

**Цей файл створений для написання контрольної роботи з
Твердотільної електроніки.**

27. Які домішки в напівпровідниках називають донорами?

Донорами називають домішки, що сприяють збільшенню концентрації електронів, тобто такими, що віддають носії.

26. Що таке легування?

Технологічні процеси введення домішок називають легуванням, а одержувані при цьому матеріали — леггованими.

1. На які групи поділяють речовини по їх здатності проводити електричний струм?

Для застосування в електроніці будь-якої речовини насамперед важлива його здатність проводити електричний струм. В залежності від цієї здатності речовини розділяють на провідники, напівпровідники та діелектрики.

2. Що таке питома електрична провідність чи електропровідність?

Електропровідність (електрична провідність) — властивість речовини пропускати електричний струм під дією електричного поля, яке не змінюється з часом, а також фізична величина, що кількісно характеризує цю властивість. Обернена величина електропровідності — електричний опір.

3. Як кількісно відрізняються провідності провідників, напівпровідників і діелектриків?

Для кількісної оцінки цієї здатності вводять величину питомої електричної провідності чи електропровідності σ . Провідність σ і питомий опір речовини ρ — обернені величини один одному

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

До провідників відносяться речовини з провідністю $\sigma > 10^4$ См/см *.

Речовини, для яких $\sigma < 10^{-10}$ См/см, вважають діелектриками. Напівпровідники займають проміжне положення. Їх питома провідність знаходиться в межах $10^{-10} \dots 10^4$ См/см.

4. Які відмітні ознаки напівпровідників, крім провідності?

Крім величини провідності, у напівпровідників є ще ряд характерних відмінних ознак:

- сильна залежність провідності від температури, при цьому з підвищенням температури провідність збільшується, а у провідників — зменшується;
- залежність провідності від різного роду зовнішніх впливів (освітлення, іонізуючого випромінювання, і т.п.); провідники до таких впливів практично не чуттєві;
- висока чутливість до чужорідних домішок; при введенні домішок у напівпровідники, їх провідність, як правило, зростає, а у провідників — зменшується.

8. Яку енергетичну зону називають "валентною"?

Дозволена зона, у якій знаходяться валентні електрони, називається валентною зоною. Валентна зона — це сукупність дозволених рівнів валентних електронів, що займають свої місця в ковалентних зв'язках між атомами кристалічної решітки. Число дозволених рівнів у цій зоні цілком відповідає числу валентних електронів. Залежно від структури атома валентна зона може бути заповненою або незаповненою.

9. Яку енергетичну зону називається "зоною провідності"?

Зоною провідності називають зону, яка являє собою сукупність дозволених рівнів, що можуть бути зайняті електронами, які перейшли в простір між вузлами решітки, тобто після розриву ковалентних зв'язків. Оскільки такі електрони можуть брати участь в електропровідності, звідси і впливає назва зони провідності.

10. Яку енергетичну зону називають "забороненою зоною"?

Забороненою зоною називають зону, що розділяє собою валентну зону та зону провідності.

11. Яку частину енергетичного спектра називають "зонною діаграмою"?

Зонною діаграмою називають графічне представлення трьох зон — валентної зони, зони провідності та забороненої. Найважливішими параметрами зонної діаграми є верхній рівень ("стеля") валентної зони W_B , нижній рівень ("дно") зони провідності W_{Π} , а також ширина забороненої зони $\Delta W_z = W_{\Pi} - W_B$.

12. У якій зоні повинен знаходитися електрон для того, щоб він міг брати участь в електропровідності?

Для того, щоб електрон брав участь у створенні електричного струму, він повинен знаходитися в дозволений зоні з вільними рівнями.

14. Поясніть за допомогою зонної діаграми, чому при $T = 0\text{K}$ напівпровідник поводить себе як ізолятор?

Зонна діаграма напівпровідників відрізняється тим, що валентна зона та зона провідності відділені одна від одної забороненою зоною шириною $\Delta W_z > 0$. Інша особливість полягає в тому, що при температурі $T = 0\text{K}$ рівні валентної зони напівпровідника цілком заповнені, а зона провідності цілком вільна. У кристалічній структурі це відповідає положенню, коли зайняті всі ковалентні зв'язки.

Якщо при $T = 0\text{K}$ кристал напівпровідника помістити в електричне поле, то струму не буде. У валентній зоні немає вільних рівнів, а для переходу валентних електронів у зону провідності енергії звичайно використовуваних полів недостатньо. Отже, у цьому випадку провідність напівпровідника дорівнює нулю, і він поводить себе як ізолятор.

15. Як змінюється розподіл електронів у дозволених зонах зонної діаграми напівпровідника при підвищенні температури?

При підвищенні температури чи інших зовнішніх впливах, наприклад, при освітленні, електрони можуть переходити з низьких на більш високі енергетичні рівні. При цьому рівень, куди переходить електрон, повинен бути вільним, а електрон повинен одержати визначену "порцію" енергії.

17. Чим відрізняється зонна діаграма діелектриків від зонної діаграми напівпровідників?

Зонна діаграма діелектрика відрізняється від зонної діаграми напівпровідника шириною забороненої зони. У діелектриків вона така велика, що навіть при їхньому нагріванні до температури плавлення, енергії теплових коливань решітки виявляється недостатньо для переходу валентних електронів у зону провідності. Тому діелектрики не проводять струм при будь-яких температурах.

18. Який напівпровідник називають власним?

