

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
Напівпровідникові діоди

Качур Артем

23 квітня 2021 р.

Зміст

1	Реферат	3
2	Вступ	4
3	Дослідження напівпровідникових діодів	5
3.1	Теоретична частина	5
3.2	Моделювання в LTspice	13
4	Висновок	16

1 Реферат

Звіт про виконання лабораторної роботи: 17 с., 4 ч., 15 рис.

Об'єкт дослідження – процеси проходження струму напівпровідникові діоди.

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

Методи дослідження:

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 , що відповідають певним значенням та полярності напруги U , і подання результатів вимірів у вигляді графіка.

2 Вступ

Ця лабораторна робота присвячена вивченню властивостей напівпровідникових діодів – найпростіших нелінійних елементів електронних схем та вимірюванню їх вольт-амперних характеристик.

Напівпровідниковий діод (англ. *semiconductor diode*) – це напівпровідниковий прилад з одним р-п-переходом і двома виводами.

р-п-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 р-п-перехід діода від величини і полярності прикладеної до діода напруги U_d

!!!!!!Характеріограф – 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 .

3 Дослідження напівпровідникових діодів

3.1 Теоретична частина

Процеси, які відбуваються в області р-п-переходу, є досить складними, проте основні його властивості можна зрозуміти, розглянувши наступну спрощену модель.

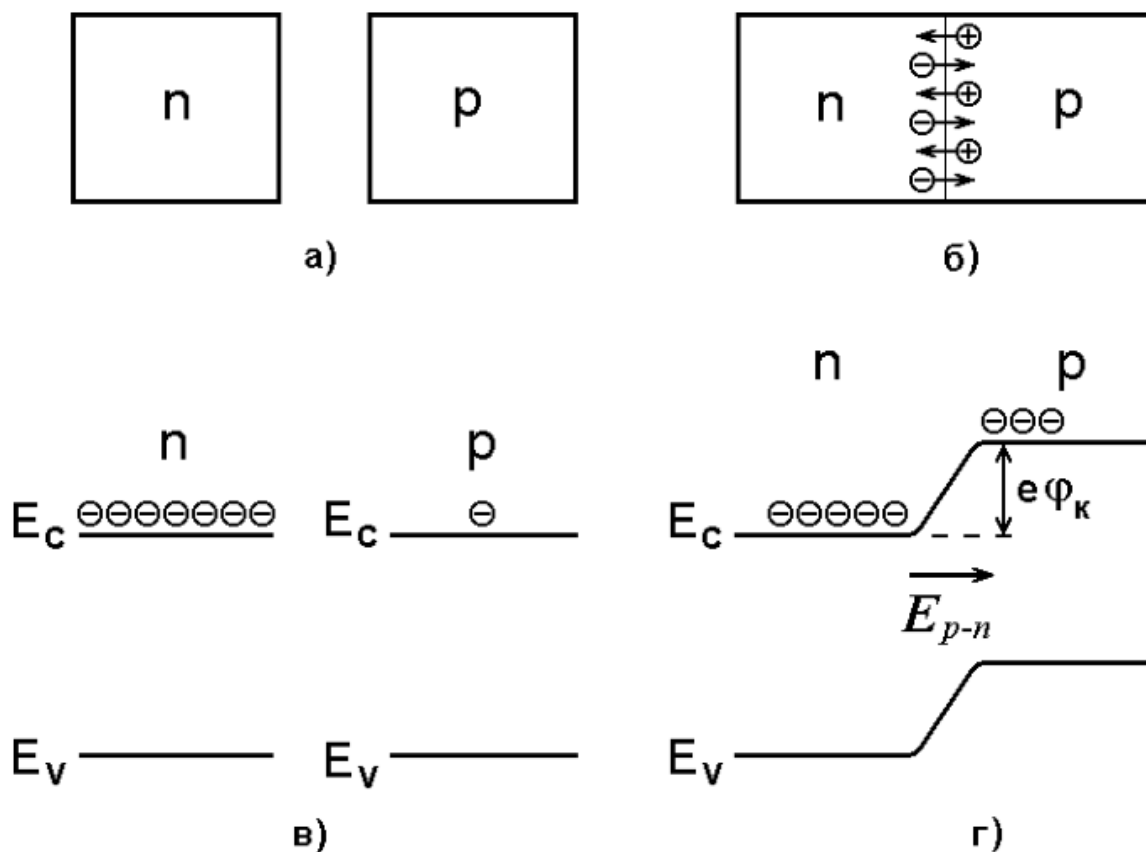


Рис. 1. Утворення контактної різниці потенціалів φ_k на межі поділу напівпровідників n- і р-типу (в області р-п-переходу): а) і в) – напівпровідники n- і р-типу до утворення контакту між ними та відповідні енергетичні діаграми для електронів; б) і г) утворення контакту між напівпровідниками n- і р-типу та відповідна енергетична діаграма для електронів

озглянемо роботу р-п-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 E_{p-n} . На Рис. 1 утворення контактної різниці потенціалів ілюструється енергетичною діаграмою для електронів.

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 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, $n = n_0 \exp(-\frac{E}{kT})$, де n – концентрація електронів у зоні провідності, n_0 – стала величина, E – енергія електрона, можна записати струм основних носіїв як

$$I = A \exp(-\frac{e\varphi_k}{kT}), \quad (1)$$

де A – деяка стала величина, $e\varphi_k$ – висота потенціального порогу для електронів, k – стала Больцмана, T – температура.

На Рис. 1 показано дифузії основних носіїв заряду (електронів з n -області та дірок з p -області) через область контакту, яка супроводжується виникненням електричного поля p - n -переходу просторовою координату.

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 (Рис. 2). 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.

Стрілками також показані напрямки і величини повного струму I через p - n -перехід. На Рис. 1 показано зміну висоти потенціального порогу при прикладанні до p - n -переходу прямої і зворотної напруги U відповідно.

