_{j1}; \quad (5.46)$$

На основі наведених міркувань одержуємо наступний алгоритм розрахунку ВАХ тиристора:

1. Задаємо значення струму тиристора  $I_a$ .
2. Використовуючи рівняння (5.40), знаходимо  $U_3$  і  $I_{j3}$ .
3. Використовуючи рівняння (5.40), знаходимо  $I_2$ .
4. Якщо  $I_2 > 0$ , переходимо до п. 5; якщо  $I_2 < 0$ , – до п. 10.
5. Використовуючи рівняння (5.43), знаходимо  $I_{j2}$ .
6. Використовуючи рівняння (5.38), знаходимо  $I_{j1}$ .
7. Знаходимо напруги переходів і  $U_1$  і  $U_2$  (за формулами 5.27, 5.28)

$$U_1 = \varphi_T \ln \left( \frac{I_{j1}}{I_{s1}} + 1 \right), \quad U_2 = \varphi_T \ln \left( \frac{I_{j2}}{I_{s2}} + 1 \right). \quad (5.47)$$

8. Використовуючи рівняння (5.31), знаходимо повну напругу тиристора  $U$ .
9. Використовуючи рівняння (5.45), знаходимо  $U_2$ .
10. Знаходимо  $U_1$  за формулою

$$U_1 = \varphi_T \ln \left( \frac{I_a}{I_{s1}} + 1 \right). \quad (5.48)$$

11. Переходимо до п. 8.

Розрахунок прямої гілки ВАХ виконати окремо для ділянок відкритого (в діапазоні зміни струму  $I_a$  від 0 до  $I_m$ ) і закритого (в діапазоні зміни струму  $I_a$  від 0 до  $I_{\text{вискл}}$ ) станів.

**5.2.14 Розрахунок зворотної гілки ВАХ.** Будемо вважати, що на тиристор діє зворотна напруга, значення якої набагато більше, ніж падіння напруги на прямозміщеному переході 2. Внесок в повну напругу тиристора напруги  $U_3$  також незначний, тому що вона дорівнює падінню напруги на опорі шунтування  $R_{ш}$  при проходженні через нього зворотного струму тиристора. Отже, можна вважати, що  $U = U_1$ . Внесок величин  $U_2$  і  $U_3$  приводить до неправильних

результатів лише на початковій ділянці зворотної гілки ВАХ, при напругах порядку 1 В.

Запишемо систему рівнянь тиристора за умови, що  $U < 0$ . В зворотнозміщених переходах 1 і 3 не відбувається інжекція неосновних носіїв, тому генератори  $I_{21}$ ,  $I_{23}$  з еквівалентної схеми можна виключити. Через те, що перехід 3 шунтується низькоомним опором  $R_{ш}$ , елемент  $\Pi_3$  також можна опустити. Для переходу 1 необхідно врахувати генераційний струм і лавиноутворення, в той же час власний струм  $I_{j1}$  виявляється дуже малим, і їм також можна знехтувати.

З урахуванням висловлених зауважень одержуємо:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{g1} + \alpha_{12} I_{j2}; \\ I_a &= I_{j2}; \\ I_a &= \frac{U_3}{R_{ш}}. \end{aligned} \quad (5.49)$$

З перших двох рівнянь одержуємо:

$$I_a = \frac{I_{g1}}{1 - \alpha_{12}}. \quad (5.50)$$

Генераційний струм переходу 1 з урахуванням лавиноутворення

$$I_a = \frac{B\sqrt{|U|}}{1 - (|U|/U_{.11})^n}. \quad (5.51)$$

Введемо зворотну напругу тиристора  $U_{36} = -U$ . Використовуючи останні дві рівності, одержуємо:

$$I_a = \frac{B\sqrt{U_{36}}}{(1 - \alpha_{12}) \left[ 1 - (U_{36}/U_{.11})^n \right]}. \quad (5.52)$$