Власним називають напівпровідник, який з ідеальними кристалічними решітками цілком вільний від будь-яких домішок. У природі таких кристалів не існує, тому власний напівпровідник — це ідеалізоване уявлення напівпровідникових кристалів. Реальні кристали в тій чи іншій мірі можуть бути близькі до власних напівпровідників.

23. Що таке "час життя" носіїв заряду?

Час життя — це середній час перебування носіїв заряду в активному стані, тобто електронів у зоні провідності, а дірок — у валентній зоні. Його величина є показником інтенсивності процесу рекомбінації в кристалі. Чим менше час життя τ , тим інтенсивніше протікає процес рекомбінації. Час життя можна регулювати, змінюючи концентрацію центрів рекомбінації в кристалі.

30. Який напівпровідник називають електронним чи напівпровідником n-типу?

Якщо концентрація електронів у напівпровіднику суттєво перевищить концентрацію дірок, то електропровідність напівпровідника здебільшого буде визначатися електронами. Такий напівпровідник називають електронним або n-типу.

31. Які носії заряду в домішкових напівпровідниках називають основними, а які — неосновними?

Носії заряду в домішковому напівпровіднику з більшою концентрацією називаються основними, а носії заряду з меншою концентрацією — неосновними.

35. Які домішки в напівпровідниках називають акцепторами?

Акцепторами називають домішки, здатні приймати на свої рівні валентні електрони.

6. Яку енергію повинен одержати електрон, щоб перейти на більш високий дозволений рівень?

При підвищенні температури чи інших зовнішніх впливах, наприклад, при освітленні, електрони можуть переходити з низьких на більш високі енергетичні рівні. При цьому рівень, куди переходить електрон, повинен бути вільним, а електрон повинен одержати визначену "порцію" енергії. Якщо вихідний рівень відповідає енергії W_1 , а рівень, на який переходить електрон W_2 , то необхідне збільшення енергії при переході повинне бути $\Delta W = W_2 - W_1$.

87. Які бувають різновиди електричного пробою?

Електричний пробій по своїй природі буває тунельним або лавинним.

59. Що називають електронно-дірковим чи p-n-переходом?

1) Електричний перехід між двома областями напівпровідника, одна з яких p-типу, а друга n-типу, називають електронно-дірковим переходом, або p-n переходом.

2) Шар об'ємного заряду збіднений рухомими носіями і його питомий опір близький до опору власного напівпровідника. Цей шар і називають електронно-дірковим переходом (або скорочено p-n переходом).

85. Яке явище називають пробоем р–n–переходу?

Під пробоем р-n переходу розуміють явище різкого збільшення зворотного струму діода з досягненням зворотною напругою деякого критичного значення.

84. У чому полягає властивість однобічної провідності р–n–переходу?

Якщо виміряти струми, що протікають через перехід при подачі на нього прямої і зворотної напруги рівної за величиною, то вони будуть відрізнятися один від одного в тисячі і більше разів.

41. Приведіть загальну формулу для питомої електропровідності напівпровідників і поясніть усі фізичні величини, що входять до неї.

Питома електропровідність (провідність) є найважливішим параметром напівпровідникового матеріалу і визначається в загальному випадку виразом:

$$\sigma = q (n\mu_n + p\mu_p),$$

де q — заряд електрона та дірки;

n, p — концентрації електронів і дірок відповідно;

μ_n, μ_p — рухливості електронів і дірок.

42. Який рух носіїв заряду називають дрейфом?

Дрейфом називають рух носіїв в електричному полі.

16. Чому, з погляду зонної діаграми, електропровідність напівпровідників менше, ніж провідників?

З підвищенням температури зростає енергія теплових коливань решітки (1.2) і частина цієї енергії, як і в кристалі провідника, передається валентним електронам. Ті з них, що одержали збільшення енергії більш ніж ширина забороненої зони ΔW_3 , переходять на вільні рівні зони провідності. У кристалі напівпровідника з'являється електронний газ, і він набуває кінцевої провідності. При цьому чим вища температура, тим більша енергія теплових коливань решітки і тим більше число електронів може бути "закинуте" у зону провідності.

Цим обумовлено ефект збільшення провідності напівпровідників із ростом температури. Однак загальне число вільних носіїв у напівпровіднику, навіть при сильному розігріві, завжди виявляється значно меншим числа вільних електронів у кристалі провідника. Тому провідність напівпровідників істотно менша, ніж провідників.

20. Що таке "дірка" у напівпровіднику?

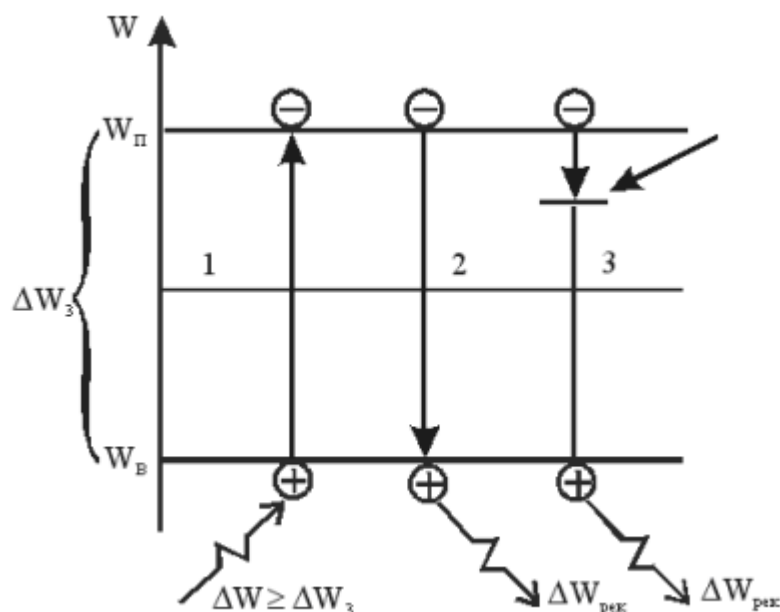
Якщо електрон покидає атом, в одному з ковалентних зв'язків утворюється вакантне місце, що рівносильно появі там додатного заряду, який дорівнює заряду електрона. Таке вакантне місце називають діркою.

