

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені
ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Борщаківський С. Є.

ЗВІТ

Дослідження ВАХ діодів

Київ. КНУ ім. Т. Шевченка, 2021

УДК 001.002 (008.21)ББК 73Ц

I-72

Укладачі: Білінський І. О.

I-72 Звіт. Дослідження ВАХ діодів./ укл. С. Є. Борщаківський . – К. :
КНУ ім. Т. Шевченка, 2021. – 17 с. (Укр. мов.)

Наведено загальний звіт виконання роботи з моделювання електронних
схем у програмі NI Multisim™.

УДК 001.008 (002.21)

ББК 73Ц

© Київський Національний
Університет імені Тараса Шевченка,
2021

РЕФЕРАТ

Звіт про дослідження ВАХ діодів: 17 с., 15 рис.

Об'єкт дослідження: напівпровідникові діоди.

Мета роботи: навчитися одержувати зображення ВАХ діодів на екрані двоканального осцилографа, дослідити властивості *p-n*-переходів напівпровідникових діодів різних типів.

Метод вимірювання: 1) одержання зображення ВАХ діодів на екрані двоканального осцилографа, який працює в режимі *характериографа*; 2) побудова ВАХ діодів шляхом вимірювання певної кількості значень сили струму I_d , що відповідають певним значенням та полярності напруги U_d , і подання результатів вимірів у вигляді графіка.

В роботі використано програмне забезпечення для моделювання електронних схем NI Multisim™.

Ключові слова: ВАХ – вольт-амперна характеристика, напівпровідниковий діод, стабілітрон, фотодіод, світлодіод.

ЗМІСТ

ВСТУП. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	5
ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	6
1. Випрямляючий діод.....	7
2. Стабілітрон.....	7
3. Світлодіод.....	8
4. Фотодіод.....	8
ВИСНОВКИ.....	9
ВІДПОВІДІ НА ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ.....	9
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	17

ВСТУП. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Напівпровідниковий діод (англ. *semiconductor diode*) – це напівпровідниковий прилад з одним *p-n*-переходом і двома виводами. ***p-n*-перехід** (англ. *p-n junction*) – перехідний шар, що утворюється на межі двох областей напівпровідника, одна з яких має провідність *n*-типу, а інша – провідність *p*-типу.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) діода (англ. *current-voltage characteristic*) – це залежність сили струму I_d через *p-n*-перехід діода від величини і полярності прикладеної до діода напруги U_d .

Характериограф – електронно-променевий прилад, на екрані якого можна спостерігати графіки функцій будь-яких фізичних величин, що можуть бути перетворені у пропорційні їм напруги, наприклад, графіки залежності сили струму I_D від напруги U_D .

ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

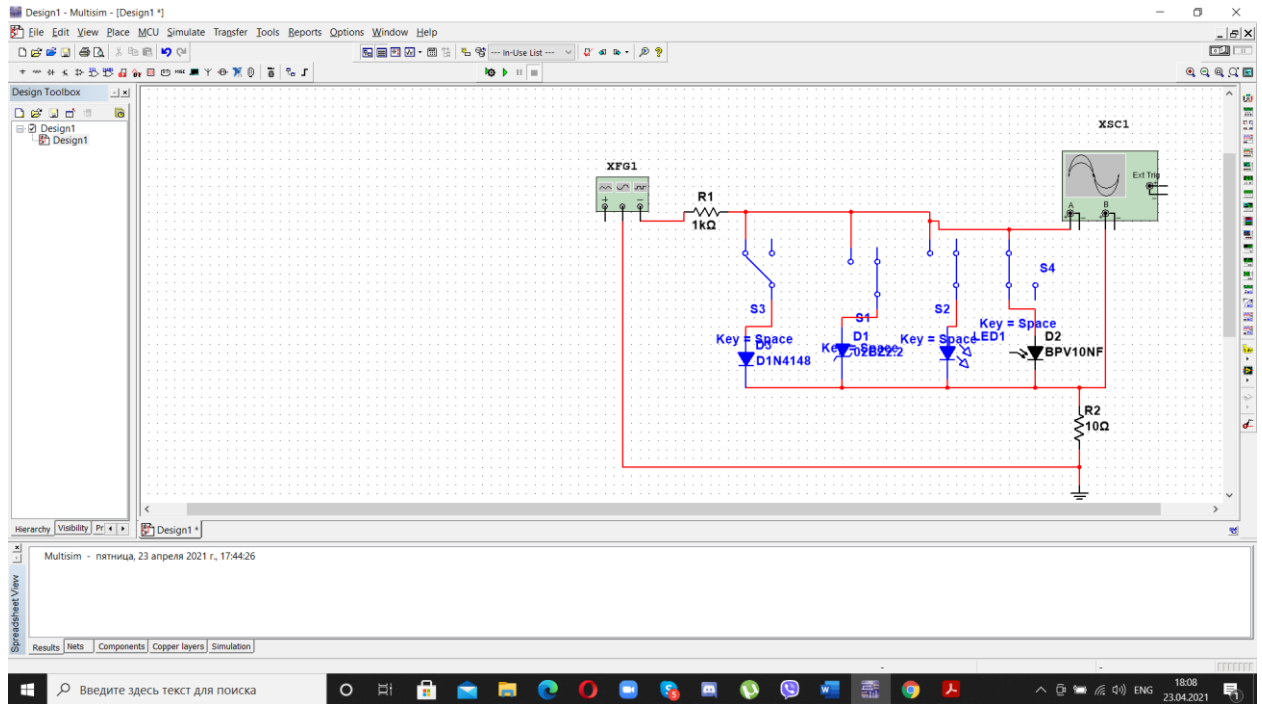


Рис 1 - Схема роботи .

