

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

### 7.1 Тема: Дослідження характеристик діода

**Мета роботи:** ознайомитися із методикою зняття вольт-амперних характеристик (ВАХ) діодів; дослідити властивості схем випрямлення: однопівперіодної, мостової, симетричної із подвоєнням напруги; ознайомитися зі схемою стабілізатора напруги на стабілітроні.

**Обладнання:** прилад для зняття вольт-амперних характеристик діодів, демонстраційні блоки із зазначеними схемами випрямлення та стабілізації; згладжувальні RC-фільтри; осцилограф.

### 7.2 Теоретичні відомості

#### Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковий діод — це  $p-n$ -перехід, який має випрямні властивості. На обох його ділянках ( $p$  і  $n$ ) закріплені контактні виводи. За конструкцією переходи і діоди бувають площинні й точкові.

У площинних діодах лінійні розміри, що визначають площу переходу, значно більші від товщини переходу, у точкових лінійні розміри такі самі, як і товщина переходу. У точкових діодах (з точковим переходом) як випрямний елемент використовується контакт германієвої або кремнієвої монокристалічної пластинки з загостреним електродом із вольфраму, фосфористої або берилієвої бронзи. Структуру площинного і точкового діодів показано на рисунку 7.1.

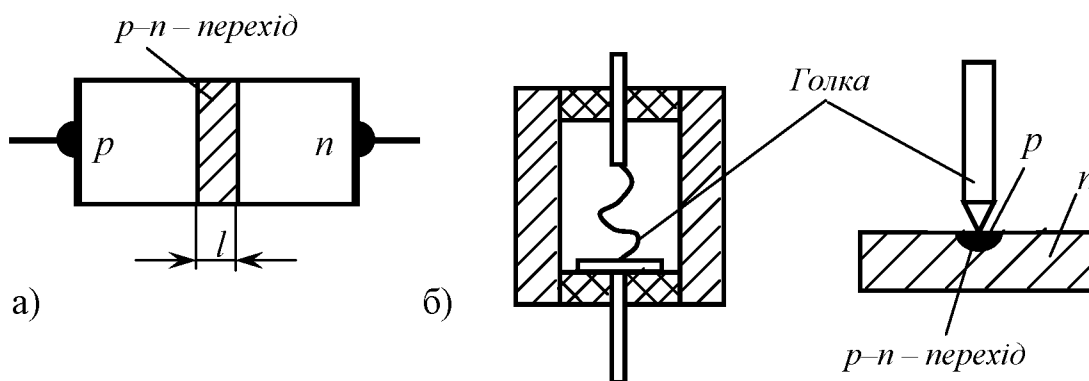


Рисунок 7.1 — Структура діода: а — площинного; б — точково-

#### Вольт-амперна характеристика діода

Розглянемо вольт-амперну характеристику ідеалізованого площинного діода, а потім зробимо необхідні уточнення, справедливі для реального діода. Ідеалізація зводиться до таких припущень:

а) перехід  $p-n$  несиметричний, ділянка  $p$  легована значно більше, ніж ділянка  $n$  ( $p > n$ ). Можна вважати, що в такому переході інжекція відбува-

ється лише в одному напрямі;

б) ширина переходу дуже мала, тому процесами, що відбуваються в ділянці переходу, можна знехтувати;

в) оскільки опір емітерної і базової ділянок незначний порівняно з опором ділянки переходу, вважатимемо, що зовнішня напруга прикладена до переходу.

При прямому зміщенні переходу внаслідок інжекції дірок з емітера в базу створюється підвищена концентрація їх на базовій межі переходу. Із віддаленням від переходу концентрація дірок зменшується внаслідок рекомбінації. Інжекція дірок у базу порушує її електричну нейтральність і спричинює до припливу надлишкових електронів із зовнішнього кола. Ці електрони розподіляються так, щоб скомпенсувати поле дірок, тобто розподіляються в базі за тим самим законом, що й дірки.

В установленому режимі в базі проходить дифузійний дірковий струм  $J_{рд}$ . Дірки, інжектвані в базу внаслідок наявності градієнта їх концентрації, дифундують від більшої концентрації до меншої.

