

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Основи електрики та електроніки, електричні вимірювання та їх
стандартизація»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 16 - Основи фізики напівпровідникових приладів. Діоди

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

Розробник: викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

Рецензенти:

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

План лекції:

1. Напівпровідники. Загальні відомості
2. Фізичні основи роботи електронно-діркового переходу (р-п переходу)
3. ВАХ електронно-діркового переходу (р-п переходу)
4. Напівпровідникові резистори
5. Напівпровідникові діоди

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна:

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

Допоміжна:

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

Текст лекції

1. Напівпровідники. Загальні відомості

Напівпровідники (НП) належать до класу речовин, що мають тверду кристалічну структуру і за питомою провідністю ($10^4 \dots 10^{-10}$ Сим/см) займають проміжне місце між провідниками ($10^4 \dots 10^6$ Сим/см) та діелектриками (10^{-10} Сим/см та менше).

При виготовленні НП приладів частіше використовують кремній (Si - має робочу температуру до 140°C), германій (Ge - найбільша робоча температура 75°C), арсенід галію (GaAs - працює при температурах до $350 \dots 400^\circ\text{C}$).

Електрони, розташовані на зовнішній орбіті атома речовини, мають назву валентних. Вони найслабкіше зв'язані з ядром і визначають фізичні та хімічні властивості речовини.

У НП усі валентні електрони міцно зчеплені з кристалічними ґратками завдяки так званому ковалентному зв'язку. Доки цей зв'язок існує, електрони не можуть переносити електричний заряд у матеріалі.

Механізм електропровідності НП розглянемо на прикладі кристалічних ґраток германію, що є елементом IV групи періодичної системи Менделєєва. Ґратки у вигляді плас- кісної структури зображено на рис. 1.

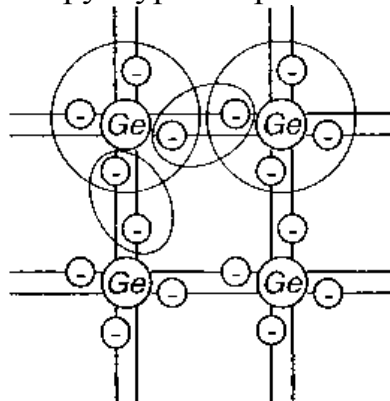


Рисунок 1 – Кристалічні ґратки германію

Атоми германію розміщені у вузлах кристалічних ґраток, їх зв'язок з іншими атомами здійснюється за допомогою чотирьох валентних електронів. Подвійні лінії між вузлами вказують на ковалентний характер зв'язку, тобто кожна пара валентних електронів належить водночас двом сусіднім атомам. При температурі абсолютного нуля і при відсутності опромінення у НП відсутні рухомі носії і його електричний опір великий (нескінченний).

За звичайних умов, внаслідок дії на речовину теплової енергії, деякі з валентних електронів покидають ковалентні зв'язки і стають електронами провідності - відбувається процес генерації пар носіїв: електронів і дірок. При цьому дірка - вакантне місце у ковалентному зв'язку - має позитивний заряд, що їй приписується умовно.

Якщо тепер помістити НП в електричне поле, виникне спрямований рух зарядів - електричний струм. На відміну від провідників струм в НП забезпечується носіями двох зарядів - позитивного (дірки) та негативного

(електрони).

Провідність чистого НП має назву власної, сам же НП відносять до і-типу. Власна провідність звичайно невелика.

Розглянемо приклад, коли у розплав чистого германію додається домішка п'ятивалентного елемента (V група таблиці Менделєєва), наприклад, арсену (As), як показано на рис. 2.

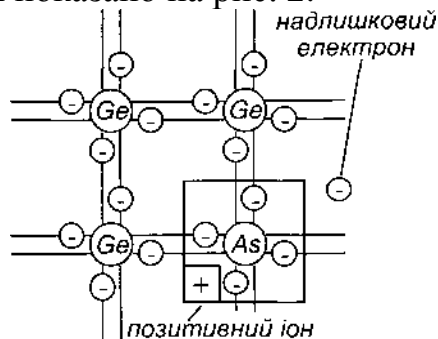


Рисунок 2 – Кристалічні ґратки германію з донорною домішкою

При застиганні у деяких вузлах кристалічних ґраток германію його атоми заміщуються атомами домішки. При цьому чотири валентних електрони домішки створюють систему ковалентних зв'язків із чотирма валентними електронами германію, а п'ятий електрон домішки виявляється надлишковим - вільним. Вільні електрони залишаються у вузлах кристалічних ґраток нерухомі позитивно заряджені іони, що створюють у кристалі позитивний об'ємний заряд.