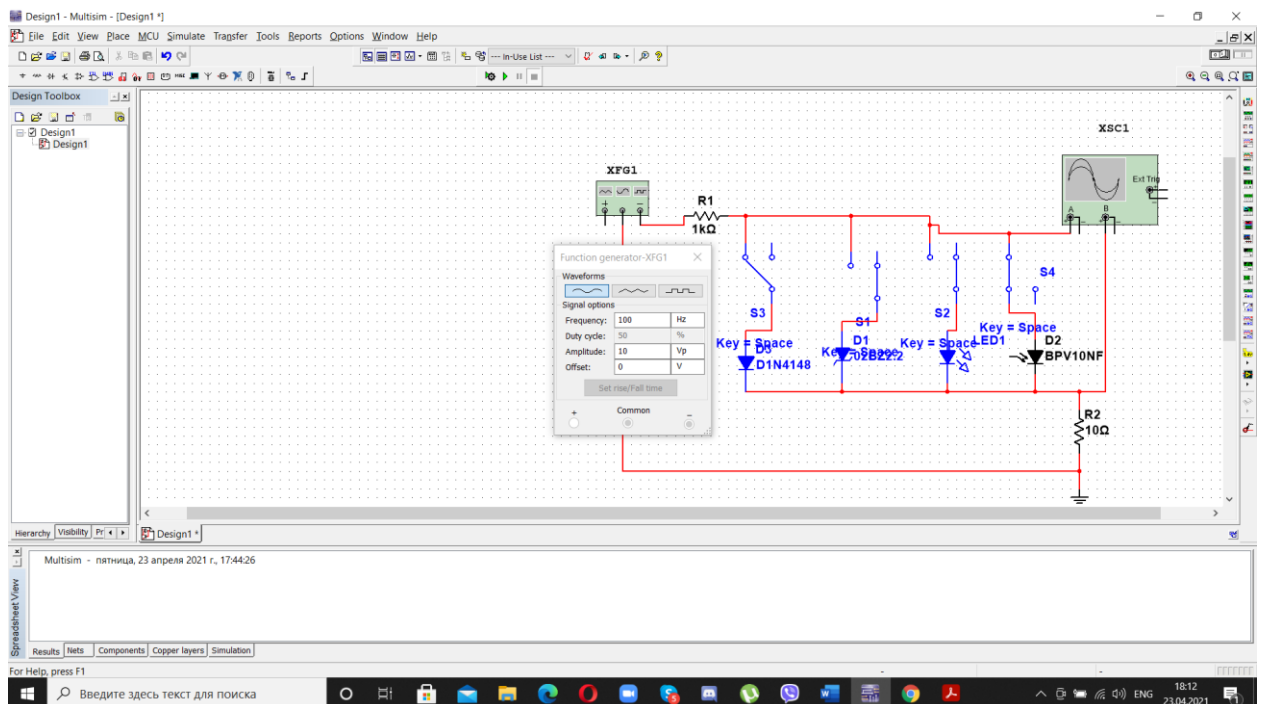


Рис 2 - Параметри джерела для випрямляючого діода, фотодіода, стабілітрона (для оптичного діода , ставяться середнє позначення хвилі , числа по такому порядку 1 ; 50) .

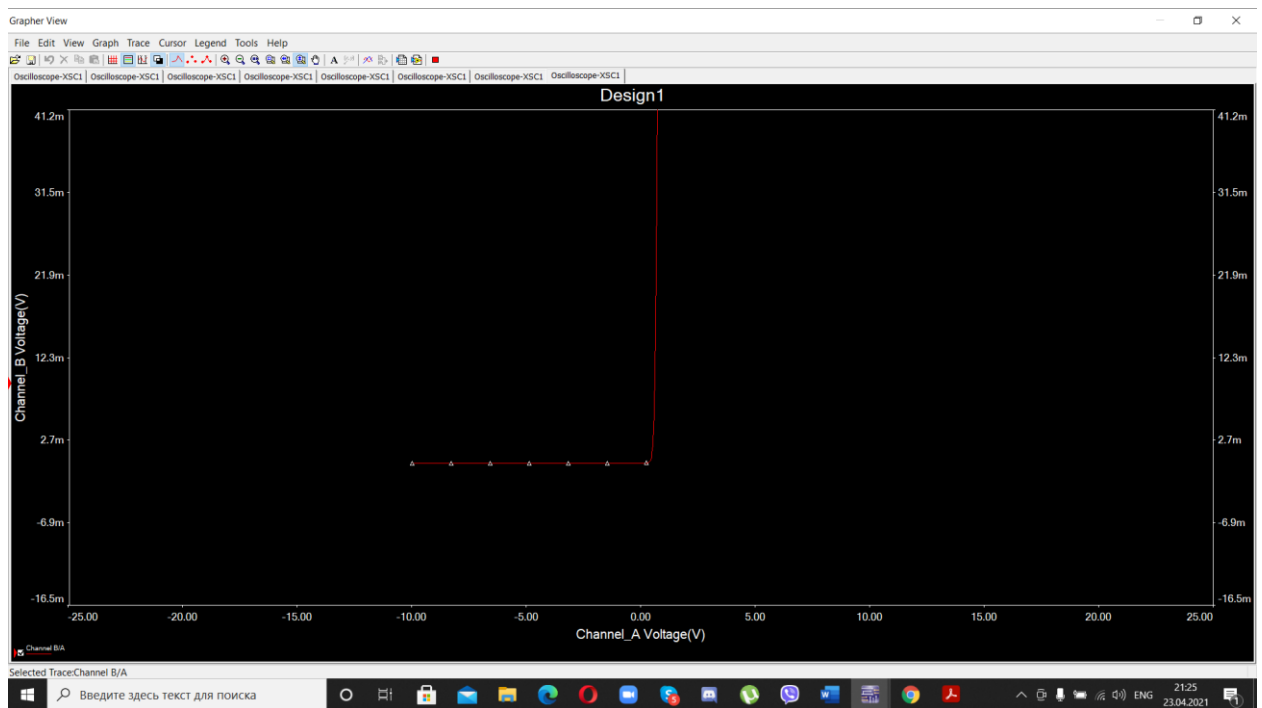


Рис 3 - ВАХ випрямляючого діоду .