22. Що таке рекомбінація носіїв заряду в напівпровідниках?

Електрони з зони провідності повертаються на вільні рівні валентної зони. При цьому зникає пара носіїв — електрон і дірка. Такий процес називають рекомбінацією.

21. Покажіть на зонній діаграмі власного напівпровідника, як утворяться носії заряду — електрони та дірки.

Процес утворення пари власних носіїв показано на зонній діаграмі власного напівпровідника стрілкою 1.



5. Що таке кристалічні решітки?

Кристалічна структура відзначається тим, що створюючи її, атоми розташовуються в просторі в строго закономірному порядку, утворюючи упорядковані кристалічні решітки. Ті місця в решітках, де знаходяться атоми, називаються вузлами.

24. Який стан кристала напівпровідника називається станом термодинамічної рівноваги? •

Якщо температура постійна та відсутні будь-які зовнішні впливи, то в кристалі встановлюється стан термодинамічної рівноваги. Число генеруючих в одиницю часу носіїв — називають швидкістю генерації $V_{\text{ген}}$, а число рекомбінуючих в одиницю часу носіїв — швидкістю рекомбінації $V_{\text{рек}}$. У стані термодинамічної рівноваги ці швидкості однакові $V_{\text{рек}} = V_{\text{ген}}$ і цим забезпечується постійність концентрації носіїв заряду в кристалі.

Концентрація носіїв у таких умовах називається рівноважною, а самі носії — рівноважними.

25. Як залежить рівноважна концентрація власних носіїв від ширини забороненої зони та температури?

Показова функція $e^{-\frac{\Delta W_z}{2W_T}}$ називається експонентною. Фізичні величини, описувані експонентними функціями, відрізняються надзвичайно сильною залежністю від їх показника. У даному випадку показник експоненти дорівнює відношенню ширини забороненої зони ΔW_z до енергії теплових коливань $W_T = kT$. Тому концентрація власних носіїв залежить від ширини забороненої зони та температури. З ростом температури показник експоненти зменшується, і, оскільки він має негативний знак, концентрація збільшується. При цьому концентрація подвоюється при зміні температури всього на кілька градусів.

54. Який стан напівпровідника називають рівноважним?

Рівноважним називають такий стан р-п-переходу, коли до нього не прикладена зовнішня напруга і відсутні збуджуючі фактори (нагрівання, освітлення та інше).

55. Який стан напівпровідника називають нерівноважним?

Будь-який зовнішній енергетичний вплив переводить напівпровідник у нерівноважний стан. Залежно від конкретних умов нерівноважний стан напівпровідника може виявлятися в змінах концентрацій носіїв заряду, у появі електричних струмів або внутрішніх електричних полів.

60. Який р–n–перехід називають симетричним, а який несиметричним?

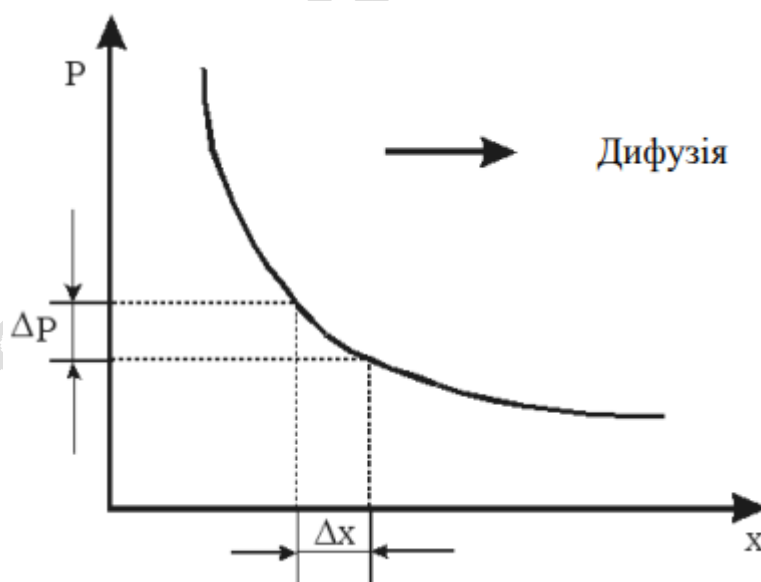
За співвідношенням концентрацій домішок N_A і N_D розрізняють переходи симетричні та несиметричні. Якщо $N_A = N_D$, перехід називають симетричним, а якщо $N_A \neq N_D$, то — несиметричним. У напівпровідникових приладах зазвичай використовують несиметричні переходи.

62. Чим відрізняються гомогенні р–n–переходи від гетерогенних?

Електричні переходи між двома областями одного і того ж напівпровідника з різною електропровідністю називають гомогенними переходами, а між різними за хімічним складом напівпровідниками — гетерогенними переходами.

51. Який електричний струм називають дифузійним?