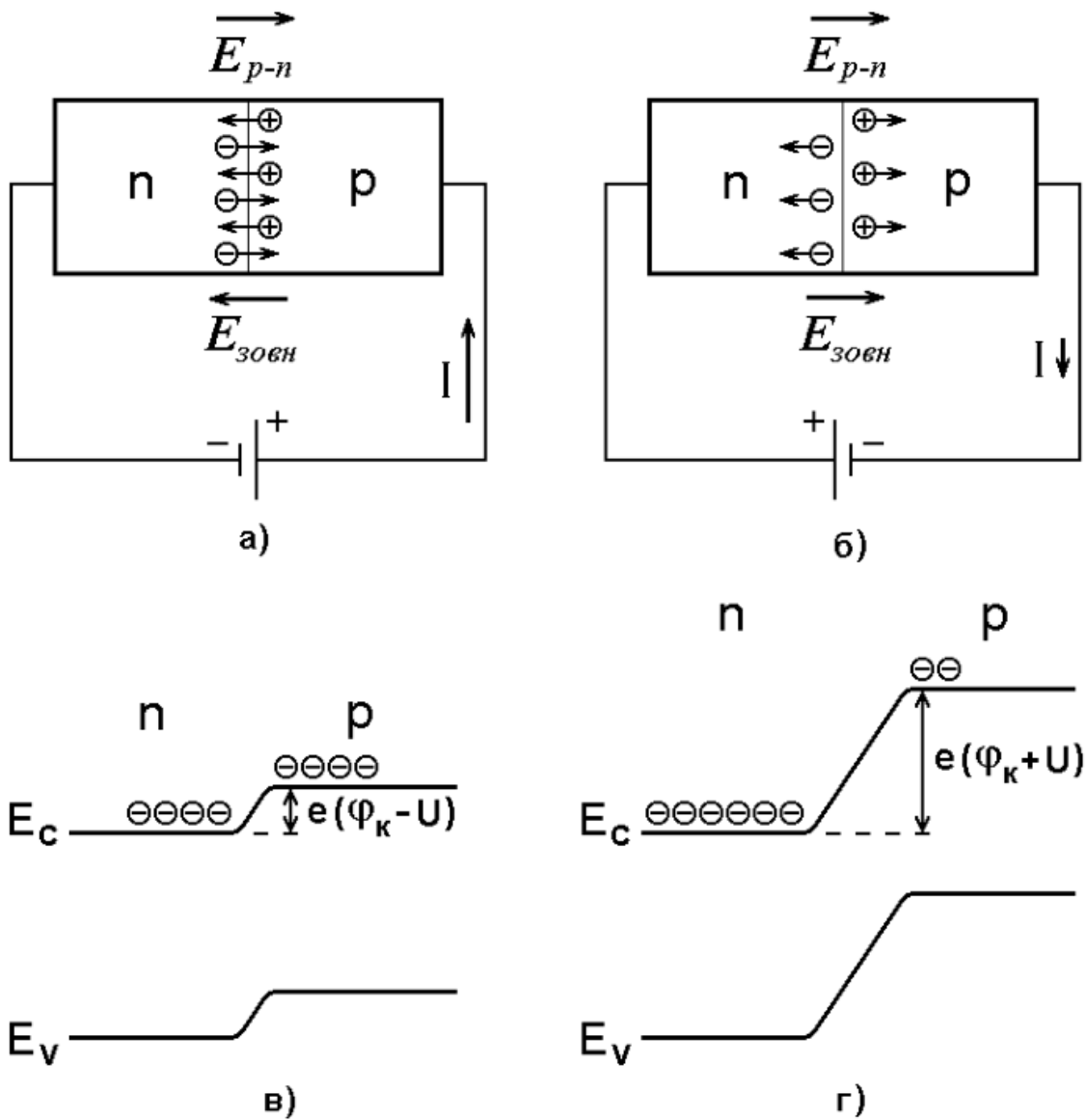


Рис. 2. Підключення зовнішньої напруги до р-п-переходу у прямому (а) і зворотному (б) напрямках. Стрілками показані напрямки електричного поля р-п-переходу E_{p-n} і зовнішнього поля $E_{зовн}$, яке виникає внаслідок підключення до р-п-переходу зовнішнього джерела напруги.

Струм основних носіїв заряду при прикладанні зовнішньої напруги U до р-п-переходу дорівнює

$$I_{\text{осн}} = A \exp\left(-\frac{e(U - \varphi_k)}{kT}\right) \quad (2)$$

Повний струм через р-п-перехід можна записати як алгебраїчну суму струмів основних та неосновних носіїв:

$$I = I_{\text{осн}} - I_0 \quad (3)$$

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

На Рис. 3 подані графіки залежності струмів $I_{\text{осн}}$, I_0 та I від прикладеної до $p\tilde{n}$ -переходу напруги U .

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

$$I = A \exp(-\frac{e\varphi_k}{kT}) - I_0 = 0, \quad (4)$$

звідки маємо

$$A = I_0 \exp(\frac{e\varphi_k}{kT}), \quad (5)$$

Отже, повний струм через $p\tilde{n}$ -перехід дорівнює

$$I = I_0 (\exp(\frac{eU}{kT}) - 1). \quad (6)$$

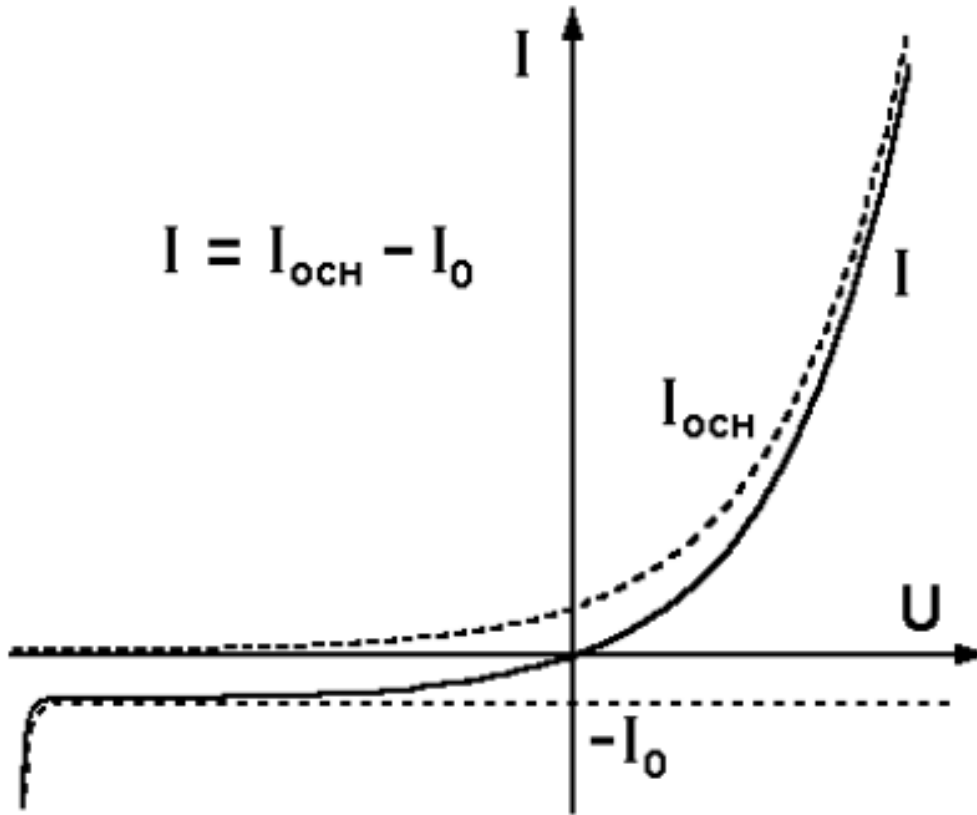


Рис. 3. Залежність струмів $I_{\text{осн}}$, I_0 та I від прикладеної до $p\tilde{n}$ -переходу напруги U .