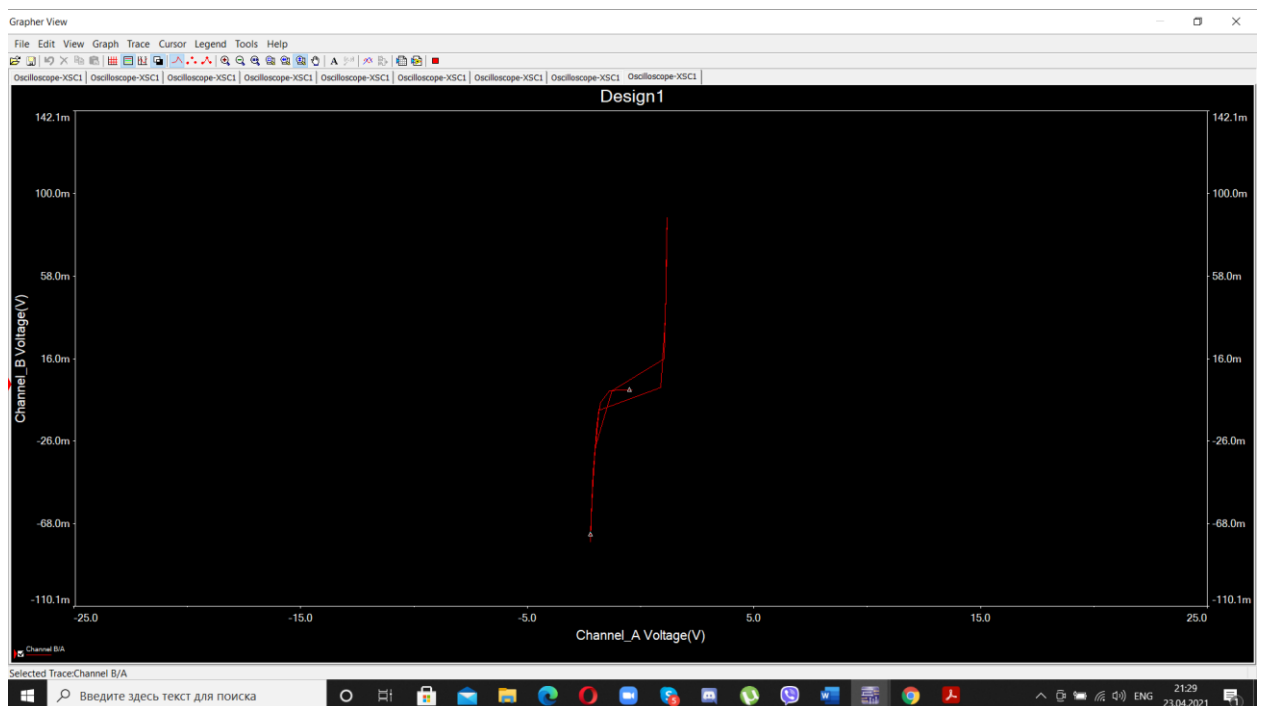


Рис 4 - ВАХ стабілітрону

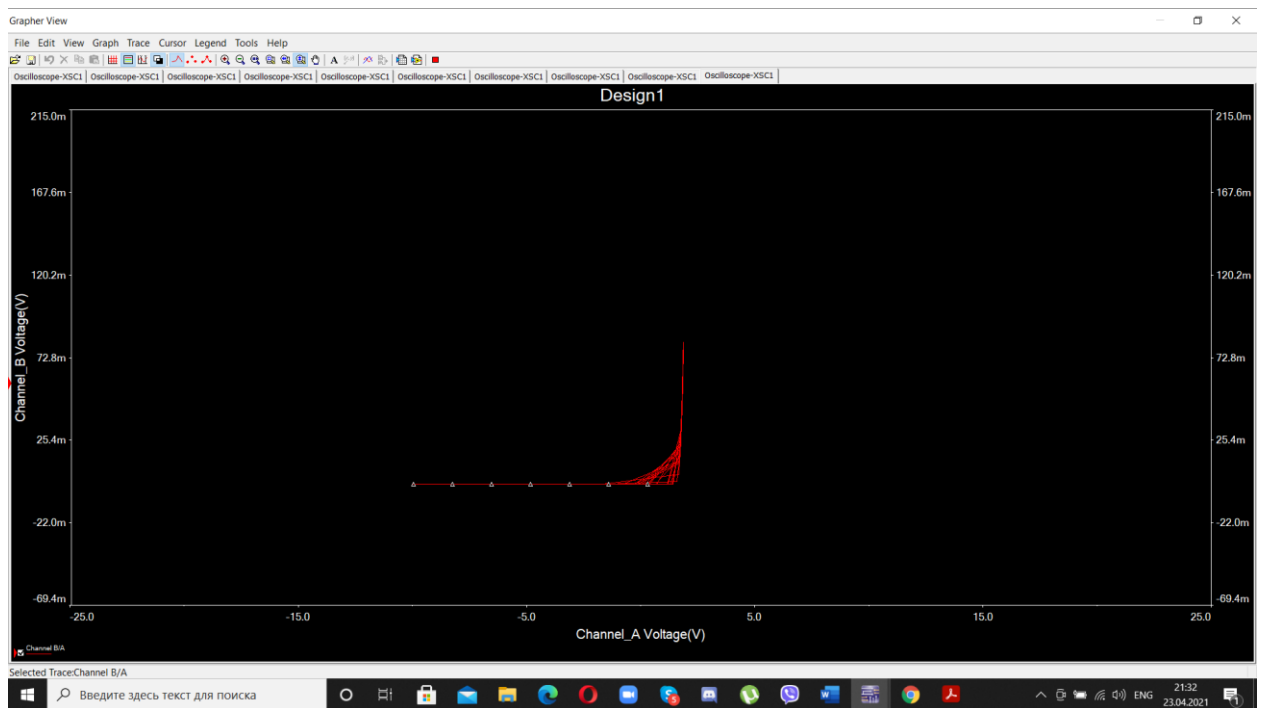


Рис 5 - ВАХ світлодіоду .