Під час дифузійного руху частина дірок рекомбінує з електронами. Для відновлення електричної нейтральності, тобто поповнення електронів, що пішли на рекомбінацію, в базу з джерела напруги надходять електрони, рух яких і є базовим струмом.

Дифузійним електронним струмом  $J_{нд}$ , зумовленим інжекцією електронів з бази в емітер, відповідно до нашого припущення ( $P_p \gg n_n$ ), нехтуємо.

Отже, при прямому зміщенні діода через нього проходить дифузійний дірковий струм, при зворотному відбувається явище екстракції, яке й зумовлює зворотний струм діода.

Дірки бази (неосновні носії), що підійшли до ділянки переходу, внаслідок теплового руху викидаються полем переходу в ділянку емітера. Порушена електрична нейтральність в емітері й базі відновлюється припливом (від джерела напруги в емітер) електронів і впливом з ділянки бази надлишкових електронів у джерело. Такий рух електронів і являє собою діркову дрейфову складову зворотного струму  $J_{рЕ}$ . Електронною дрейфовою складовою зворотного струму  $J_{нЕ}$ , що зумовлена екстракцією електронів з емітера в базу, зважаючи на припущення, що  $p_n \gg p_p$ , нехтуємо. Зворотний струм діода, як і прямий, в основному дірковий.

Рівняння вольт-амперної характеристики ідеалізованого діода

$$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

де  $I = jS$ ;  $I_0 \approx j_{p0} \cdot S$

Струм  $I_0$  називається тепловим струмом, бо він дуже залежить від температури внаслідок збільшення рівноважної концентрації неосновних носіїв (дірок) у базі  $p_{0б}$ . Крім того,  $I_0$  називають «зворотним струмом насичення». При великих значеннях зворотної прикладеної напруги з її зміною

він не змінюється. Вольт-амперну характеристику ідеалізованого діода показано на рисунку 7.2.

Із збільшенням зворотної прикладеної напруги ( $U < 0$ ) збільшується потенціальний бар'єр, а дифузійний струм (струм основних носіїв) зменшується за експоненціальним законом. Загальний струм через перехід дорівнює тепловому струмові, який, будучи струмом неосновних носіїв, не залежить від напруги. При  $|U| \geq 0,1 \dots 0,2$  В значення  $e^{U/\phi_T} \ll 1$  тепловий струм визначається лише кількістю неосновних носіїв, які з'являються на межі переходу за одиницю часу, тобто температурою і концентрацією неосновних носіїв.

При збільшенні прямої напруги потенціальний бар'єр знижується, дифузійний струм зростає за експоненціальним законом, а тепловий струм лишається незмінним. Ним можна знехтувати вже при  $U = 0,1$  В, бо  $I_0 e^{U/\phi_T} \gg I_0$ .

Із зміною знака прикладеної до діода напруги змінюється напрям струму. При зворотних напругах проходить струм, що дорівнює одиницям і десяткам мікроамперів. Водночас при невеликих прямих напругах у кілька десятків вольтів ці самі діоди пропускають струми близько 1 А. Це дає підставу твердити, що напівпровідниковий діод придатний для випрямлення змінних струмів.

Розглянута вольт-амперна характеристика ідеалізованого діода добре узгоджується з експериментальною. Проте реальна вольт-амперна характеристика істотно відрізняється від ідеалізованої. У реальних діодах зворотний струм не залишається сталим, він дуже зростає із збільшенням зворотної напруги і завжди при малих і великих зворотних напругах більший від теплового. Пояснюється це тим, що зворотний струм реального діода складається з таких струмів: теплового  $I_0$ , термогенерації  $I_G$ , поверхневого витоку  $I_B$ .

Тепловий струм зумовлений генерацією неосновних носіїв в об'ємах, прилеглих до переходу. З цих об'ємів неосновні носії дифундують у ділянку переходу і виносяться полем в іншу ділянку, де вони є основними носіями. У рівноважному стані (на перехід не подано напруги) ці потоки компенсуються зустрічними потоками інжектованих основних носіїв.