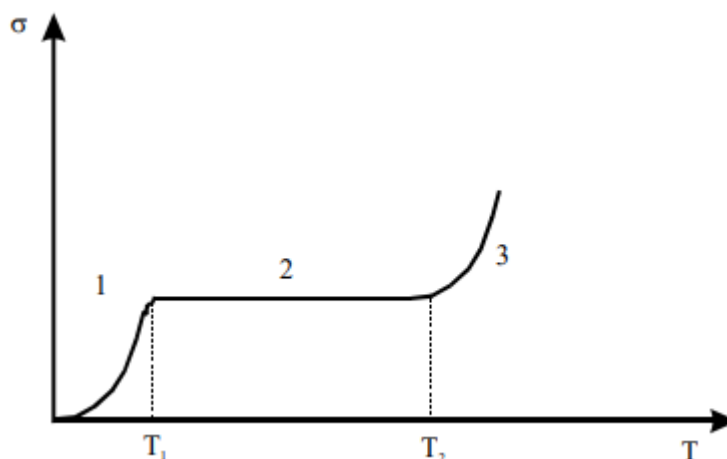
Дуже часто з різних причин у кристалі напівпровідника виникає перепад концентрацій рухливих носіїв заряду з відстанню. Як приклад на рисунку показано нерівномірний розподіл концентрації дірок p залежно від деякої відстані x у кристалі. У цьому випадку, як будь-які рухливі частки, дірки рухатимуться (дифундуватимуть) з області з більшою концентрацією в область із меншою концентрацією. При цьому переноситься заряд і виникає струм, названий дифузійним.



47. Який інтервал температур вибирають, як правило, для роботи НПП.

Поясніть на основі температурної залежності $\sigma(T)$.

Матеріали, що використовуються під час виробництва НПП вибирають так, щоб у передбачуваних умовах експлуатації їхня провідність якнайменше залежала від температури. Цій умові відповідає ділянка $T_1 - T_2$.



73. Яке явище називають інжекцією?

- 1) Явище збільшення концентрації неосновних носіїв називається інжекцією.
- 2) Процес «нагнітання» неосновних носіїв у сусідні області називають інжекцією.

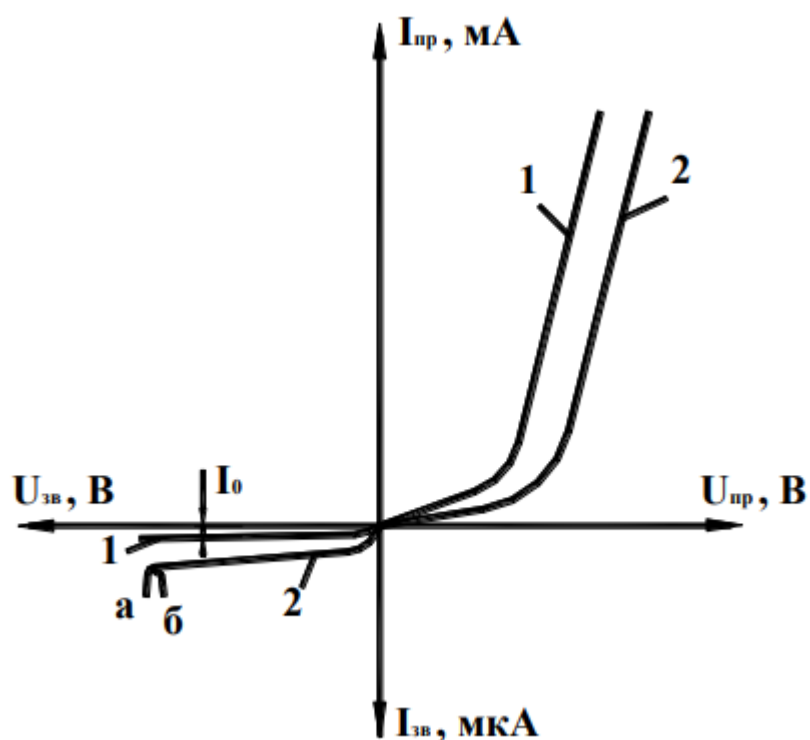
79. Запишіть вираз для ВАХ ідеалізованого р–n–переходу.

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

де I_0 – зворотний струм р-n-переходу.

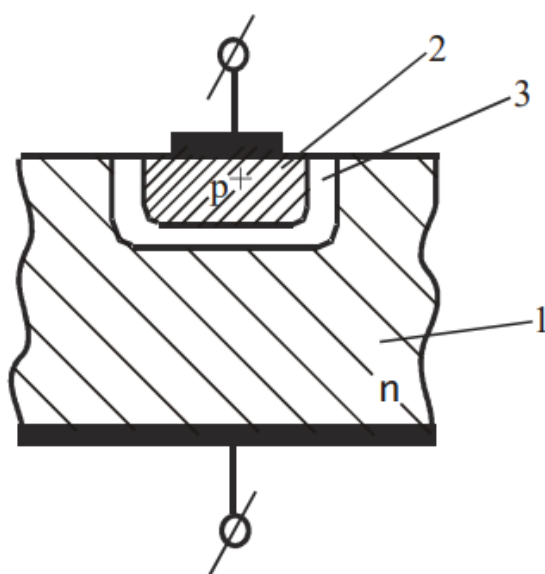
80. Зобразіть графічно ВАХ ідеалізованого р–п–переходу.

Вид ВАХ ідеалізованого р–п–переходу показаний на рисунку (крива 1).



81. Що називають базою та емітером несиметричного р–п–переходу?

Та область несиметричного р–п–переходу, що більше легована, називається емітером (2 на рис.), менш легована область – базою (1 на рис.).



1 – база; 2 – емітер; 3 – р–п–перехід

82. Приведіть на одному графіку (в одній системі координат) ВАХ реального та ідеалізованого р–п–переходів.