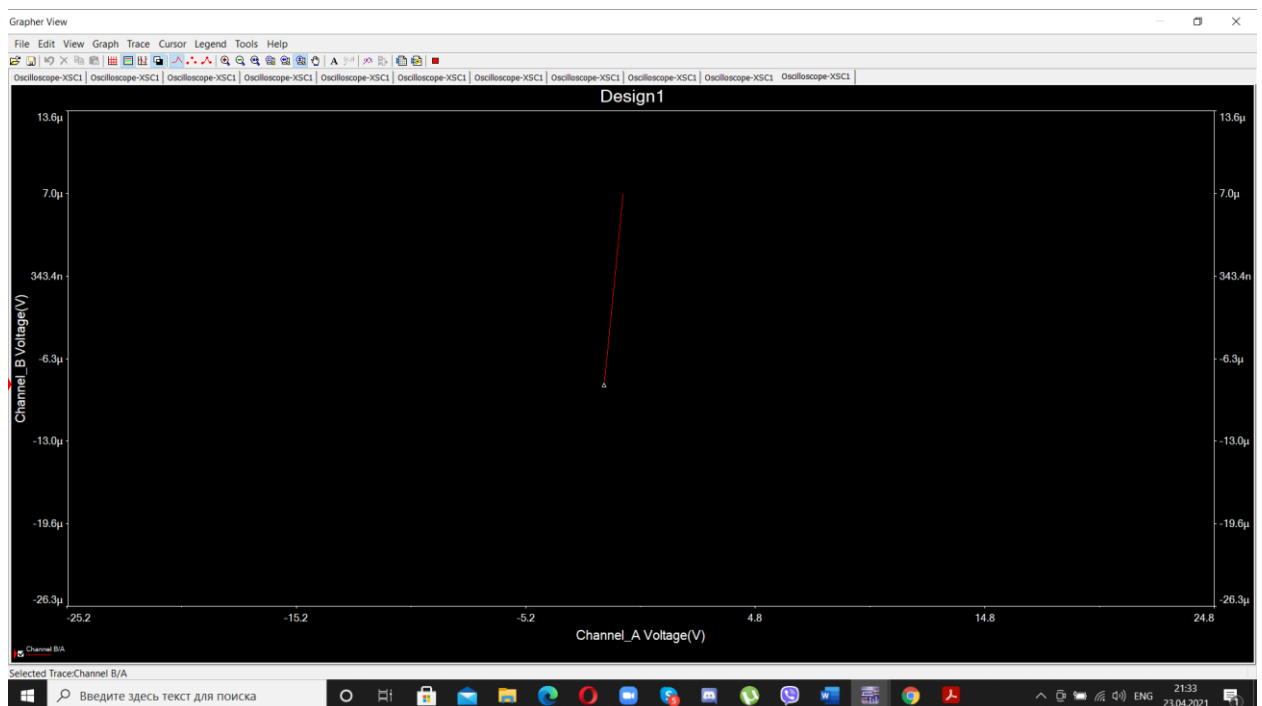


Рис 6 - . ВАХ фотодіоду .

ВИСНОВКИ

У даній роботі ми провели дослідження вольт-амперної характеристики напівпровідникових діодів різних типів, результати надано на рисунках. Роблячи методами : одержання зображення ВАХ діодів на екрані двоканального осцилографа, який працює в режимі *характериографа*; побудовали ВАХ діодів шляхом вимірювання певної кількості значень сили струму I_d , що відповідають певним значенням та полярності напруги U_d , і

подання результатів вимірів у вигляді графіка, ми побудували усі побудови способами NI Multisim™ і подано на рисунках. Також, ми змогли отримати ВАХ для таких пристроїв: випрямляючого діода, стабілітрона, фотодіода, світлодіода (параметри див. на рис. 1-4.1).

ВІДПОВІДІ НА ТЕОРЕТИЧНІ ПИТАННЯ

1-2. Напівпровідники n - та p -типу. Основні та неосновні носії заряду в таких напівпровідниках. P - n -перехід. Власне електричне поле переходу. Контактна різниця потенціалів. Дифузійний та дрейфовий струми.

Напівпровідники із внесеною акцепторною домішкою мають p -тип, а напівпровідники із внесеною донорною домішкою – n -тип.

Розглянемо роботу p - n -переходу, утвореного на межі поділу двох середовищ, які являють собою один і той же напівпровідник, в одну з частин якого введені донорні домішки і яка відповідно має провідність n -типу (тобто перше середовище – це матеріал n -типу), а в іншу введені акцепторні домішки і яка має провідність p -типу (друге середовище – матеріал p -типу).

Концентрація вільних електронів в матеріалі n -типу набагато більша, ніж концентрація вільних дірок. Тому електрони в матеріалі n -типу називають *основними носіями заряду*, а дірки – *неосновними носіями заряду*. В матеріалі p -типу – навпаки: дірки є основними носіями заряду, а електрони – неосновними. Якщо матеріал n -типу привести в контакт з матеріалом p -типу, то почнеться процес дифузії електронів з матеріалу n -типу (де їх концентрація велика) в матеріал p -типу (де їх концентрація мала).