Тепловий струм змінюється із зміною температури, головним чином внаслідок зміни рівноважної концентрації неосновних носіїв у базі  $p_{0b}$  і в емітері  $n_{0e}$ . Якщо в ідеалізованому діоді ми вважали перехід нескінченно

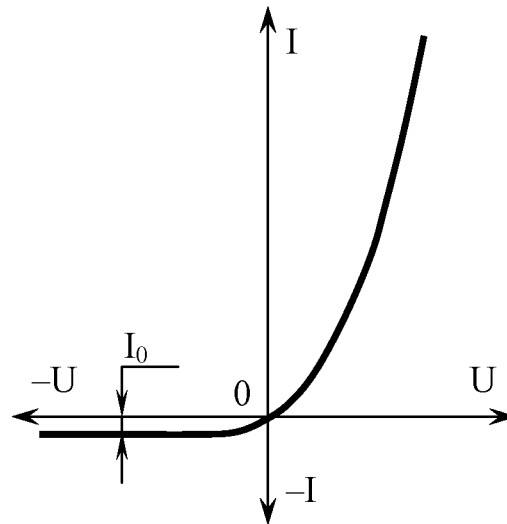


Рисунок 7.2 — Вольт-амперна характеристика ідеалізованого площинного діода

вузьким і нехтували генерацією та рекомбінацією носіїв заряду в ньому, то в реальних діодах цього зробити не можна. Носії, що генеруються в ділянці переходу, швидко виносяться електричним полем у відповідну ділянку переходу; це і є струм термогенерації  $I_G$ . У рівноважному стані діода струм термогенерації  $I_G$  компенсується таким самим струмом рекомбінації  $I_R$ .

Струм рекомбінації зумовлений основними носіями, енергія яких недостатня для інжекції (подолання потенціального бар'єра), а тому вони лише проникають у перехід з емітера і бази. Поблизу точки «відбиття» ці носії мають малу швидкість і встигають рекомбінувати.

Нерідко головним фактором, що впливає на зворотну характеристику діода, є струм поверхневого витоку  $I_B$ . Він зумовлений насамперед явищем генерації і рекомбінації, а також молекулярними плівками окислів міді, газів, парів води та інших на поверхні напівпровідника. При підвищенні зворотної напруги струм витоку зростає спочатку майже лінійно, а потім більш різко.

Характерною особливістю струму витоку є його часова нестабільність, яку називають «повзучістю». Вона виявляється в зміні зворотного струму протягом деякого часу після стрибкоподібної зміни зворотної напруги, зокрема після ввімкнення. Час наростання або спадання зворотного струму змінюється від кількох секунд до кількох годин. Зворотні характеристики реальних германієвих і кремнієвих діодів показано на рисунку 5.3. При значному збільшенні зворотної напруги струм діода зростає спочатку повільно, а потім дедалі швидше. Якщо не вжити спеціальних заходів, то  $p$ - $n$ -перехід буде пробитий.

Розрізняють польовий, лавинний, тепловий і поверхневий пробої  $p$ - $n$ -переходу. Польовий пробій буває двох різновидів: зенерівський і тунельний. Зенерівський пробій полягає в тому, що досить сильне електричне поле в  $p$ - $n$ -переході іонізує атоми напівпровідника (валентні електрони з ковалентних зв'язків переходять у зону провідності), Внаслідок цього різко збільшується зворотний струм через перехід. Напруга зенерівського пробою залежить від питомого опору напівпровідника. Чим більший його питомий опір, тим більша напруга пробою.

Тунельний пробій пояснюється тунельним ефектом, суть якого полягає ось у чому. При досить сильних електричних полях у  $p$ - $n$  переходах (понад  $10^7$  В/см) завдяки хвильовим властивостям електрони можуть переходити з валентної зони ділянки  $p$  у зону провідності ділянки  $n$  і в зворотному напрямі: із зони провідності ділянки  $n$  у валентну зону ділянки  $p$  без зміни їх енергії, тобто не долаючи потенціального бар'єра. Умови для розвитку тунельного ефекту створюються в тонких (менших від 0,01—0,02 мкм)  $p$ - $n$ -переходах з високолегованих ( $N > 10^{19}$  см $^{-3}$ ) напівпровідників.