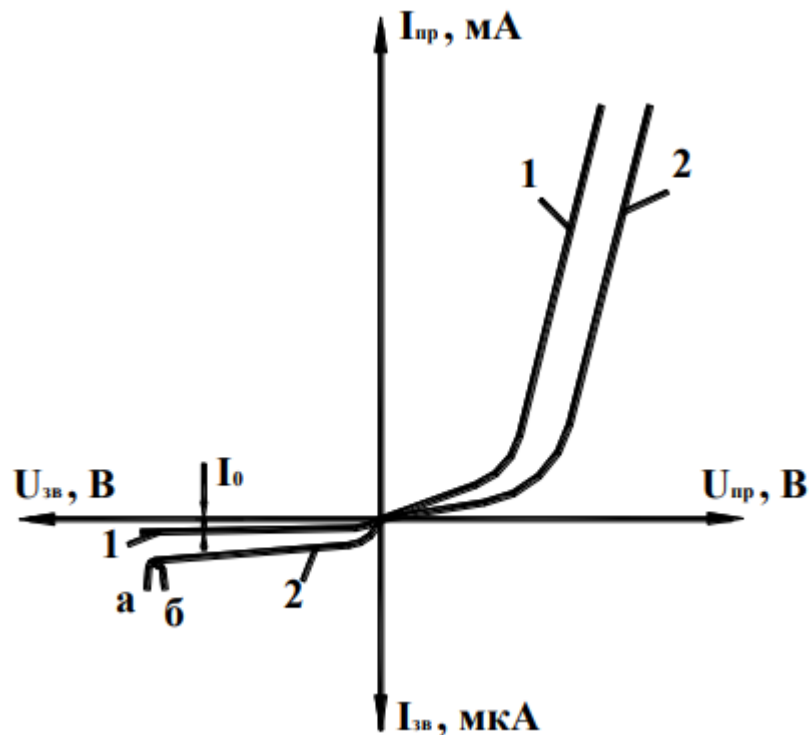


Рисунок 2.16 – Вольтамперна характеристика ідеалізованого (1) і реального (2) р-п-переходів

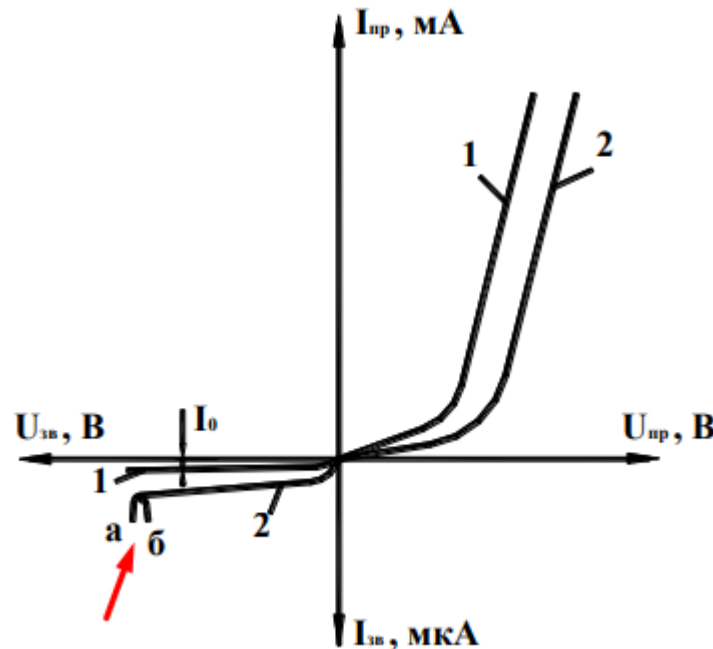
83. Поясніть, чому зворотній струм $I_{зв}$ реального р–п–переходу більший за струм насичення I_0 ідеалізованого р–п–переходу.

Зворотний струм реального р-п-переходу більший, ніж в ідеалізованого, і зростає зі збільшенням зворотної напруги. У реальному р-п-переході необхідно враховувати процеси термогенерації носіїв заряду в об'ємі запірного шару. Оскільки зі збільшенням зворотної напруги $U_{зв}$ зростає ширина запірного шару, то зростатиме і струм термогенерації I_T . Крім того, на поверхні кристала можуть виникати провідні плівки різного походження. Ці плівки шунтують р-п-перехід, по них протікає струм, що називається струмом витоку $I_{вит}$. Таким чином, повний зворотний струм реального р-п-переходу більший, ніж ідеалізованого р-п-переходу і є залежним від прикладеної напруги:

$$I_{зв}(U) = I_0 + I_T(U) + I_{вит}(U).$$

86. Покажіть на ВАХ реального р–n–переходу ділянку пробою, виділивши на ній дві гілки

На ВАХ реального р-n-переходу з'являється різке збільшення зворотного струму при визначеному значенні зворотної напруги (гілки А і Б на рис.). Це явище називається пробоєм р-n-переходу.



7. Що називають енергетичним спектром електронів кристала?

Енергетичний спектр кристалів. У ході об'єднання атомів у кристалічні решітки кожний з дозволених рівнів їх спектра розщеплюються на ряд близько розташованих підрівнів. Вони утворюють дозвалені зони. Кількість підрівнів у дозволених зонах дорівнює числу атомів у кристалі. Тому кожна пара електронів може зайняти свій власний рівень. В результаті енергетичний спектр кристала є системою дозволених і заборонених зон, що чергуються. Дозволена зона, у якій знаходяться валентні електрони, називається валентною зоною, та що знаходиться вище дозвальної зони – зоною провідності.