Аналогічно, дірки будуть дифундувати з матеріалу p -типу (де їх концентрація велика) в матеріал n -типу (де їх концентрація мала). Зрозуміло, що при двох вищезгаданих процесах матеріал n -типу буде втрачати негативний заряд і набувати позитивного заряду, а матеріал p -типу, навпаки, буде втрачати позитивний заряд і набувати негативного заряду. В результаті в області контакту буде виникати електричне поле, яке буде протидіяти подальшому переходу електронів в p -область та дірок в n -область, і між матеріалом n -типу і матеріалом p -типу виникатиме різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів називається *контактною різницею потенціалів* ϕ_k , а вищезгадане електричне поле – *полем p - n -переходу*. Розглянемо поведінку носіїв заряду після виникнення контактної різниці потенціалів в області p - n -переходу. Для того щоб основні носії заряду (наприклад, електрони з n -області) могли пройти через область контакту, вони повинні подолати потенціальний поріг, зумовлений цією контактною різницею потенціалів.

Зрозуміло, що зробити це буде тим важче, чим більшою буде висота порогу. В той же час, неосновні носії (наприклад, дірки з p -області), які опиняються

поблизу p – n -переходу, "звалюються" з потенціального порогу в область з іншим типом провідності незалежно від висоти цього порогу! Таким чином, струм, зумовлений переходом через p – n -перехід неосновних носіїв (так званий *струм неосновних носіїв* I_0), не залежить від висоти потенціального порогу. Процес зростання висоти порогу під час дифузії носіїв через p – n -перехід припиниться, коли буде досягнута динамічна рівновага між кількістю переходів через p – n -перехід основних і неосновних носіїв заряду одного й того ж самого знаку (наприклад, електронів), тобто коли *струм основних носіїв* заряду $I_{\text{осн}}$ через p – n -перехід зрівняється зі струмом неосновних носіїв I_0 , який протікає у протилежному напрямку.

Приймаючи розподіл електронів за енергіями в зоні провідності близьким до розподілу Больцмана, $n = n_0 e^{-\frac{E}{kT}}$, де n – концентрація електронів у зоні провідності, n_0 – стала величина, E – енергія електрона, можна записати струм основних носіїв як $I_{\text{осн}} = A e^{-\frac{e\varphi_k}{kT}}$, де A – деяка стала величина, $e\varphi_k$ – висота потенціального порогу для електронів, k – стала Больцмана, T – температура.

3. Пряме та зворотне включення p – n -переходу. Рух основних та неосновних носіїв через p – n -перехід під дією прямої та зворотної напруги.

Якщо до p – n -переходу прикласти зовнішню різницю потенціалів (напругу) U , то вона змінить висоту потенціального порогу. Якщо напрям зовнішнього електричного поля збігається з напрямом електричного поля p – n -переходу, то висота потенціального порогу зростатиме, а якщо ж він буде протилежним, то висота порогу зменшуватиметься. Якщо висота потенціального порогу зменшується, то струм основних носіїв через p – n -перехід збільшується і кажуть, що зовнішня напруга U *прикладена в прямому напрямку* (при цьому "+" джерела напруги приєднано до p -області, а "-" джерела – до n -області). Зовнішнє поле виштовхує в область p – n -переходу негативно заряджені електрони з n -області та позитивно заряджені дірки з p -області.

Струм основних носіїв заряду при прикладанні зовнішньої напруги U до p – n -переходу дорівнює

$$I_{\text{осн}} = A e^{-\frac{e(U-\varphi_k)}{kT}},$$

Повний струм через p – n -перехід можна записати як алгебраїчну суму струмів основних та неосновних носіїв:

$$I = I_{\text{осн}} - I_0$$

де знак мінус означає, що ці струми течуть у протилежних напрямках.

Зрозуміло, що при $U = 0$, коли має місце вищезгадана динамічна рівновага, повний струм $I = 0$, тобто

$$I = Ae^{-\frac{e(U-\varphi_k)}{kT}} - I_0 = 0$$

Отже, повний струм через p – n -перехід дорівнює

$$I = I_0 \left[e^{-\frac{e(U-\varphi_k)}{kT}} - 1 \right] \quad (1)$$

Якщо до p – n -переходу прикласти зовнішню напругу у *зворотному напрямку* ($U < 0$) і збільшувати її, то струм основних носіїв прямуватиме до нуля і при достатньо великих значеннях зворотної напруги повний струм I (його ще називають *зворотним струмом*) буде повністю визначатися струмом неосновних носіїв і перестане залежати від U :

$$I \rightarrow I_0$$

Якщо ж до p – n -переходу прикласти зовнішню напругу у *прямому напрямку* ($U > 0$), то через p - n -перехід протікатиме повний струм I , який називають *прямим струмом*. При $eU \gg kT$ можна знехтувати одиницею в (6) (тобто струмом неосновних носіїв) і одержати експоненційну залежність повного струму I від зовнішньої напруги U :

$$I = I_0 e^{-\frac{eU}{kT}}$$

Прямий струм значно перевищує зворотний струм, який обмежений струмом неосновних носіїв I_0 . Така властивість p – n -переходу пропускати струм в одному напрямку, а саме при прикладанні до нього прямої напруги, зумовлює широке застосування діодів в електроніці й електротехніці.

4. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) випрямлювального діода, її залежність від температури. Застосування випрямлювальних діодів в техніці.

Струм I_0 залежить від температури та ширини забороненої зони напівпровідника:

$$I_0 = I_{00} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

де I_{00} – множник, який слабо залежить від температури.

Графіки вольт-амперної характеристики (ВАХ) діода, що описується

рівнянням (1), подані на рис. 5.1.