Якщо до $p\tilde{n}$ -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 :

$$I \rightarrow -I_0. \quad (7)$$

Якщо ж до $p\text{-}n$ -переходу прикласти зовнішню напругу у прямому напрямку ($U > 0$), то через $p\text{-}n$ -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 :

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right). \quad (8)$$

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

Струм I_0 залежить від температури та ширини забороненої зони напівпровідника:

$$I_0 = I_{00} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right), \quad (9)$$

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

Графіки вольт-амперної характеристики (ВАХ) діода, що описується рівнянням (6), подані на Рис. 4. Діоди, що мають таку ВАХ, називають випрямлювальними (англ. rectifier diode) і використовують у пристроях випрямлення, обмеження, детектування. Найпотужніші з них здатні працювати при значеннях прямого струму до кількох тисяч ампер і витримувати без пробію зворотні напруги в десятки кіловольт.

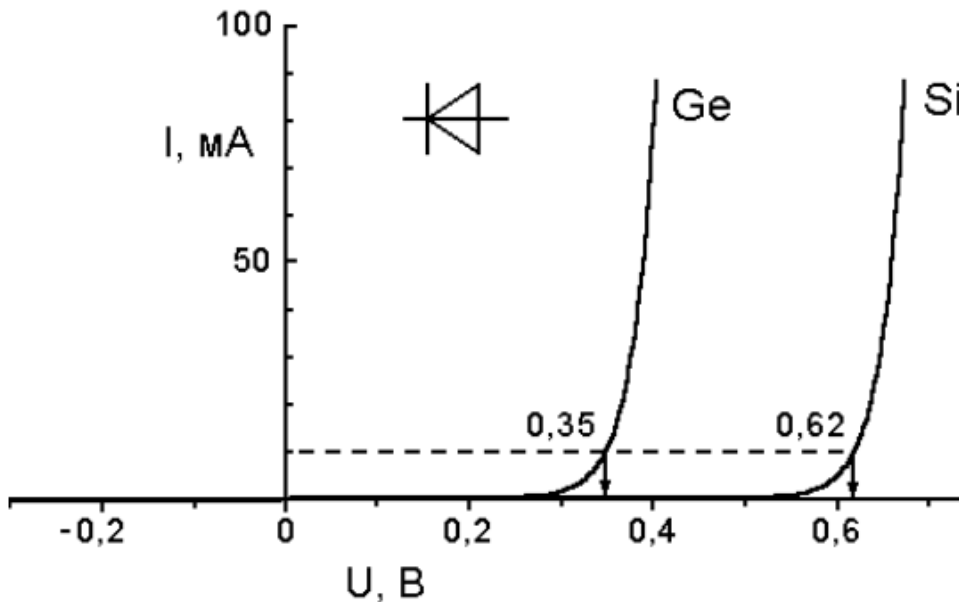


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики випрямлювальних діодів, виготовлених з германію і кремнію.

При великих зворотних напругах $p\text{-}n$ -перехід "пробивається" і через нього протікає дуже великий струм. Існує три основних механізми пробією: теплова нестійкість (розігрівання $p\text{-}n$ -переходу при протіканні зворотного струму), тунельний ефект ("просочування" основних носіїв через $p\text{-}n$ -перехід у сильному електричному полі) і лавинне розмноження носіїв (явище, подібне до ударної іонізації газу). Пробій є відновлюваним, доки теплова потужність, розсіювана на $p\text{-}n$ -переході, не перевищує припустимої, при якій відбувається його руйнування. Ця ділянка ВАХ, що відповідає зворотній напрузі (Рис. 5), використовується на практиці в пристроях стабілізації напруги, а діоди, що мають таку ділянку, називають стабілітронами (англ. Zener diode). Напругу пробією можна регулювати технологічно (як правило, варіюванням концентрації домішок в p - і n -областях) в широких межах – від одиниць до сотень вольт. Для стабілізації напруги використовується і вертикальна ділянка ВАХ в прямому напрямку. Загальна назва напівпровідникових приладів, які стабілізують напругу вищезгаданим чином – це опорні діоди (англ. voltage- reference diode). Основною характеристикою опорних діодів, яка впливає на їх здатність стабілізувати напругу, є диференціальний опір $r_{\text{диф}} = dU/dI$. Він вимірюється на спадаючій чи зростаючій ділянках характеристики. В обох випадках $dU/dI > 0$.

Будь-якого носія заряду, електрона чи дірку, 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. На цьому ґрунтується принцип дії фотодіода (англ. photodiode), тобто пристрою, що здійснює пряме перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну (Рис. 6). При опроміненні фотодіода світлом збільшується струм неосновних носіїв через $p\text{-}n$ -перехід і змінюється його ВАХ, що й показано на Рис. 7.

У будь-якому прямозміщеному (включеному в прямому напрямку) $p\text{-}n$ -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 діода (світлодіода) (англ. light-emitting diode, LED) необхідні матеріали з високою імовірністю випромінювальної рекомбінації. Якщо для випромінювальних 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 $p\text{-}n$ -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. 8).