19. Чому при $T = 0\text{K}$ власний напівпровідник не проводить електричний струм?

Власний напівпровідник – це напівпровідник з ідеальними кристалічними решітками, цілком вільний від будь-яких домішок. Електропровідність напівпровідників сильно залежить від кількості та роду домішок у кристалі. Тому через відсутність домішок він не проводить струм.

13. Який рівень на зонній діаграмі провідників називають рівнем Фермі? Рівень Фермі — це енергетичний рівень, ймовірність заповнення якого дорівнює $\frac{1}{2}$. У термодинаміці цьому рівню відповідає електрохімічний потенціал, який дорівнює енергії утворення або зникнення однієї частинки. Більшість переходів із заповнених рівнів на незаповнені електрони здійснюють поблизу рівня Фермі в інтервалі 3-4 кТ. За температури 300 К величина $kT = 0,025$ еВ.

У провідниках, при $T = 0\text{К}$ електрони займають найнижчі рівні валентної зони. Найбільш високий із заповнених рівнів називають рівнем Фермі W_F .

28. Поясніть, як при введенні донорів у напівпровідник одержують перевагу концентрації електронів над концентрацією дірок.

Домішки, що сприяють збільшенню концентрації електронів, називають донорними, тобто такими, що віддають носії. з введенням донорної домішки в забороненій зоні з'являються окремі дозволені рівні W_d , розташовані поблизу дна зони провідності. За нормальних робочих температур практично всі домішкові атоми іонізовані, тобто кожен із них віддає в зону провідності один електрон. Тому концентрація електронів стає більшою за концентрацію дірок.

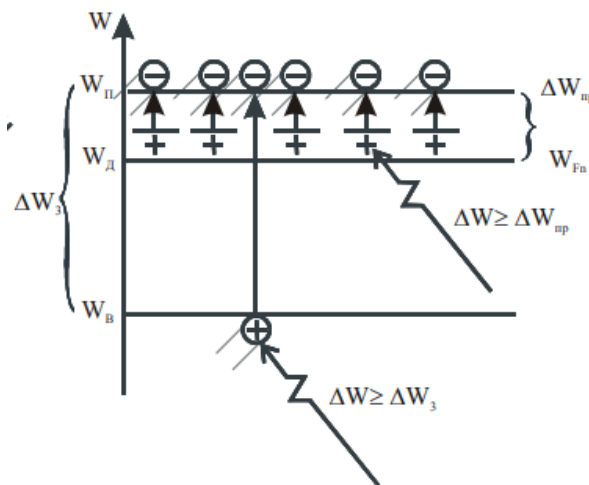
29. Чим позитивний іон донора відрізняється від дірки?

Дірки в напівпровіднику n-типу утворюються за рахунок переходів валентних електронів через усю заборонену зону, для цього необхідна порція енергії $\Delta W \geq \Delta W_z$. А щоб утворити позитивний іон донора потрібна енергія, що складає соті частки електронвольта і виявляється істотно меншою ширини забороненої зони: $\Delta W_{пр} \ll \Delta W_z$. Також дірка може рухатися, а іон донора не може.

32. Яка відмінність зонних діаграм домішкового та власного напівпровідників?

Її відмінність від зонної діаграми бездомішкового кристала в тому, що з введенням донорної домішки в забороненій зоні з'являються окремі дозволені рівні W_d , розташовані поблизу дна зони провідності. При температурі абсолютного нуля ці рівні зайняті п'ятьма валентними електронами домішкових атомів.

33. Покажіть на зонній діаграмі електронного напівпровідника процес утворення основних і неосновних носіїв заряду.



Під час введення в решітку чотиривалентного напівпровідника атомів п'ятивалентних елементів (фосфор, миш'як, сурма), чотири валентних електрони домішкових атомів утворюють ковалентні зв'язки. П'ятий валентний електрон домішкового атома виявляється «зайвим». Його зв'язок із домішковим атомом послаблюється, і навіть через невеликий енергетичний вплив з боку ґратки він може перейти до складу електронного газу.

34. Що таке рівень Фермі і яке його положення на зонній діаграмі власного й електронного напівпровідників?

Рівень Фермі — це енергетичний рівень, ймовірність заповнення якого дорівнює $\frac{1}{2}$. У термодинаміці цьому рівню відповідає електрохімічний потенціал, який дорівнює енергії утворення або зникнення однієї частинки. Більшість переходів із заповнених рівнів на незаповнені електрони здійснюють поблизу рівня Фермі в інтервалі 3-4 кТ. За температури 300 К величина $kT = 0,025$ еВ.

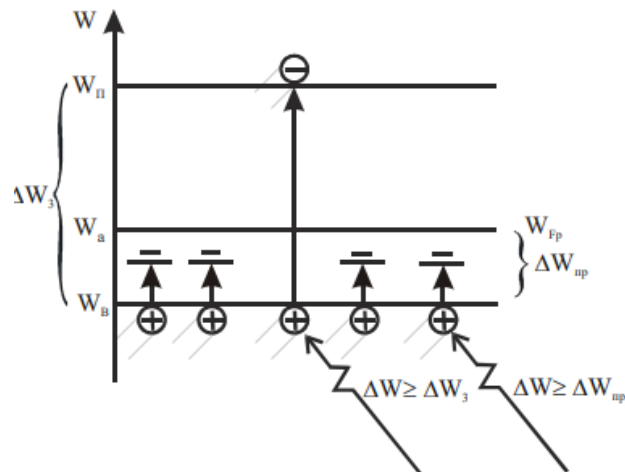
Положення на зонній діаграмі електронного напівпровідника:

Рівень Фермі W_{Fn} у напівпровіднику n-типу зміщується тим ближче до зони провідності, чим більша концентрація донорної домішки.