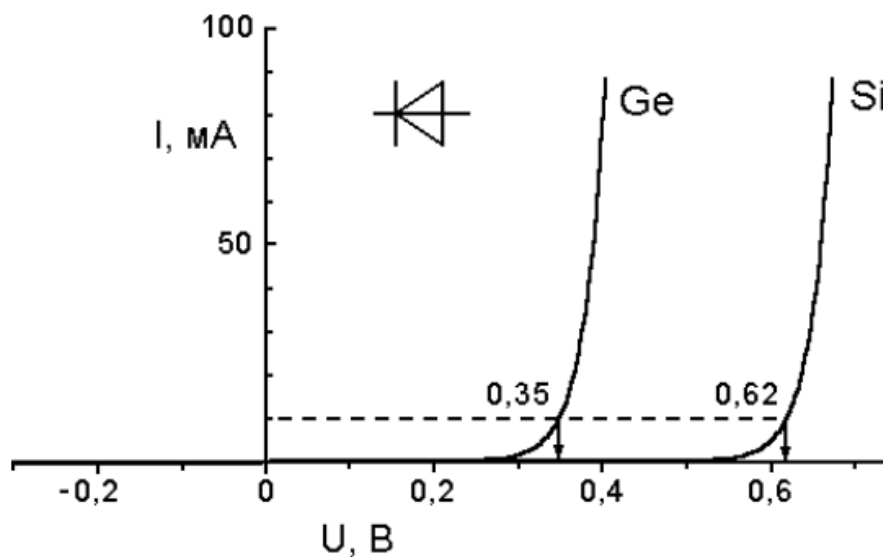


Рисунок 1.1. Вольт-амперні характеристики випрямлювальних діодів, виготовлених з германію і кремнію

Діоди, що мають таку ВАХ, називають *випрямлювальними* і використовують у пристроях випрямлення, обмеження, детектування. Найпотужніші з них здатні працювати при значеннях прямого струму до кількох тисяч ампер і витримувати без пробою зворотні напруги в десятки кіловольт.

5. Оборотний та необоротний електричний пробій p – n -переходу. ВАХ стабілітрона. Застосування стабілітронів.

При великих зворотних напругах p – n -перехід "пробивається" і через нього протікає дуже великий струм. Можливі зворотні і незворотні пробої. Оборотний пробій - це тип пробою, після якого p - n -перехід зберігає працездатність. Незворотний пробій веде до руйнування структури напівпровідника. Існують чотири типи пробою: лавинний, тунельний, теплоий та поверхневий. Лавинний і тунельний пробої об'єднуються під назвою - електричний пробій, який є оборотним. До необоротних відносять тепловий і поверхневий. Тунельний пробій відбувається в дуже тонких p - n -переходах, що можливо при дуже високій концентрації домішок, коли ширина переходу стає малою (близько 0,01 мкм) і при невеликих значеннях зворотної напруги (кілька вольт), коли виникає великий градієнт електричного поля. Високе значення напруженості електричного поля, впливаючи на атоми кристалічної решітки, підвищує енергію валентних електронів і призводить до їх тунельному «просочуванню» крізь «тонкий» енергетичний бар'єр (рис. 1.21) з валентної зони p -області в зону провідності

p -області. Причому «просочування» відбувається без зміни енергії носіїв заряду. Для тунельного пробою також характерний різкий ріст зворотного струму при практично незмінному зворотній напрузі. Пробій є відновлюваним, доки теплова потужність, розсіювана на p – n -переході, не перевищує припустимої, при якій відбувається його руйнування. Ця ділянка ВАХ, що відповідає зворотній напрузі, використовується на практиці в пристроях стабілізації напруги, а діоди, що мають таку ділянку, називають *стабілітронами* (англ. *Zener diode*). Напругу пробою можна регулювати технологічно (як правило, варіюванням концентрації домішок в p - і n -областях) в широких межах – від одиниць до сотень вольт.

6. Тунельний ефект. Енергетична діаграма та ВАХ тунельного діода. Застосування тунельних діодів

Якщо виготовити p – n -перехід з сильнолегованого напівпровідника (з великою концентрацією домішок), то перехід стане тонким і носії заряду зможуть "просочуватися" (тунелювати) через область p – n -переходу при прикладанні невеликої як зворотної, так і прямої напруги. Діоди з таким p – n -переходом називаються *тунельними*. ВАХ таких діодів поблизу початку координат ($U = 0$) являє собою відрізок прямої, тобто подібна до ВАХ звичайного резистора (рис 5.2). Важливою особливістю ВАХ тунельних діодів є наявність на її прямій гілці ділянки з від'ємним диференціальним опором: $r_{\text{диф}} = dU/dI < 0$ (пунктирна лінія на рис. 5.2), що дозволяє використовувати їх як підсилювачі та генератори електричних коливань надвисокочастотного діапазону (порядку 10^{10} Гц). Такі діоди використовуються також як швидкодіючі перемикачі, а також як елементи пам'яті в запам'ятовувальних пристроях з двійковим кодом.