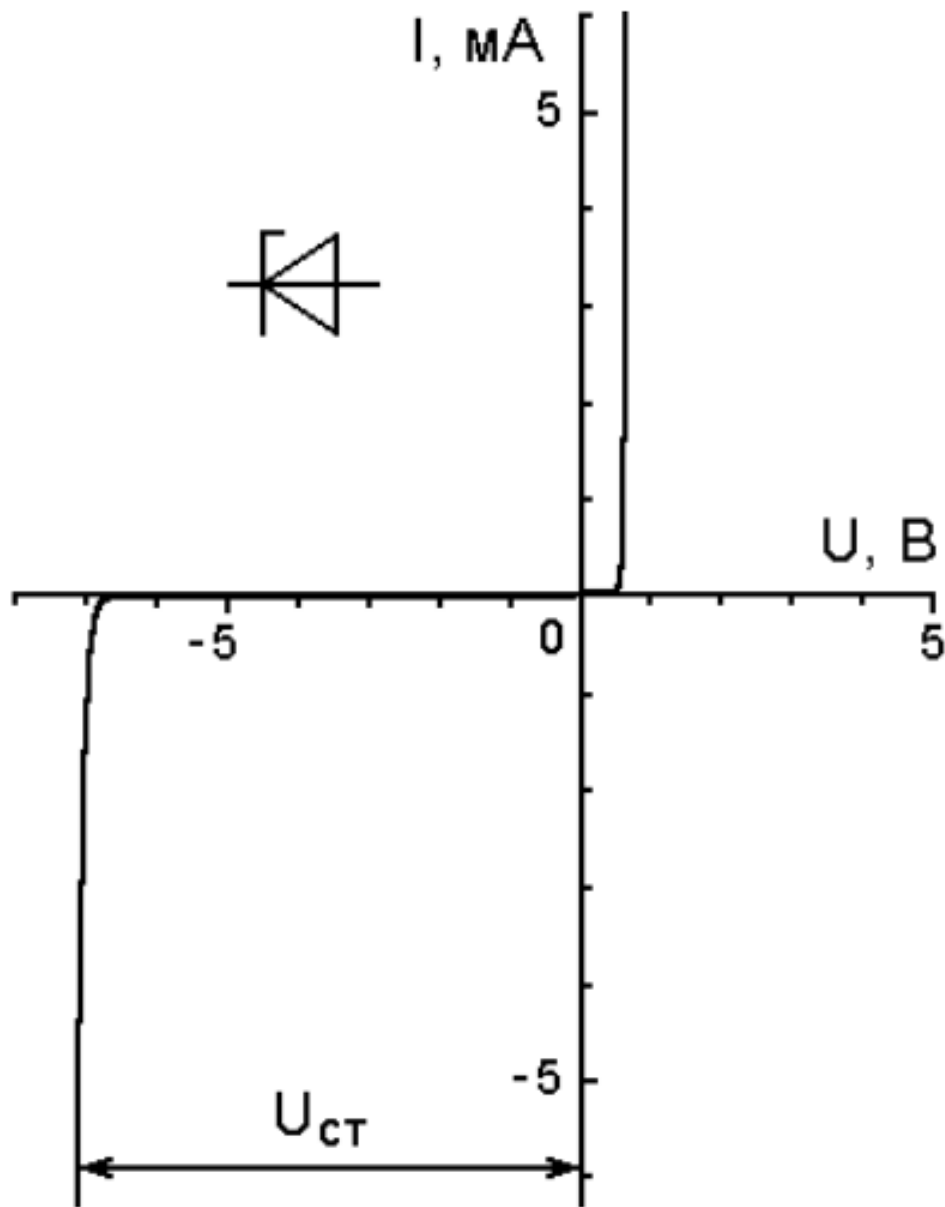


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика напівпровідникового стабілітрона.

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 світлодіода трьох люмінофорів, що випромінюють відповідно блакитне, зелене та червоне світло; 3) нанесення на поверхню блакитного світлодіода жовто-зеленого або одночасно зеленого та червоного люмінофорів (змішування двох або трьох випромінювань дають світло, близьке до білого).

Шляхом поєднання гетеропереходів з $p\text{-}n$ -переходами були створені напівпровід-

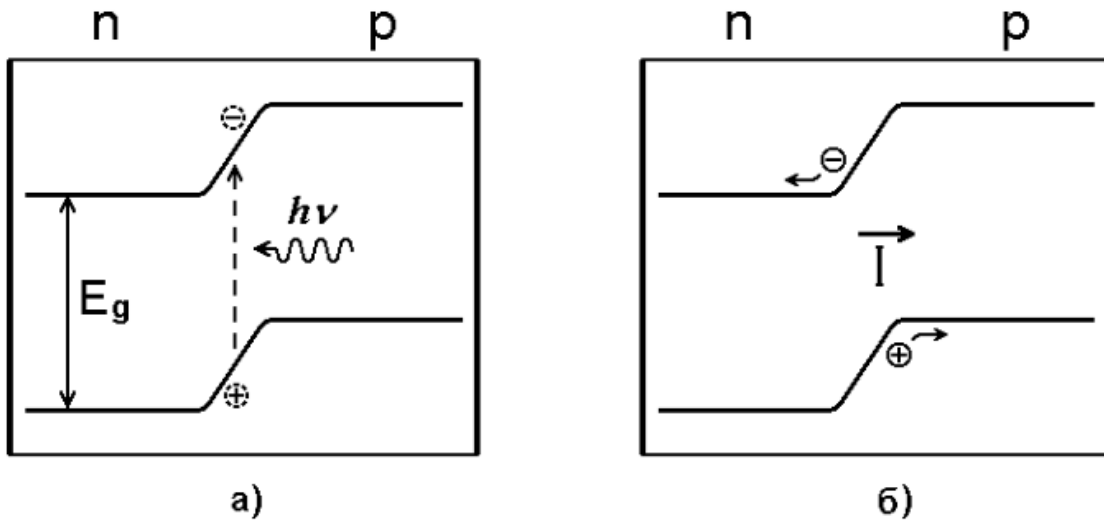


Рис. 6. Принцип дії фотодіода: а) поглинання фотона в області р-п-переходу й утворення електронно-діркової пари, б) рознесення електрона й дірки в різні боки електричним полем р-п-переходу (виникнення струму).

никові лазери (англ. semiconductor laser) – компактні джерела когерентного оптичного випромінювання з великим коефіцієнтом корисної дії.

Якщо випромінювання світлодіода направити на фотодіод, то ми отримаємо оптичну пару або оптрон. У такій оптичній парі (англ. optoelectronic couple, optical coupler) здійснюється перетворення електричної енергії в енергію оптичного випромінювання (світлодіод) та перетворення енергії випромінювання знову в електричну енергію (фотодіод). Оптичні пари використовують для зв'язку окремих частин електронних пристроїв (головним чином, в обчислювальній та вимірювальній техніці й автоматичній), чим одночасно забезпечується електрична розв'язка між ними, а також для безконтактного керування електричними колами (подібно до реле).