Положення на зонній діаграмі власного напівпровідника:

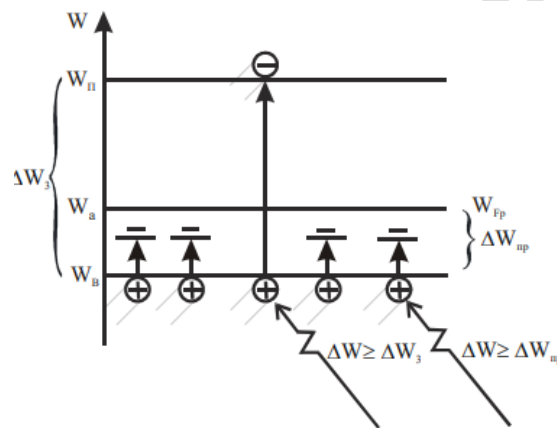
Рівень Фермі в напівпровідникових кристалах визначає середню енергію носіїв заряду. У власному напівпровіднику, де концентрація електронів і дірок однакова, практично можна вважати, що він знаходиться посередині забороненої зони W_{Fi} .

36. Нарисуйте та поясніть зонну діаграму напівпровідника р-типу.



р-тип (дірки)

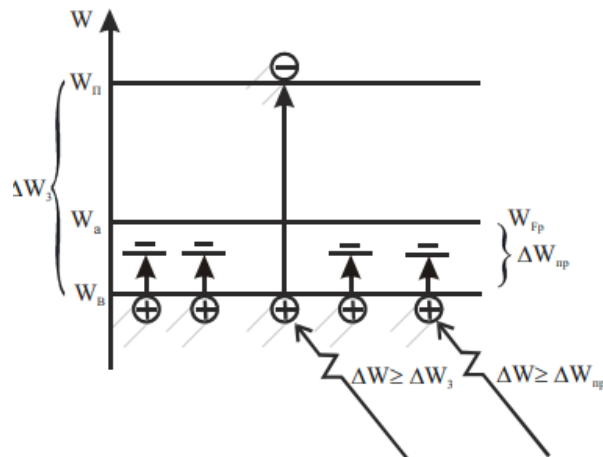
37. Покажіть на зонній діаграмі діркового напівпровідника процес утворення основних і неосновних носіїв заряду.



Введення акцепторних домішок призводить до появи в забороненій зоні акцепторних домішкових рівнів W_a поблизу стелі валентної зони. При $T=0K$ зона провідності і рівні W_a цілком вільні. Із зростанням температури починається перехід валентних електронів на більш високі рівні зонної діаграми.

38. Покажіть і поясніть положення рівня Фермі на зонній діаграмі діркового напівпровідника.

Рівень Фермі $W_{\text{Фр}}$ у напівпровіднику р-типу (дірки) зміщується від середини забороненої зони тим ближче до валентної зони, чим більша концентрація акцепторної домішки. (На рисунку там де $W_{\text{Фр}}$)



39. Сформулюйте закон діючих мас.

Закон діючих мас – це добуток концентрації електронів і дірок у напівпровідниковому кристалі в стані термодинамічної рівноваги, який є постійним і підкоряється співвідношенню:

$$n \cdot p = n_i^2 = p_i^2.$$

для електронного напівпровідника $n_n p_n = n_i^2$.

для діркового напівпровідника $p_p \cdot n_p = n_i^2$.

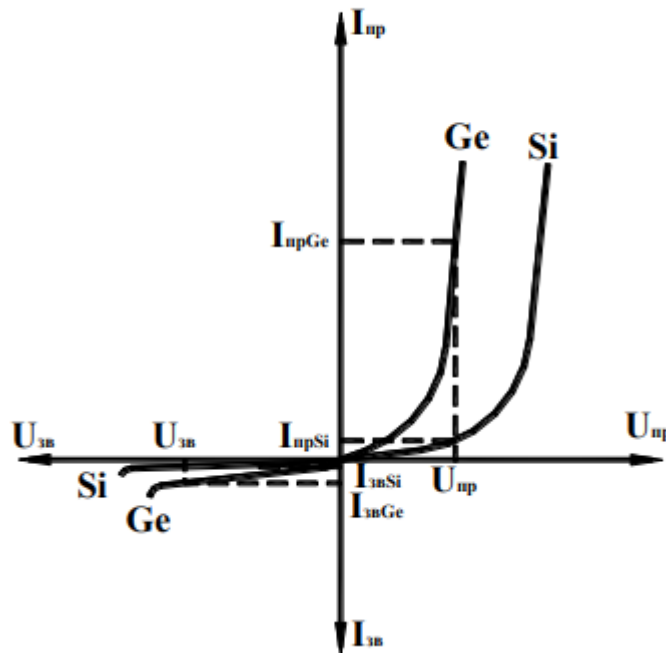
З цього закону визначається концентрація неосновних носіїв у домішкових напівпровідниках.

40. Як визначають рівноважні концентрації неосновних носіїв заряду в домішкових напівпровідниках?

Концентрація неосновних носіїв у домішкових напівпровідниках визначається з закону діючих мас. З закону діючих мас: $n \cdot p = n_i^2 = p_i^2$. Тоді для електронного напівпровідника: $n_n p_n = n_i^2$, з цієї формули отримуємо, що $p_n = n_i^2 / N_0$. Відповідно для діркового напівпровідника $p_p \cdot n_p = n_i^2$, з цієї формули отримуємо, що $n_p = n_i^2 / N_0$. З виразів видно, що зі збільшенням ступеня легування напівпровідникового кристала (збільшення N_0 чи N_D) концентрація неосновних носіїв пропорційно зменшується.