Домішка, що віддає вільні електрони, називається донорною. НП з переважаючою кількістю вільних електронів має назву *НП з електронною провідністю*, або *НП n-типу*.

Розглянемо введення у германій домішки з трьома валентними електронами (III група таблиці Менделєєва), наприклад, індію (In), як це показано на рис. 3.

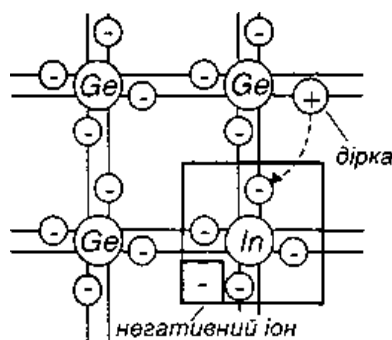


Рисунок 3 – Кристалічні ґратки германію з акцепторною домішкою

Для утворення ковалентного зв'язку між Ge та In одного електрона не вистачає. При дії теплоти навколишнього середовища електрони з верхнього рівня валентної зони переміщуються на рівень домішки, створюючи зв'язки, яких не вистачає, завдяки чому у валентній зоні утворюються рухомі дірки, а атоми домішки перетворюються у негативні іони. Така домішка називається акцепторною, а НП з переважною кількістю дірок - НП з дірковою

провідністю, або р-типу.

Переважаючі у НП рухомі носії заряду мають назву основних, решта - неосновних.

2. Фізичні основи роботи електронно-діркового переходу (р-п переходу)

р-п переходом називається вузька зона на межі між шарами НП р- і n-типу, як зображено на рис. 4.

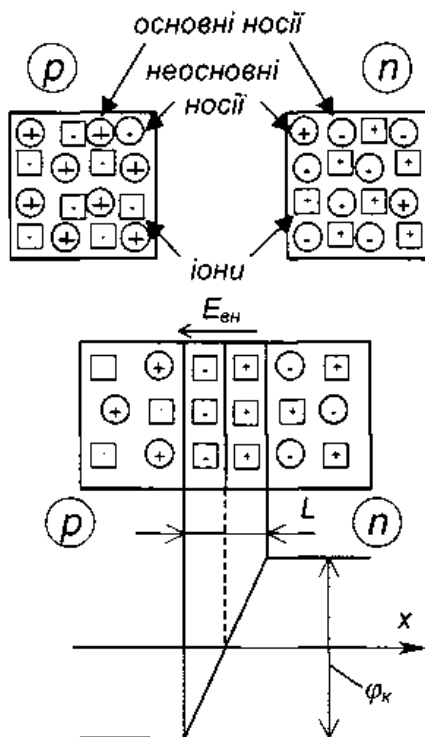


Рисунок 4 – Утворення на межі між шарами р-та п-типу р-п переходу з потенціальним бар'єром ϕ

Фізичні процеси, що відбуваються у р-п переході, визначають параметри та характеристики більшості НП приладів.

Допустимо, що концентрація основних носіїв у обидвох шарах НП однакова. При об'єднанні двох НП виникає взаємна дифузія (дифузійний струм $i_{диф}$) електронів із n-шару у р-шар (вони заповнюють вільні ковалентні зв'язки), а дірок - у протилежному напрямку. Внаслідок цього у приконтатній зоні НП р-типу (завдяки іонам акцепторної домішки $[-]$) з'являється негативний заряд, а у приконтатній зоні n-типу (завдяки іонам донорної домішки $[+]$) - позитивний заряд. Між цими зарядами виникає внутрішнє електричне поле з напруженістю $E_{вн}$, що гальмує рух основних носіїв зарядів. З іншого боку, це поле виявляється прискорюючим для неосновних рухомих носіїв зарядів (теплових), внаслідок чого через межу між НП виникає дрейфова складова струму $i_{др}$, протилежна дифузійній складовій $i_{диф}$ зумовленій рухом основних носіїв зарядів (внаслідок протікання i відбувається рекомбінація рухомих основних носіїв зарядів).