Якщо виготовити р-n-перехід з сильнолегованого напівпровідника (з великою концентрацією домішок), то перехід стане тонким і носії заряду зможуть "просочуватися" (тунелювати) через область р-n-переходу при прикладанні невеликої як зворотної, так і прямої напруги. Діоди з таким р-n-переходом називаються тунельними (англ. tunnel diode). ВАХ таких діодів поблизу початку координат ($U = 0$) являє собою відрізок прямої, тобто подібна до ВАХ звичайного резистора (Рис. 9). Важливою особливістю ВАХ тунельних діодів є наявність на її прямій гілці ділянки з від'ємним диференціальним опором: $r = dU/dI < 0$ (пунктирна лінія на Рис. 9), що дозволяє використовувати їх як підсилювачі та генератори електричних коливань надвисокочастотного діапазону (до десятків гігагерц). Такі діоди використовуються також як швидкодійні перемикачі, а також як елементи пам'яті в запам'ятовувальних пристроях з двійковим кодом. Принцип дії тунельного діода добре описаний у багатьох підручниках.

Перелічені різновиди діодів не вичерпують усього різноманіття наявних конструкцій і їх застосувань. Кожен з видів має специфічну вольт-амперну характеристику, яка дозволяє використовувати його за певним призначенням. Мета цієї лабораторної роботи – вивчення ВАХ різних діодів і визначення деяких параметрів, пов'язаних з їх конкретним використанням.

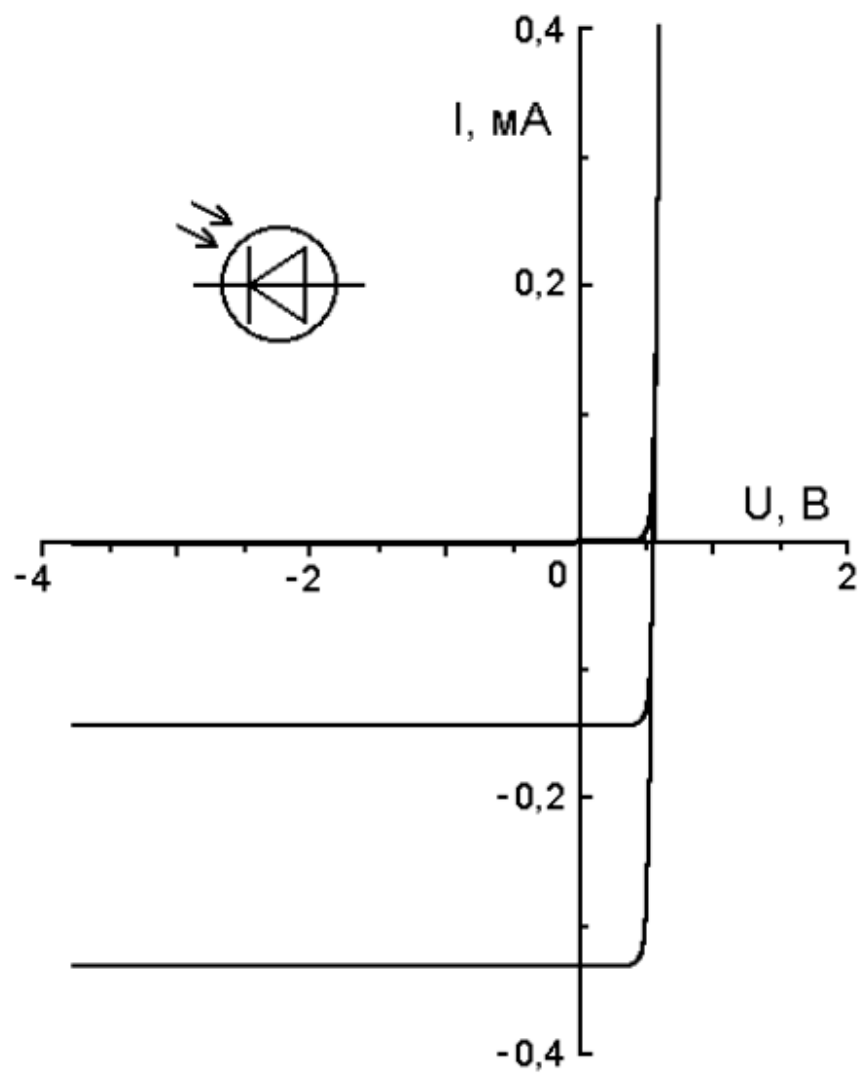


Рис. 7. Вольт-амперні характеристики фотодіода. Збільшення інтенсивності світла, що потрапляє на фотодіод, призводить до зсуву усієї ВАХ вниз.

3.2 Моделювання в LTspice

Зкомпонуємо схеми отримаємо ВИХи.

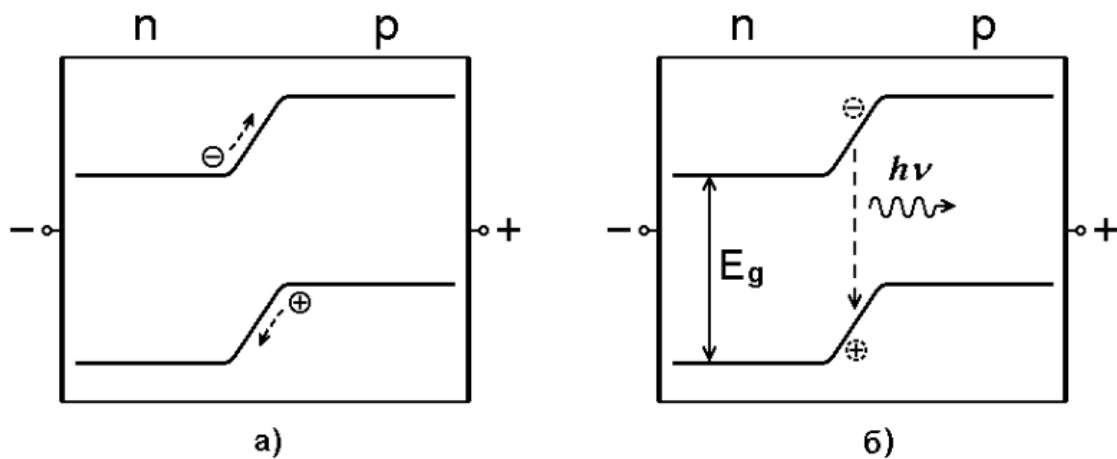


Рис. 8. Принцип дії світлодіода: а) рух основних носіїв до р-п-переходу при прикладанні прямої напруги, б) випромінювальна рекомбінація електрона і дірки в області р-п-переходу (енергія фотона, що при цьому з'являється, дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника: $h\nu = E_g$).