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ПОСИЛАНЬ

- 1 Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Справочник. – К.: Наук. Думка, 1975. – 704 с.
- 2 Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1984. – 655 с.
- 3 Вишневский Л.И., Руденко В.С., Платонов А.П. Силовые ионные и полупроводниковые приборы. – М.: В. шк., 1975. – 343 с.
- 4 Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Сахаров Ю.В. Силовые полупроводниковые приборы. – М.: Энергия, 1985. – 512 с.
- 5 Преображенский В.И., Зимин Е.Н. Силовые кремнивые вентили. – М.: Энергия, 1971.
- 6 Кремнивые вентили /Под ред. С.Б.Юдицкого. – М.: Энергия, 1968. – 304 с.
- 7 Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. – М.: Сов. радио, 1969. – 592 с.
- 8 Викулин В.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
- 9 Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. – М.: В. шк., 1981. – 430 с.
- 10 Трутко А.Ф. Методы расчетов транзисторов. – М.: Энергия, 1971. – 272 с.
- 11 Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1980. – 424 с.
- 12 Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. – М.: Сов. радио, 1974. – 246 с.
- 13 Терехов В.А. Задачник по электронным приборам. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1963. – 350 с.
- 14 Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 391 с.

**Додаток А**  
**Приклад оформлення титульної сторінки**

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Кафедра МiHE

**КУРСОВИЙ ПРОЕКТ**

\_\_\_\_\_  
(тема проекту)

з дисципліни „Твердотіла електроніка“

Виконав:

студент \_\_\_\_ курсу, група РП–\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Ініціали, Прізвище)

Прийняв:

(посада)

\_\_\_\_\_  
(Ініціали, Прізвище)

20 \_\_ р.

**Додаток Б**  
**Вихідні параметри випрямляючого діоду**

| Варіант | Вихідні параметри |          |            |                                               |                                        |                       |                |              |
|---------|-------------------|----------|------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|----------------|--------------|
|         | $D$ , мм          | $H$ , мм | $w_e$ , мм | $N_{\delta}$ , $\text{см}^{-3} \cdot 10^{14}$ | $N_e$ , $\text{см}^{-3} \cdot 10^{14}$ | $\tau_{\delta}$ , мкс | $\tau_e$ , мкс | $R_m$ , К/Вт |
| 1       | 1,7               | 0,2      | 0,05       | 40                                            | 5                                      | 35                    | 8              | 10           |
| 2       | 2,5               | 0,24     | 0,1        | 4                                             | 10                                     | 40                    | 6              | 15           |
| 3       | 2,3               | 0,24     | 0,08       | 10                                            | 0,8                                    | 30                    | 8              | 7            |
| 4       | 2                 | 0,22     | 0,05       | 9                                             | 0,5                                    | 50                    | 6              | 12           |
| 5       | 5                 | 0,28     | 0,09       | 100                                           | 4                                      | 25                    | 8              | 11           |
| 6       | 3,2               | 0,25     | 0,07       | 1                                             | 0,3                                    | 40                    | 7              | 9            |
| 7       | 4                 | 0,33     | 0,12       | 80                                            | 6                                      | 30                    | 9              | 8            |
| 8       | 2                 | 0,18     | 0,07       | 9                                             | 0,9                                    | 55                    | 5              | 7            |
| 9       | 2,2               | 0,3      | 0,08       | 3                                             | 0,8                                    | 35                    | 6              | 6            |
| 10      | 1,8               | 0,23     | 0,07       | 20                                            | 3                                      | 15                    | 6              | 10           |
| 11      | 3                 | 0,27     | 0,1        | 60                                            | 5                                      | 28                    | 5              | 12           |
| 12      | 2,7               | 0,26     | 0,07       | 7                                             | 100                                    | 20                    | 7              | 10           |
| 13      | 2,5               | 0,27     | 0,09       | 50                                            | 1                                      | 40                    | 4              | 8            |
| 14      | 4,2               | 0,36     | 0,13       | 10                                            | 0,5                                    | 25                    | 8              | 4            |
| 15      | 1,8               | 0,22     | 0,08       | 8                                             | 4                                      | 15                    | 6              | 12           |
| 16      | 2,9               | 0,23     | 0,08       | 2                                             | 2                                      | 43                    | 6              | 10           |
| 17      | 1,8               | 0,2      | 0,06       | 10                                            | 0,2                                    | 20                    | 4              | 8            |
| 18      | 3,1               | 0,26     | 0,08       | 30                                            | 5                                      | 30                    | 5              | 10           |