У сталому становищі

$$i_{др} + i_{диф} = 0.$$

Ця рівновага настає за певної контактної різниці потенціалів, що визначається величиною об'ємного заряду і називається *потенціальним бар'єром* φ_k .

Величина φ_k залежить від матеріалу НП і його температури. Для германію $\varphi_k = (0,4 \dots 0,6)$ В, для кремнію $\varphi_k = (0,6 \dots 0,8)$ В.

Зона об'ємного заряду – це і є електронно-дірковий перехід (*p-n* перехід). Ширина його, позначена як L , вимірюється десятками мікронів. Оскільки у *p-n* переході відсутні рухомі носії зарядів (він заповнений нерухомими іонами), то його електричний опір дуже великий.

Розглянемо поведінку *p-n* переходу при підімкненні до нього зовнішньої напруги. Можливе пряме або зворотне вмикання.

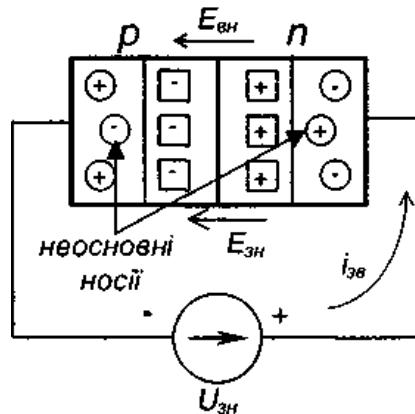


Рисунок 5 – Зворотне вмикання *p-n* переходу

При зворотньому вмиканні, як показано на рис. 1.5, до *p-n* переходу прикладається зовнішня напруга $U_{зн}$, внаслідок чого до його внутрішнього електричного поля додається зовнішнє електричне поле з напруженістю $E_{вн}$. У результаті поле в *p-n* переході зростає і його напруженість дорівнює

$$E_{рез} = E_{вн} + E_{зн}.$$

Оскільки електричний опір *p-n* переходу дуже великий, то майже вся напруга $U_{зн}$ прикладається до нього.

Отже, різниця потенціалів на переході становить

$$\varphi_{рез} = \varphi_k + U_{зн}.$$

Запірні властивості переходу при цьому зростають, дифузійна складова струму $i_{диф}$ зменшується, а дрейфова $i_{др}$ не змінюється (бо залежить лише від ступеня нагріву речовини). Через перехід протікає зворотний струм

$$i_{зв} = i_{др} - i_{диф}$$

Оскільки $i_{диф} = 0$, то зворотний струм визначається концентрацією неосновних носіїв зарядів і є незначним.

При прямому вмиканні, як показано на рис. 6, за зазначеної полярності зовнішньої напруги зовнішнє електричне поле спрямоване назустріч внутрішньому, і результуюча напруженість зменшується

$$E_{рез} = E_{вн} - E_{зн}.$$

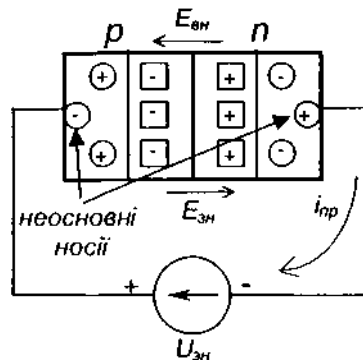


Рисунок 6 – Пряме вмикання р-п переходу

При цьому $i_{\text{диф}}$ зростає, а $i_{\text{др}}$ зменшується. Різниця потенціалів становить

$$\varphi_{\text{рез}} = \varphi_{\text{к}} - U_{\text{зн}}$$

У цьому випадку через перехід тече прямий струм

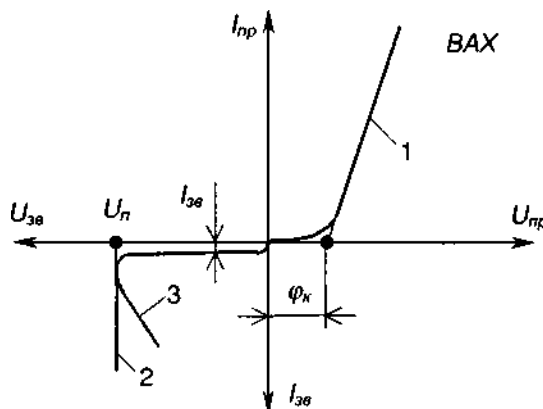
$$i_{\text{пр}} = i_{\text{диф}} - i_{\text{др}}$$

Він обумовлюється дифузійною складовою струму, тобто залежить від концентрації основних рухомих носіїв зарядів, і є великим.