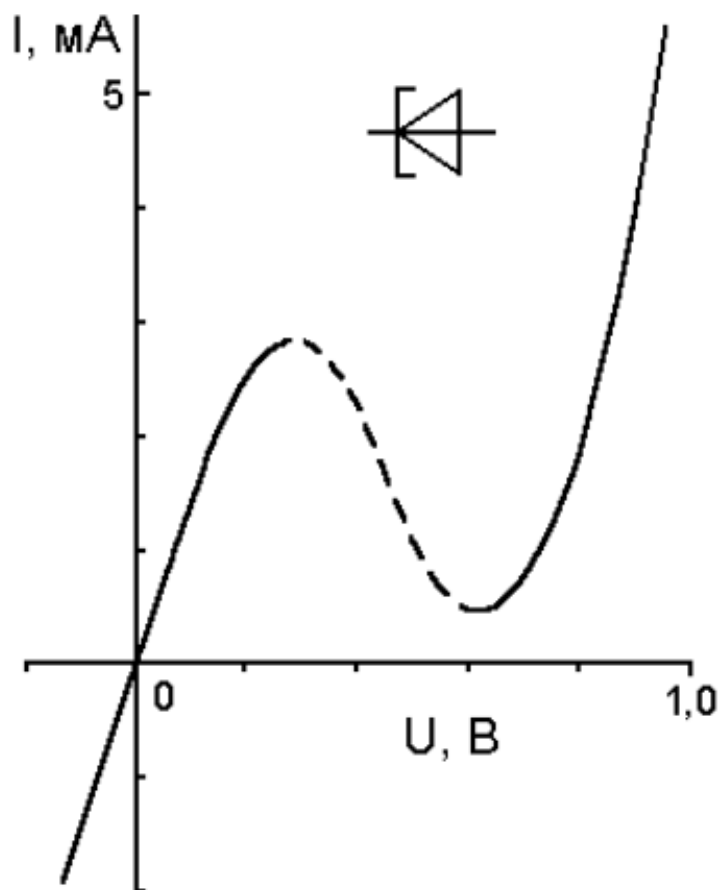


Рис. 9. Вольт-амперна характеристика тунельного діода. Пунктирною лінією показано ділянку ВАХ з від'ємним диференціальним опором.