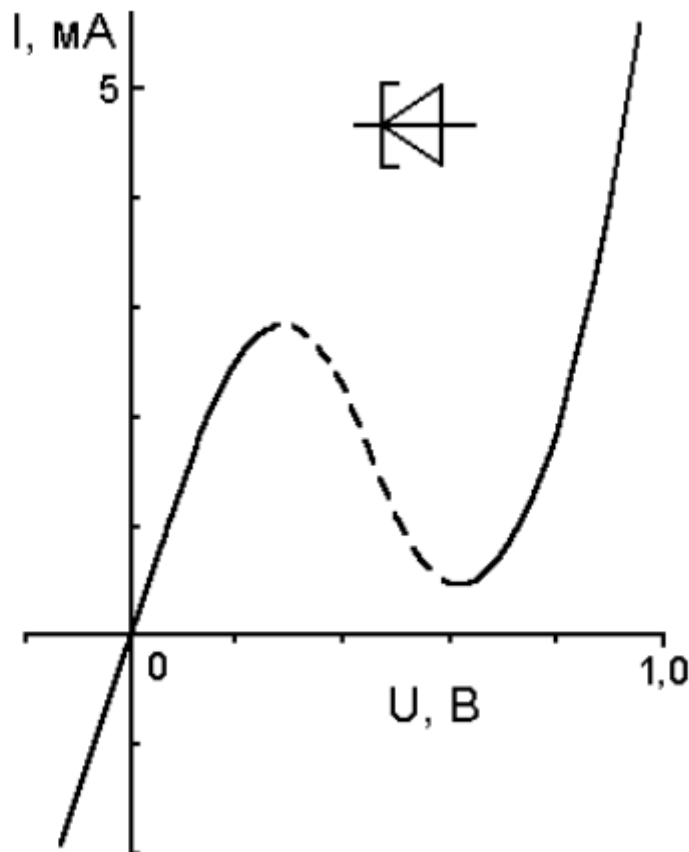


Рисунок 5.2. ВАХ тунельного діода. Пунктирною лінією показано ділянку ВАХ з від'ємним диференціальним опором.

7. Випромінювальна рекомбінація носіїв заряду в напівпровідниках.

Принцип роботи і застосування світлодіодів.

У будь-якому прямозміщеному (включеному в прямому напрямку) $p-n$ -переході при протіканні струму має місце рекомбінація носіїв заряду, в тому числі й випромінювальна, тобто з народженням фотонів. Випромінювально рекомбінує лише частина носіїв. І лише частина фотонів, уникнувши поглинання в самому діоді, може вийти назовні. Для створення практично придатного *світловипромінювального діоду (світлодіоду)* (англ. *light-emitting diode, LED*) необхідні матеріали з високою імовірністю випромінювальної рекомбінації. Якщо для випрямляючих діодів використовуються переважно германій Ge і кремній Si , то матеріалом для світлодіодів є арсенід галію $GaAs$, фосфід галію GaP і потрібні напівпровідникові сполуки на їх основі, а також карбід кремнію SiC . Сьогодні більш ефективними є світлодіоди, у яких використовуються не $p-n$ -переходи, а так звані *гетеропереходи* – переходи між двома напівпровідниковими матеріалами з різною шириною забороненої зони. Оскільки енергія фотонів випромінювання (колір свічення) близька до ширини забороненої зони напівпровідника, то на основі перелічених напівпровідникових матеріалів були створені світлодіоди, що випромінюють

у всій видимій, інфрачервоній та ближній ультрафіолетовій областях спектра (рис. 5.3).

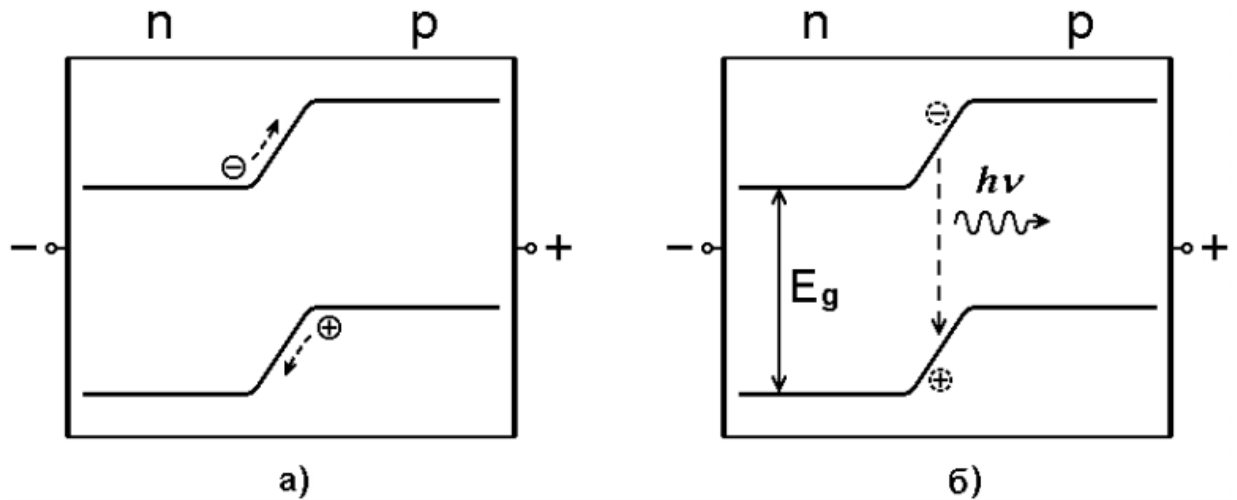


Рисунок 5.3. Принцип дії світлодіоду: а) рух основних носіїв до р–п-переходу при прикладанні прямої напруги, б) випромінювальна рекомбінація електрона і дірки в області р–п-переходу (енергія фотона, що при цьому з'являється, дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника: $h\nu = E_g$).

Останнім часом у різних системах освітлення все частіше використовуються білі світлодіоди, які за багатьма параметрами (світловіддача, економічність, довговічність, безпечність) переважають лампи розжарення. Існує три способи одержання білого світла від світлодіодів: 1) змішування випромінювання блакитних, зелених і червоних світлодіодів, щільно розміщених на одній матриці; 2) нанесення на поверхню ультрафіолетового світлодіоду трьох люмінофорів, що випромінюють відповідно блакитне, зелене та червоне світло; 3) нанесення на поверхню блакитного світлодіоду жовто-зеленого або одночасно зеленого та червоного люмінофорів (змішування двох або трьох випромінювань дають світло, близьке до білого). Шляхом поєднання гетеропереходів з р–п-переходами були створені *напівпровідникові лазери* (англ. *semiconductor laser*) – компактні джерела когерентного оптичного випромінювання з великим коефіцієнтом корисної дії. Якщо випромінювання світлодіоду направити на фотодіод, то ми отримаємо *оптопару* або *оптрон*. У такій оптопарі здійснюється перетворення електричної енергії в енергію оптичного випромінювання (світлодіод) та перетворення енергії випромінювання знову в електричну енергію (фотодіод). Оптопари використовують для зв'язку окремих частин електронних пристроїв (головним чином, в обчислювальній та вимірювальній техніці й автоматичі), чим одночасно забезпечується

електрична розв'язка між ними, а також для безконтактного керування електричними колами (подібно до реле).