## Додаток В

### Вихідні параметри біполярного транзистора

| Матеріал  | Структура    | $R_m$ , К/Вт | $\tau_k$ , мкс | $\tau_{\delta}$ , мкс | $\tau_e$ , мкс | $N_{k_3} \cdot 10^{14}$<br>см <sup>-3</sup> | $N_{\delta_5} \cdot 10^{14}$<br>см <sup>-3</sup> | $N_{e_5} \cdot 10^{14}$<br>см <sup>-3</sup> | $w_{k_3}$ , мкм | $w_{\delta_5}$ , мкм | $w_{e_5}$ , мкм | $d_{k_3}$ , мм | $d_{\delta_5}$ , мм | $d_{e_5}$ , мм | № варіанту |
|-----------|--------------|--------------|----------------|-----------------------|----------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|----------------|---------------------|----------------|------------|
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 35           | 5              | 10                    | 1              | 50                                          | 30                                               | 10                                          | 120             | 40                   | 40              | 3,6            | 3,3                 | 4              | <b>1</b>   |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 15           | 15             | 6                     | 3              | 8                                           | 5                                                | 2                                           | 70              | 10                   | 20              | 1,3            | 1                   | 1,5            | <b>2</b>   |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 20           | 12             | 8                     | 5              | 60                                          | 40                                               | 20                                          | 70              | 15                   | 15              | 2,2            | 1,9                 | 2,6            | <b>3</b>   |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 22           | 15             | 9                     | 2              | 9                                           | 1                                                | 3                                           | 70              | 20                   | 10              | 2,5            | 2,2                 | 3              | <b>4</b>   |
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 26           | 6              | 12                    | 6              | 3                                           | 5                                                | 1                                           | 120             | 50                   | 30              | 3,5            | 3,2                 | 4              | <b>5</b>   |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 15           | 12             | 7                     | 8              | 10                                          | 3                                                | 6                                           | 70              | 20                   | 10              | 1,5            | 1,3                 | 1,8            | <b>6</b>   |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 20           | 11             | 6,5                   | 7,5            | 6                                           | 1                                                | 0,9                                         | 80              | 10                   | 10              | 2,7            | 2,4                 | 3,1            | <b>7</b>   |
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 22           | 8              | 10                    | 6,5            | 8                                           | 10                                               | 3                                           | 120             | 20                   | 60              | 2,9            | 2,5                 | 3,3            | <b>8</b>   |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 18           | 12             | 6,5                   | 3,5            | 20                                          | 5                                                | 5                                           | 65              | 20                   | 15              | 1,9            | 1,7                 | 2,1            | <b>9</b>   |
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 24           | 8              | 15                    | 6              | 7                                           | 6                                                | 5                                           | 140             | 30                   | 30              | 3              | 2,7                 | 3,5            | <b>10</b>  |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 12           | 10             | 8                     | 5              | 9                                           | 2                                                | 8                                           | 40              | 30                   | 30              | 1,4            | 1,2                 | 1              | <b>11</b>  |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 18           | 12             | 6,5                   | 4              | 10                                          | 3                                                | 6                                           | 50              | 30                   | 20              | 1,5            | 1,3                 | 1,9            | <b>12</b>  |
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 21           | 5,5            | 8,5                   | 3,5            | 9                                           | 4                                                | 3                                           | 150             | 25                   | 25              | 2,3            | 2                   | 2,7            | <b>13</b>  |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 17           | 12             | 8,5                   | 6              | 7                                           | 2                                                | 4                                           | 55              | 20                   | 25              | 1,6            | 1,4                 | 1,8            | <b>14</b>  |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 26           | 12             | 9                     | 6              | 9                                           | 1                                                | 3                                           | 60              | 30                   | 10              | 3              | 2,7                 | 3,3            | <b>15</b>  |
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 18           | 9              | 12                    | 7              | 6                                           | 5                                                | 7                                           | 120             | 40                   | 40              | 2              | 1,7                 | 2,2            | <b>16</b>  |
| <b>Ge</b> | <b>p-n-p</b> | 16           | 8              | 11                    | 5              | 2                                           | 1                                                | 2                                           | 135             | 30                   | 35              | 1,8            | 1,5                 | 2,2            | <b>17</b>  |
| <b>Si</b> | <b>n-p-n</b> | 15           | 12             | 8                     | 4              | 50                                          | 10                                               | 10                                          | 60              | 10                   | 30              | 2,2            | 2                   | 2,5            | <b>18</b>  |