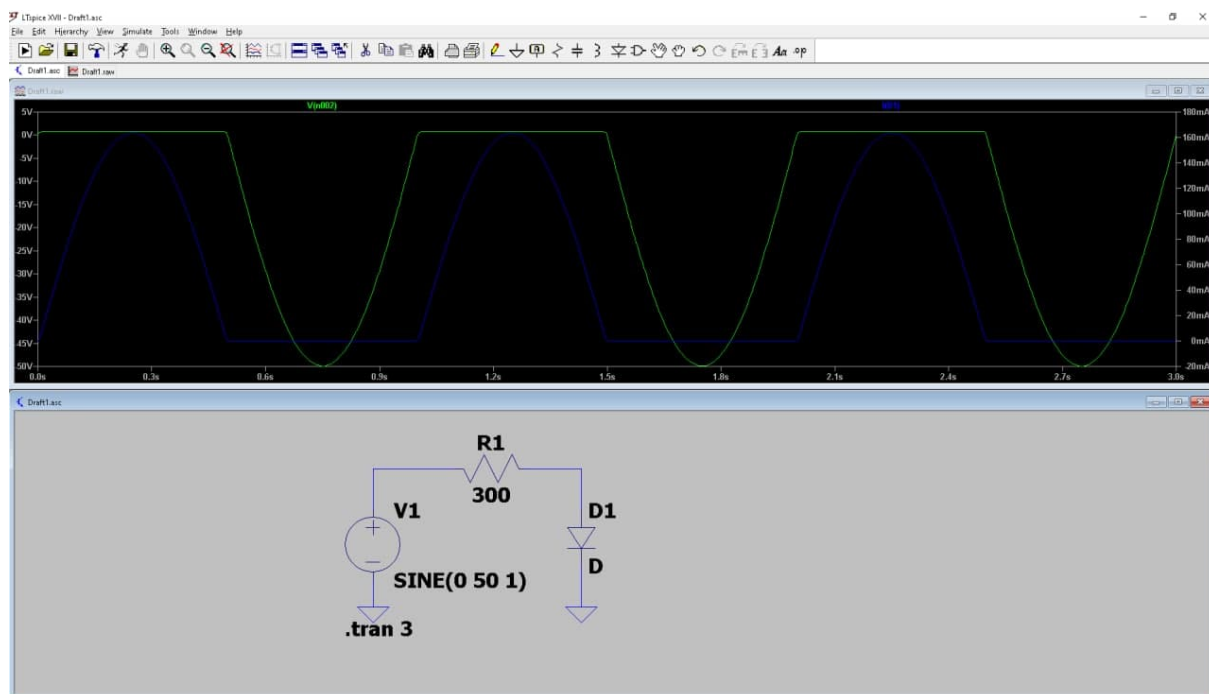


Рис. 10. Звичайний діод

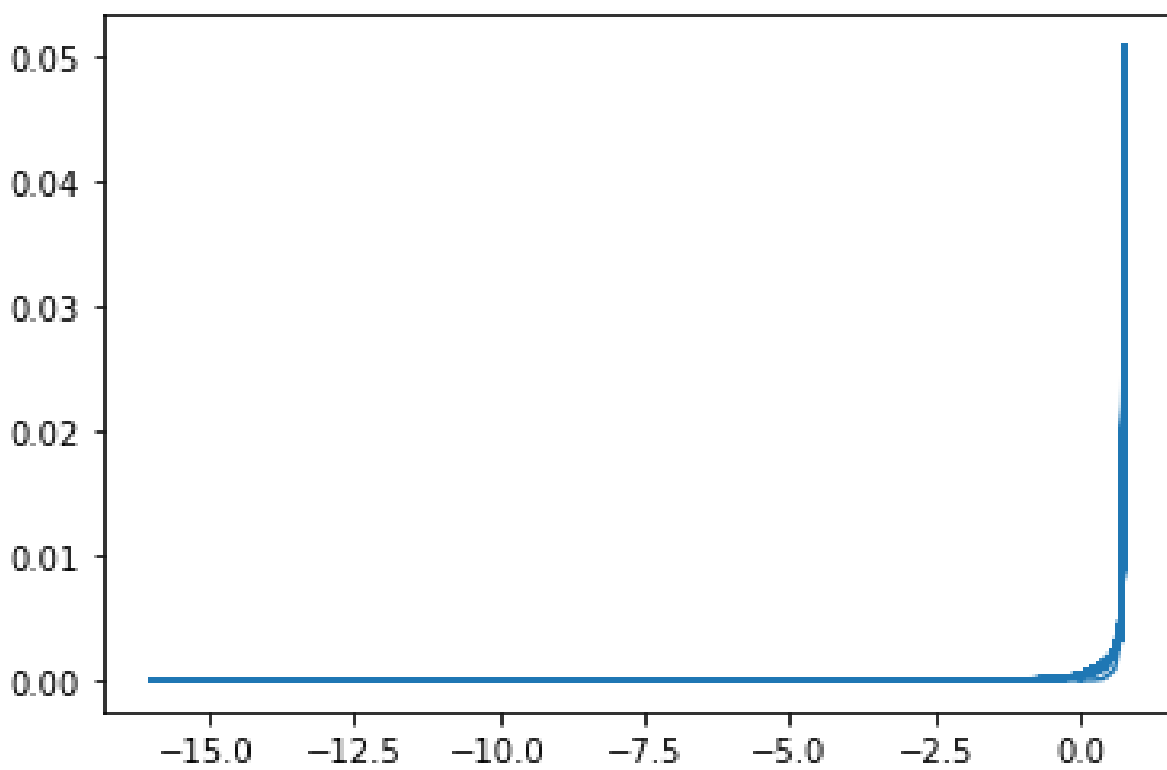


Рис. 11. Вольт-амперна характеристика діода.

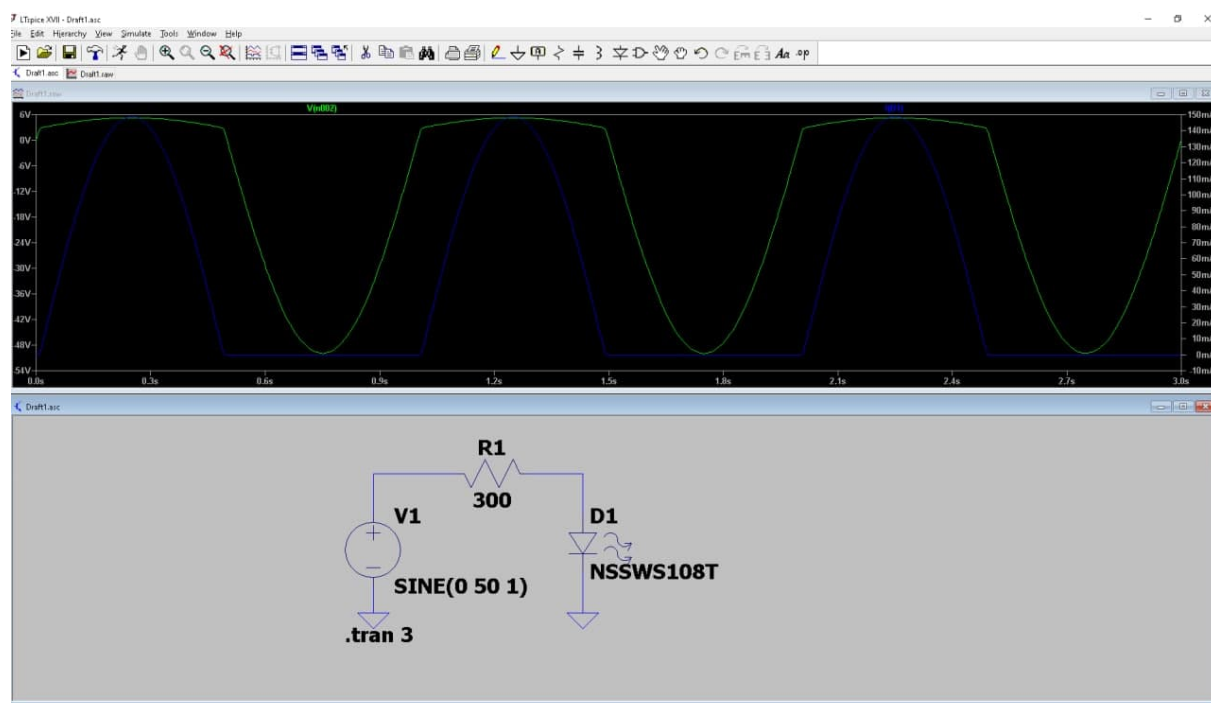


Рис. 12. LED

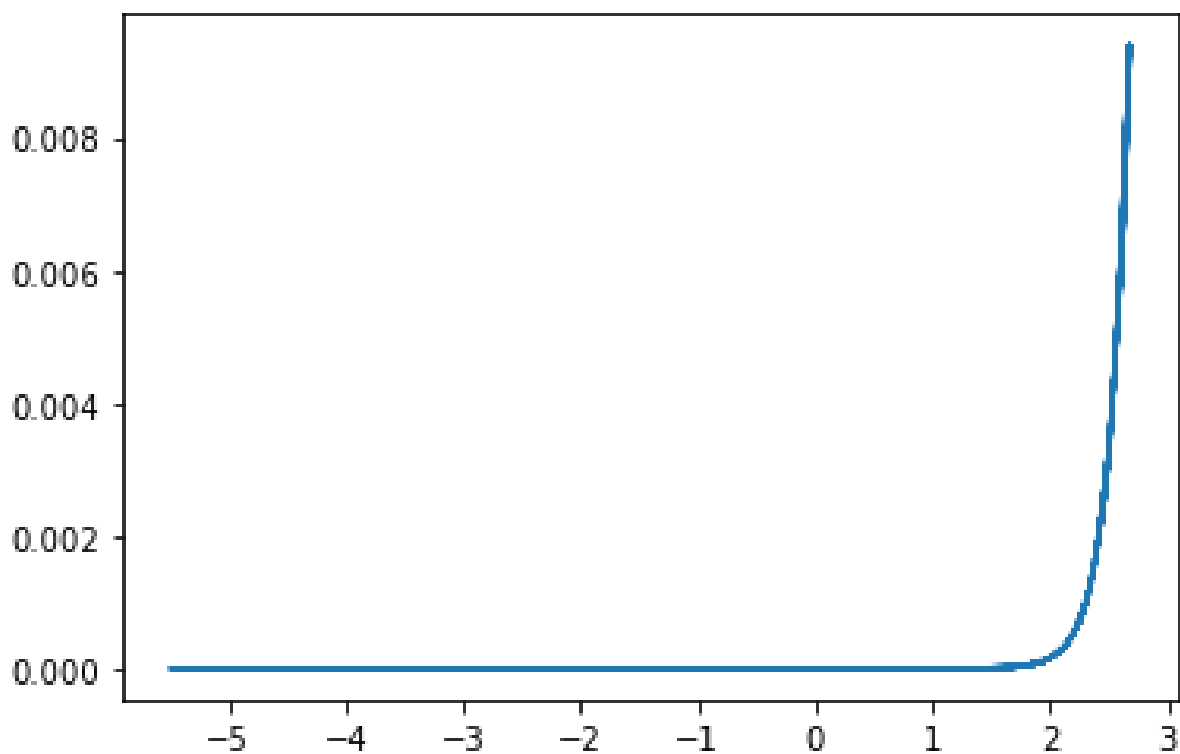


Рис. 13. Вольт-амперна характеристика LED діода.