Лавинний пробій у  $p$ - $n$ - переходах зумовлюється явищем ударної іонізації. При цьому неосновні носії в ділянці  $p$ - $n$ -переходу (які утворюють тепловий струм  $I_o$ ) під впливом електричного поля набувають енергії, до-

статньої для ударної іонізації атомів напівпровідника. Електрони, які виникли в результаті іонізації, у свою чергу розганятимуться полем і утворюватимуть нові електрони та дірки і т. д. При достатньо великій напруженості поля іонізація набуває лавинного характеру (подібно до самостійного розряду в газах), і зворотний струм різко збільшується. Цей вид пробією властивий слабколегованим напівпровідникам, коли ширина  $p$ - $n$ -переходу є досить великою. Напруга лавинного пробією збільшується із зростанням питомого опору напівпровідника. Встановлено, що напруга польового (зе-нерівського, тунельного) пробією менша як 2 В для германієвих і менша як 5 В для кремнієвих переходів.

Лавинний пробій характерний для германієвих переходів при напругах понад 5 В і для кремнієвих — 7 В. При проміжних значеннях напруг обидва види пробією можуть статися одночасно.

Тепловий пробій є наслідком виділення тепла в переході під час проходження зворотного струму. Теплова енергія підвищує температуру переходу, що в свою чергу збільшує тепловий струм і потужність, розсіювані в переході. Таке взаємозумовлене наростання температури і потужності, розсіюваної в переході, може набути лавинного характеру і внаслідок цього може статися тепловий пробій.

При тепловому пробією внаслідок теплового збудження розриваються зв'язки між атомами кристалічної решітки. Тепловий пробій буває при значно нижчих напруженостях електричного поля, ніж польовий і лавинний, у тих випадках, коли тепло не відводиться від переходу, який працює в режимі великих струмів. Зворотну вольт-амперну характеристику діода при польовому, лавинному і тепловому пробіях показано на рисунку 7.3.

У кремнієвих напівпровідникових приладах тепловий струм  $I_0$  такий малий, що тепловий пробій практично виключається. Напруга теплового пробією залежить від значення зворотного струму, опору переходу, умов тепловідведення, температури напівпровідника і т. д.

При всіх розглянутих видах пробією необмежене зростання струму призводить до руйнування переходу і повного виходу з ладу діода. Щоб запобігти пробією переходу, треба під час роботи послідовно з діодом вмикати струмообмежувальний резистор з опором такої величини, щоб при пікових значеннях напруги струм у колі не перевищував допустимого значення.

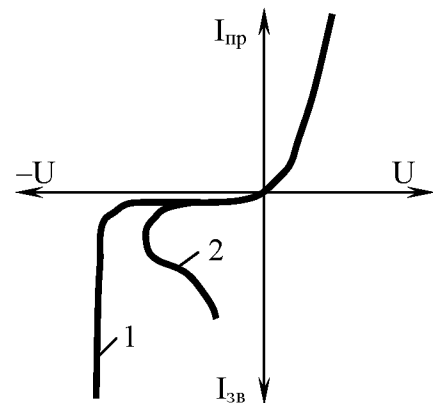


Рисунок 7.3 – Зворотна вольт-амперна характеристика діода при пробією: 1-лавінному або польовому; 2-тепловому

Пряма гілка вольт-амперної характеристики реального діода відрізняється від вольт-амперної характеристики ідеалізованого діода через наявність струму рекомбінації в переході, вплив опору  $r_b$  і модуляцію базового шару.

При прямому зміщенні переходу знижується потенціальний бар'єр і різко зростає концентрація дірок та електронів у ділянці переходу, а також глибина їх проникнення в перехід, тому ймовірність рекомбінації збільшується, при цьому струм рекомбінації перевищує струм термогенерації. Через струм рекомбінації пряма гілка характеристики реального діода крутіша від ідеальної. Струм рекомбінації особливо відчутний у кремнієвих діодах при зниженій температурі, коли тепловий струм дуже зменшується. На пряму гілку вольт-амперної характеристики впливає опір бази внаслідок спаду напруги на ньому і зменшення напруги, прикладеної до переходу, порівняно з зовнішньою прикладеною напругою.