8. Внутрішній фотоелектричний ефект у напівпровідниках. Принцип роботи і застосування фотодіодів. Сонячні батареї.

Будь-якого носія заряду, електрона чи дірки, народженого в області дії поля контактної різниці потенціалів, буде відразу підхоплено цим електричним полем і виштовхнуто: електрона – в n -область, дірку – в p -область. Якщо такі електрон і дірка виникли під дією кванта світла (фотона) з енергією, більшою за ширину забороненої зони, то з ними відбудеться теж саме. Це є явищем фотоелектричного ефекту у p - n -переході. На ньому ґрунтується принцип дії *фотодіода*, тобто пристрою, що здійснює пряме перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну (рис. 5.4.). При опроміненні фотодіода світлом збільшується струм неосновних носіїв через p - n -перехід і змінюється його ВАХ, що й показано на рис. 5.5.

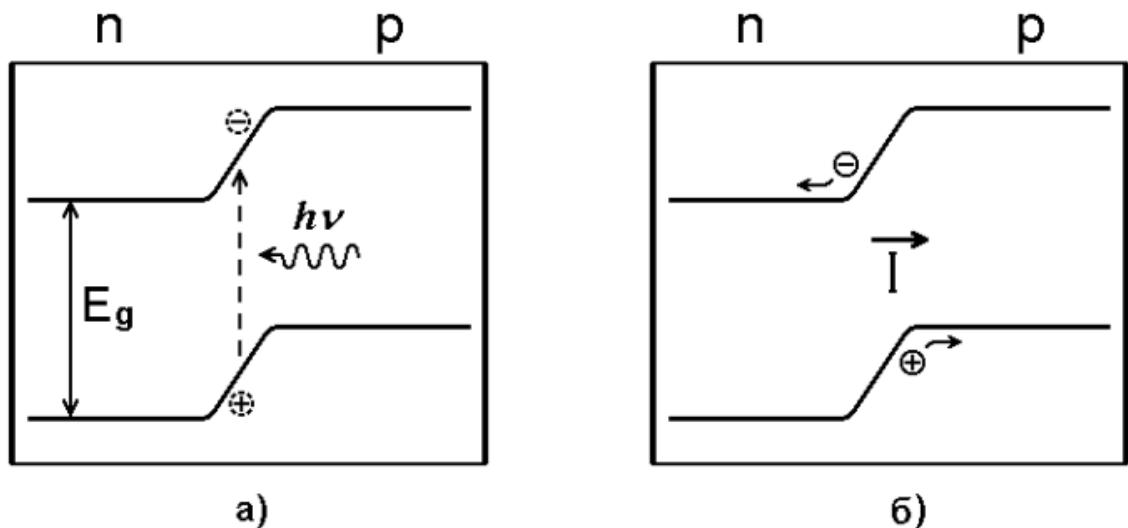


Рисунок 5.4. Принцип дії фотодіода: а) поглинання фотона в області p - n -переходу й утворення електронно-діркової пари, б) рознесення електрона й дірки в різні боки електричним полем p - n -переходу (виникнення струму).

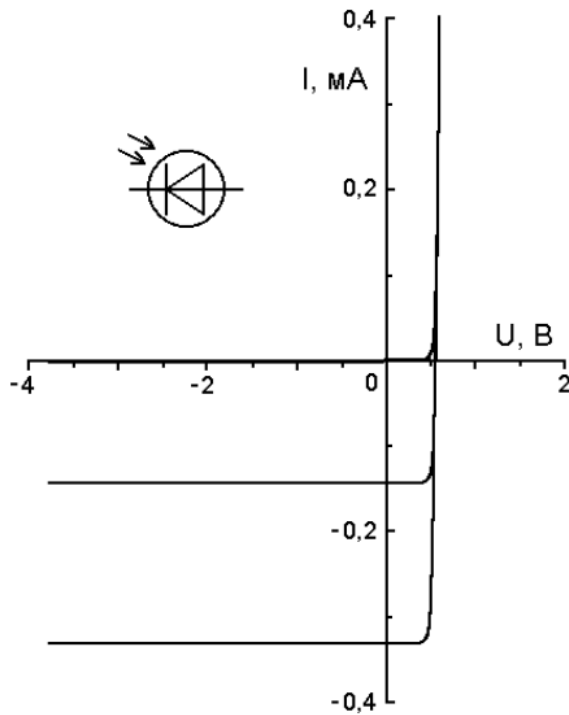


Рисунок 5.5. Вольт-амперні характеристики фотодіода. Збільшення інтенсивності світла, що потрапляє на фотодіод, призводить до зсуву усієї ВАХ вниз.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до практикуму «Основи радіоелектроніки» для студентів фізичного факультету / Упоряд. О.В.Слободянюк,
2. Ю.О.Мягченко, В.М.Кравченко.- К.: Поліграфічний центр «Принт лайн», 2007.- 120 с.
3. Ю.О. Мягченко, Ю.М. Дулич, А.В.Хачатрян “Вивчення радіоелектронних схем методом комп’ютерного моделювання” : Методичне видання. – К.: 2006.- с.
4. <http://um.co.ua/8/8-5/8-59953.html>