Таким чином, *p-n* перехід має **вентильні властивості**, тобто при прямому вмиканні його опір малий, а при зворотному – значний.

3. ВАХ електронно-діркового переходу (р-п переходу)

Теоретична ВАХ *p-n* переходу показана на рис. 7. Вона має пряму (1) та зворотну (2, 3) гілки.

Рисунок 7 – Теоретична ВАХ *p-n* переходу

Якщо напруга прямого вмикання $U_{\text{пр}} < \varphi_{\text{к}}$ через перехід, опір якого великий, тече малий струм. Як тільки зі збільшенням $U_{\text{пр}}$ останнє досягне значення $U_{\text{пр}} = \varphi_{\text{к}}$, запірні властивості *p-n* переходу зникають, і струм через перехід визначається лише провідністю *p*- і *n*- шарів.

При зростанні від нуля зворотної напруги $U_{\text{зв}}$, швидкість руху неоосновних носіїв через перехід зростає. При $U_{\text{зв}} = U_{\text{п}}$ швидкість рухомих носіїв така, що їх енергії вистачає для виникнення в матеріалі ударної іонізації - вибивання додаткових носіїв заряду. Внаслідок цього відбувається лавиноподібний зріст зворотного струму. Це явище називається *електричним пробоем p-n переходу*, а $U_{\text{п}}$ - напругою пробою. Якщо при цьому *p-n* перехід ефективно охолоджується, різке зростання потужності, що в ньому

виділяється, не призводить до суттєвих змін температури структури і електричний пробій протікає при незмінній напрузі. Це явище має зворотний характер. Тобто, при зниженні $U_{зв}$ запірні властивості p - n переходу відновлюються (гілка 2 ВАХ).

Явище електричного пробою використовується, наприклад, при створенні такого НП приладу як стабілітрон.

При неефективному тепловідведенні, температура структури зростає (кількість рухомих носіїв при цьому збільшується також за рахунок теплової генерації), доки електричний пробій не переходить у *тепловий*, коли матеріал розплавляється і p - n перехід руйнується. Тепловий пробій незворотний (гілка 3 ВАХ).

Класифікація напівпровідникових приладів (НП)

НП прилади поділяються на такі групи:

- 1) НП резистори;
- 2) НП діоди;
- 3) біполярні транзистори;
- 4) уніполярні (польові) транзистори;
- 5) тиристори.

4. Напівпровідникові резистори

НП поділяються на лінійні та нелінійні.

У лінійних резисторів питомий електричний опір не залежить від прикладеної напруги. Їх умовне позначення наведене на рис. 8, а. Вони виготовляються на основі НП p - або n -типу і використовуються в інтегральних мікросхемах.

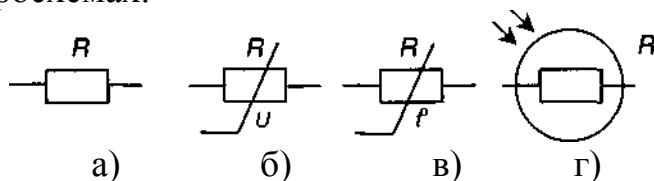


Рисунок 8 – Умовні позначення лінійного резистора (а), варистора (б), терморезистора (в), фоторезистора (г)

Нелінійні резистори (варистори) - це такі НП резистори, у яких питомий опір залежить від прикладеної напруги. Їх умовне позначення наведене на рис. 8, б. Варистор має нелінійну симетричну ВАХ, яку показано на рис. 9.