# **Додаток Г** **Вихідні параметри кремнієвого тиристора**

| <i>№ варіанта</i> | $T_K$ | $R_{T_3}$ К/Вт | $\tau_{34}$ , мкс | $\tau_{23}$ , мкс | $\tau_{12}$ , мкс | $\tau_{01}$ , мкс | $N_{34}$ ,<br>см <sup>-3</sup> | $N_{23}$ ,<br>см <sup>-3</sup> | $N_{12}$ ,<br>см <sup>-3</sup> | $N_{01}$ ,<br>см <sup>-3</sup> | $d$ , мм | $w_{01}$ , мкм | $w_{12}$ , мкм | $w_{23}$ , мкм | $w_{34}$ , мкм | $m_{us}$ , шт | $r_{us}$ , мкм |
|-------------------|-------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| 1                 | 300   | 2,5            | 2                 | 3                 | 11                | 8                 | $6 \cdot 10^{19}$              | $3 \cdot 10^{17}$              | $2 \cdot 10^{14}$              | $2 \cdot 10^{17}$              | 5        | 50             | 100            | 50             | 20             | 25            | 25             |
| 2                 | 320   | 1,8            | 1                 | 2                 | 9                 | 6                 | $5 \cdot 10^{19}$              | $2 \cdot 10^{18}$              | $6 \cdot 10^{14}$              | $2 \cdot 10^{18}$              | 8        | 60             | 80             | 60             | 20             | 20            | 50             |
| 3                 | 300   | 3,6            | 1                 | 3                 | 9,5               | 7                 | $1 \cdot 10^{19}$              | $6 \cdot 10^{17}$              | $1 \cdot 10^{15}$              | $6 \cdot 10^{17}$              | 11       | 60             | 130            | 60             | 35             | 30            | 25             |
| 4                 | 300   | 4,0            | 0,5               | 2                 | 8                 | 5                 | $1 \cdot 10^{19}$              | $1 \cdot 10^{18}$              | $5 \cdot 10^{14}$              | $1 \cdot 10^{18}$              | 15       | 75             | 150            | 75             | 30             | 40            | 40             |
| 5                 | 310   | 8,5            | 2                 | 5                 | 22                | 10                | $9 \cdot 10^{19}$              | $9 \cdot 10^{16}$              | $6 \cdot 10^{14}$              | $9 \cdot 10^{19}$              | 9        | 55             | 90             | 55             | 35             | 20            | 30             |
| 6                 | 360   | 0,75           | 3                 | 4,5               | 12                | 8                 | $4 \cdot 10^{19}$              | $2 \cdot 10^{17}$              | $1 \cdot 10^{15}$              | $2 \cdot 10^{17}$              | 6        | 45             | 110            | 45             | 15             | 15            | 30             |
| 7                 | 350   | 6,2            | 3                 | 5,5               | 14                | 7                 | $9 \cdot 10^{19}$              | $9 \cdot 10^{16}$              | $2 \cdot 10^{14}$              | $2 \cdot 10^{16}$              | 10       | 70             | 110            | 70             | 40             | 10            | 28             |
| 8                 | 340   | 5,8            | 1                 | 3                 | 13                | 9                 | $1 \cdot 10^{19}$              | $4 \cdot 10^{16}$              | $1 \cdot 10^{15}$              | $4 \cdot 10^{17}$              | 7        | 75             | 100            | 50             | 30             | 20            | 30             |
| 9                 | 330   | 3,3            | 2                 | 4                 | 7                 | 5                 | $5 \cdot 10^{19}$              | $1 \cdot 10^{17}$              | $6 \cdot 10^{14}$              | $1 \cdot 10^{17}$              | 9        | 80             | 120            | 60             | 35             | 22            | 35             |
| 10                | 340   | 6,0            | 3                 | 5                 | 9                 | 6                 | $9 \cdot 10^{19}$              | $8 \cdot 10^{16}$              | $3 \cdot 10^{14}$              | $8 \cdot 10^{16}$              | 4,4      | 70             | 100            | 50             | 30             | 30            | 35             |