Пряма гілка вольт-амперної характеристики для будь-якого реального діода є більш пологою, ніж для ідеалізованого (рисунок 7.4, а). Для гер-

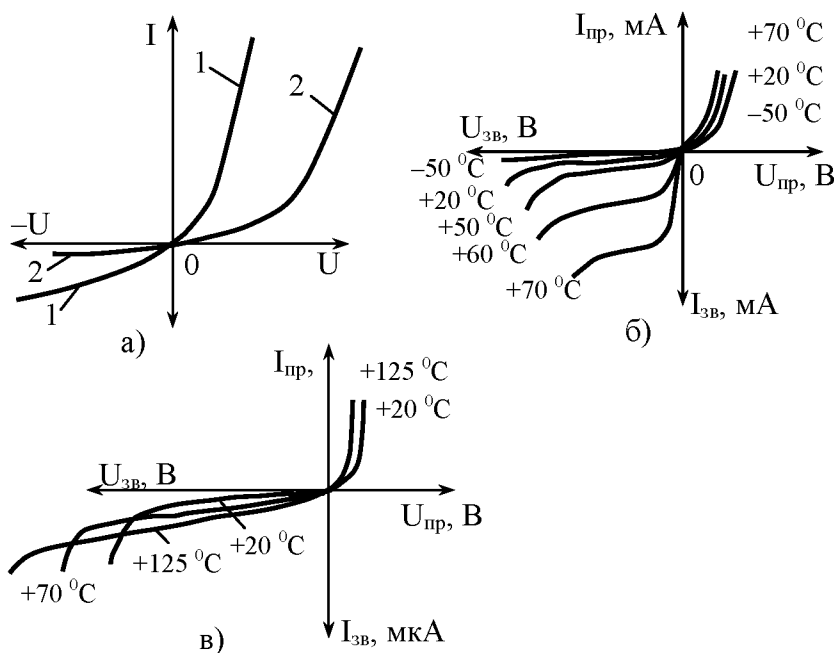


Рисунок 7.4 — Вольт-амперні характеристики германієвого (1) і кремнієвого (2) діодів (а) та їх зміна при зміні температури (б, в)

манієвих діодів похил вольт-амперної характеристики на початковій ділянці визначається тепловим струмом, у кремнієвих діодах — струмом рекомбінації. Збільшення прямого струму в германієвих діодах починається при менших значеннях прямої напруги, ніж у кремнієвих. Лінійна ділянка характеристики германієвих діодів крутіша, ніж кремнієвих.

Оскільки у кремнієвих діодах тепловий струм  $I_o$  значно менший, ніж у германієвих, то початкова ділянка прямої гілки вольт-амперної характеристики у кремнієвих діодах дуже полого. Це пояснюється тим, що забо-

ронена зона кремнію значно ширша, ніж германію.

Із зміною температури змінюється як зворотна, так і пряма гілка вольт-амперної характеристики (рисунок 7.4, б, в), причому зміни зворотного струму помітніші, ніж прямого. Причина цього — сильні температурні зміни концентрації неосновних носіїв, які визначають тепловий струм  $I_0$  і струм термогенерації  $I_G$ , основні складові зворотного струму.

Концентрація основних носіїв, яка визначає прямий струм, із зміною температури не змінюється, бо вона визначається в основному концентрацією домішок. З підвищенням температури зворотний струм збільшується приблизно у два рази на кожні  $10^\circ \text{C}$  у германієвих діодах (рисунок 7.4, б) і приблизно у два з половиною рази в кремнієвих (рисунок 7.4, в). Пряма гілка характеристики з підвищенням температури зміщується вліво і стає крутішою.

### 7.3 Хід роботи

— Підключити діод до вимірювального приладу в прямому напрямку, зняти пряму гілку ВАХ; повторити роботу для зворотного підключення; побудувати з отриманих результатів графіки, апроксимувати експериментальні точки аналітичною кривою.

— Змонтувати схему однопівперіодного випрямлення, підключити до напруги (12В!), спостерігати на осцилографі форми сигналу в різних точках схеми; дослідити вплив згладжувального конденсатора на форму вихідної напруги для різних величин вихідного струму.

— Дослідити форму вихідної напруги для двох інших схем випрямлення, накреслити криві з екрана осцилографа.

— Скласти схему найпростішого стабілізатора напруги, під'єднати до мостової схеми випрямлення, спостерігати на осцилографі форму напруги на вході та виході стабілізатора при зміні вихідного струму.

### Зміст звіту

В звіті привести принципіальні схеми випрямлячів, стабілізатора, ВАХ діода, графіки напруг, що спостерігалися.