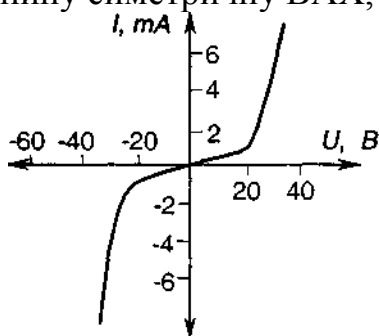


Рисунок 9 – ВАХ варистора

Варистори використовують як обмежувачі напруги для захисту НП приладів від короточасних перенапруг.

Також існують НП резистори, опір яких різко залежить від температури навколишнього середовища. Це – терморезистори. Їх умовне позначення наведене на рис. 8, в.

Терморезистори поділяються на термістори, у яких із зростанням температури опір зменшується, та позистори, у яких із зростанням температури опір зростає (виконуються на основі сегнетоелектриків).

Залежність опору терморезистора від температури визначається експоненціальним законом:

$$R_m = ke^{\beta/T},$$

де k , β - коефіцієнти, залежні від конструктивних розмірів та концентрації домішок у НП відповідно; T - абсолютна температура.

Терморезистори (термістори, позистори) використовуються як датчики температури у системах регулювання температури, теплового захисту, протипожежної сигналізації, для термостабілізації режимів роботи електронних пристроїв.

Потужні позистори дозволяють забезпечувати захист електрообладнання від струмів перевантаження (замість теплових реле).

У фоторезисторів (рис. 8, г) опір залежить від ступеню освітлення, їх, в основному, застосовують у пристроях автоматики.

5. Напівпровідникові діоди

Напівпровідникові діоди - це НП прилади, виготовлені на основі двошарових НП структур і які використовують властивості p - n переходу.

Широко розповсюджені випрямні діоди, дія яких базується на використанні вентильних властивостей p - n переходу.

Структура та умовне позначення діода, а також ВАХ потужного випрямного діода наведені на рис. 10.

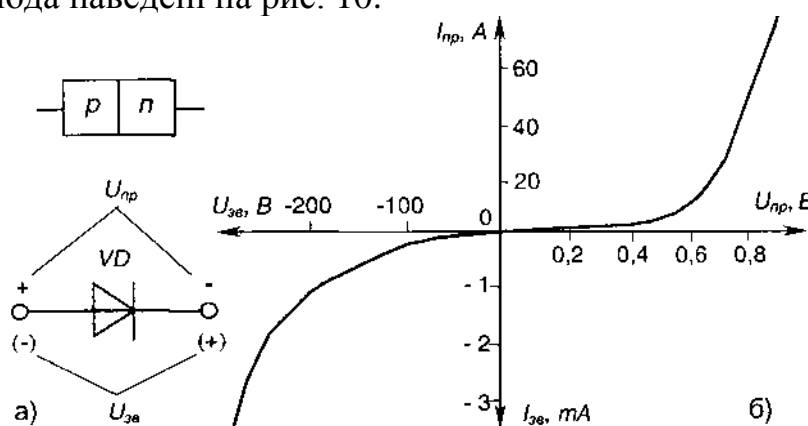


Рисунок 10 – Структура та умовне позначення (а) і ВАХ (б) випрямного діода

Ці діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти.

Основними параметрами випрямних діодів є:

– граничний прямий струм діода $I_{пр}$ - максимально допустиме середнє значення струму через діод у прямому напрямку;

- максимально допустимий прямий струм діода (імпульсний) $I_{np\ max}$;
- прямий спад напруги U_{np} , тобто середнє значення напруги на діоді при граничному прямому струмі I_{np} , для діодів з кремнію становить (0,6 ... 1) В;
- максимально допустима зворотна напруга $U_{зв\ max}$, що дорівнює максимально допустимому амплітудному значенню зворотної напруги, яке не призводить до виходу з ладу приладу за визначених умов охолодження.

НП діод, на якому напруга в зоні електричного пробою майже не залежить від струму, називається стабілітроном. Стабілітрони використовують для стабілізації напруги. Щоб запобігти тепловому пробою, їх конструкція забезпечує ефективне відведення тепла від кристалу.