4 Висновок

В ході роботи я навчився отримувати ВАХ діодів, дослідив характеристики діодів.

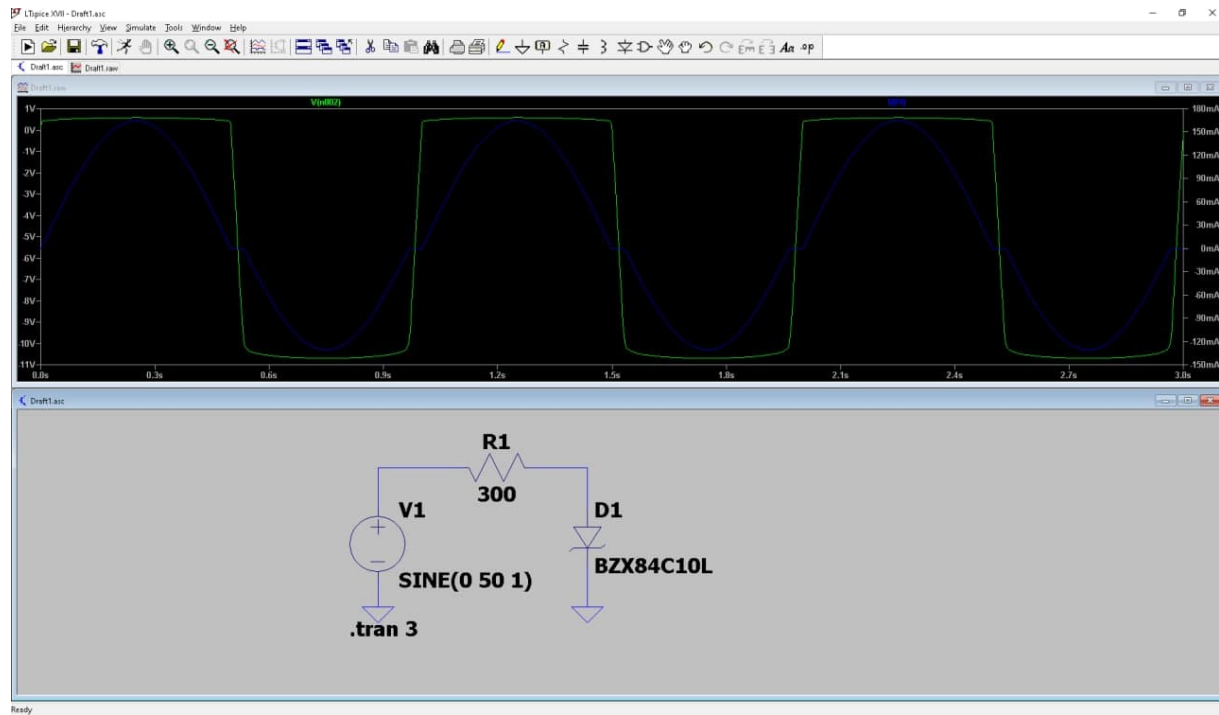


Рис. 14. Zener

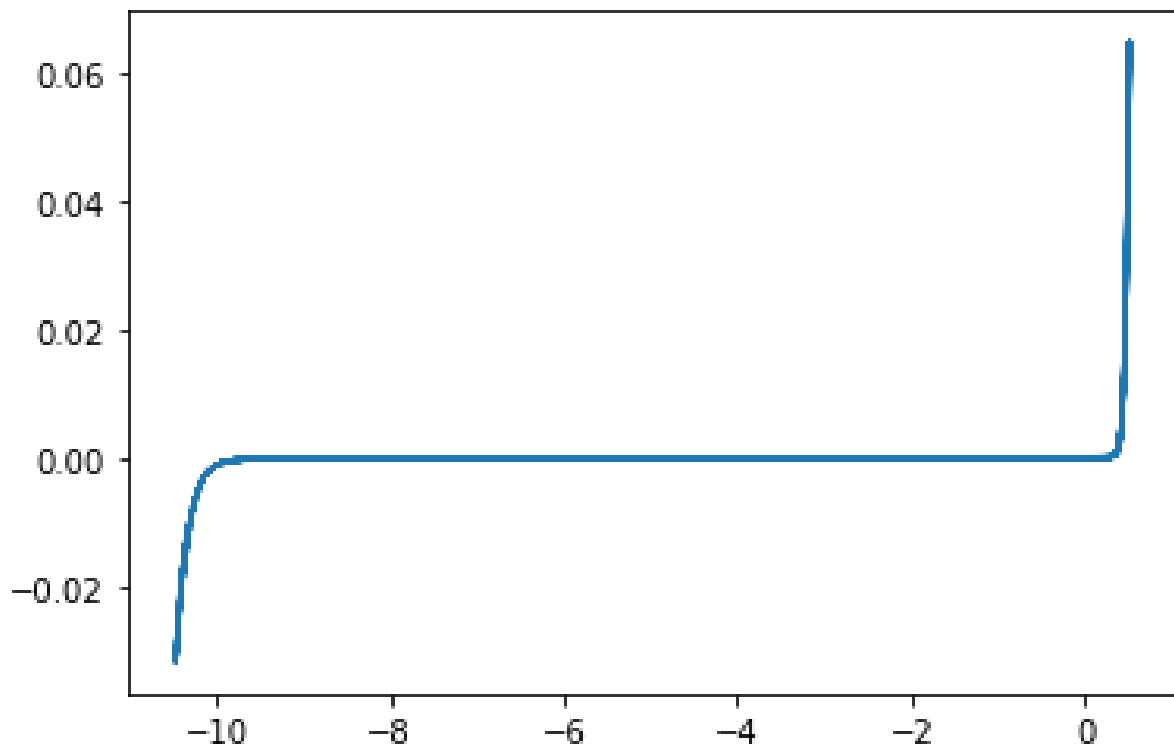


Рис. 15. Вольт-амперна характеристика Zener діода.