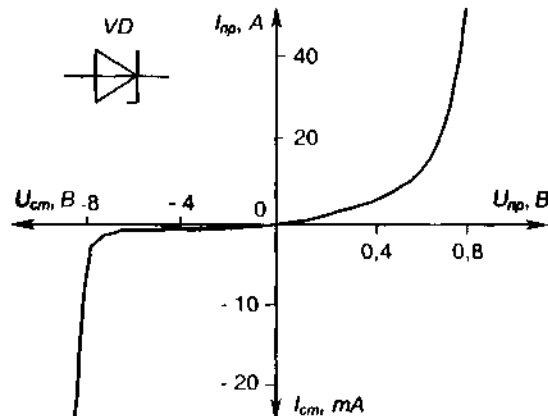


Рисунок 11 – Умовне позначення та ВАХ стабілітрона

Основними параметрами стабілітрона є:

- напруга стабілізації U_{cm} , що становить від 1 до 1000 В;
- динамічний опір на ділянці стабілізації (характеризує зміну величини напруги на приладі зі змінами струму крізь нього)

$$R_d = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}}$$

- мінімальний струм стабілізації $I_{cm\ min}$ - мінімальний струм, при якому прилад гарантовано знаходиться в режимі стабілізації - складає одиниці міліампер;

- максимальний струм стабілізації $I_{cm\ max}$ - максимально допустимий струм через прилад.

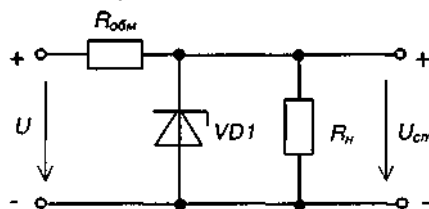


Рисунок 12 – Схема елементарного стабілізатора напруги

Найпростіша схема стабілізації наведена на рис. 12.

Тунельний діод - це НП прилад, у якого специфічний тунельний ефект призводить до появи на ВАХ при прямій нарузі ділянки негативної провідності - штрихова лінія на рис. 13 (там же наведено умовне позначення приладу). Як робоча використовується пряма гілка ВАХ.

Основними параметрами тунельного діода є:

- струм піку I_n , що складає (0,1...100) мА;
- відношення струму піку I_n до струму западини I_z (5...20).

Тунельні діоди - швидкодіючі НП прилади, що застосовуються в генераторах високочастотних коливань та швидкодіючих імпульсних перемикачах.

Для роботи у високочастотних та імпульсних пристроях призначені також відповідно високочастотні та імпульсні діоди, що мають малу ємність - мінімальну тривалість перехідних процесів при вмиканні та вимиканні.

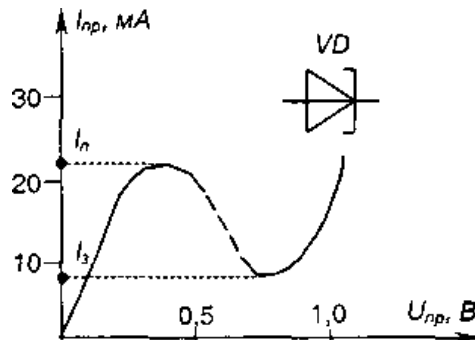


Рисунок 13 – Умовне позначення та ВАХ тунельного діода

Фотодіоди - фотоелектричні прилади з внутрішнім фотоелементом, який полягає у тому, що під дією світлової енергії відбувається іонізація атомів основної речовини та домішки. Як наслідок - струм при зворотному вмиканні зростає.

Світлодіоди - перетворюють енергію електричного поля в нетеплове оптичне випромінювання. При протіканні струму через діод рекомбінація носіїв заряду супроводжується виділенням квантів світла.

У **варикапа** при змінах величини зворотної напруги змінюється ємність, завдяки чому він може застосовуватися, наприклад, для автоматичного налаштування контурів радіоприймача або телевізора на потрібну станцію чи канал.

Умовні позначення фото-, світлодіода та варикапа наведені на рис. 2.7.

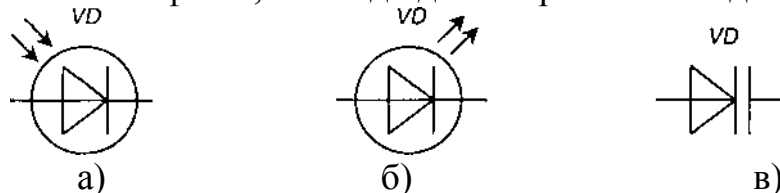


Рисунок 14 – Умовні позначення фотодіода (а), світлодіода (б), варикапа (в)