88. Приведіть в одній системі координат ВАХ германієвого та кремнієвого р–п–переходів і вкажіть їх розходження.

$$(\Delta W_3)_{\text{Ge}} = 0,7 \text{ eB}; \quad (\Delta W_3)_{\text{Si}} = 1,12 \text{ eB}.$$



89. Поясніть, чому відрізняються зворотні струми германієвого та кремнієвого р–п–переходів при однакових зворотніх напругах.

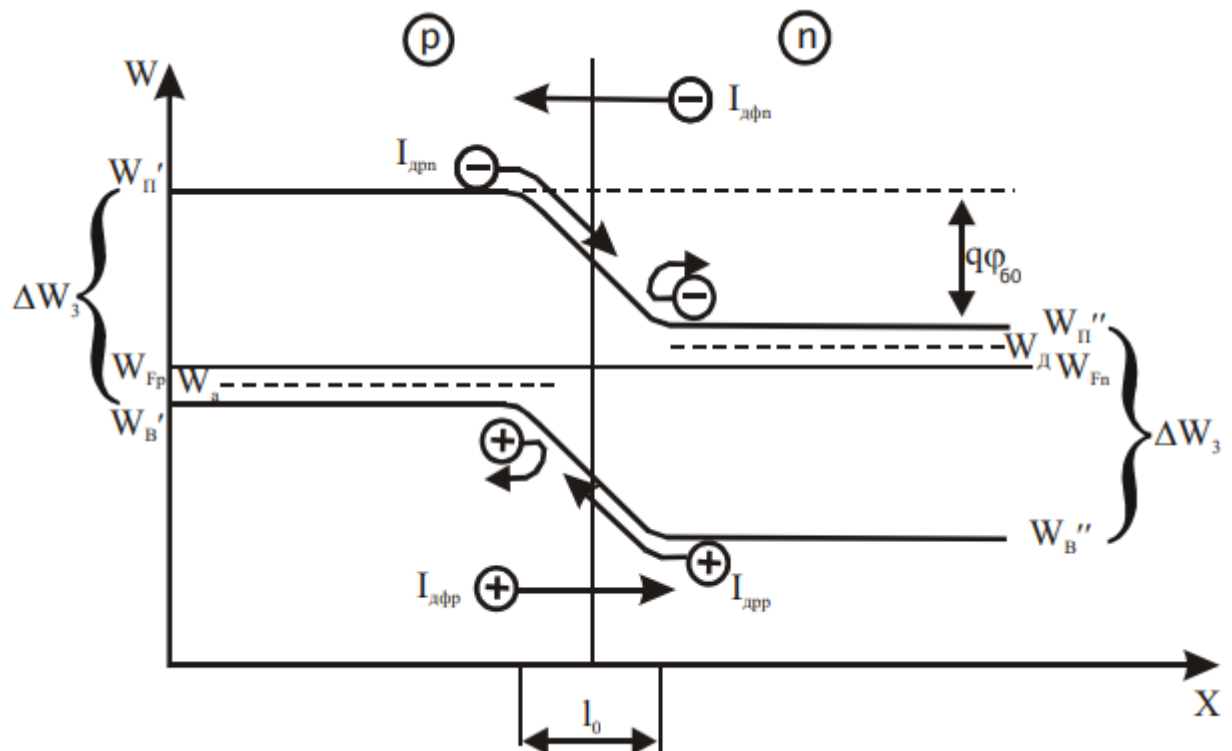
Відповідно до закону діючих мас концентрації неосновних носіїв p_n і n_p у кремнію менше, ніж у германію при однаковій концентрації легуючих домішок N_d і N_a , тому що зворотній струм створюється неосновними носіями, $(I_{zv})_{\text{Si}} < (I_{zv})_{\text{Ge}}$

90. Поясніть, чому розрізняються потенціальні бар'єри германієвого та кремнієвого р–п–переходів.

Відповідно до рівності потенціальний бар'єр $\phi_{\text{бo}}$ кремнієвого р–п–переходу вище, ніж германієвого. Ця обставина, в додачу до розходження в струмах, обумовлює те, що $(I_{\text{np}})_{\text{Si}} < (I_{\text{np}})_{\text{zv}}$.

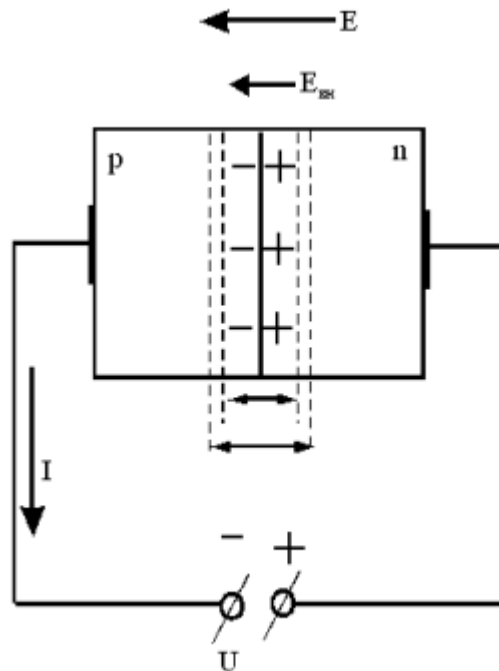
$$\phi_{\text{бo}} = \phi_T \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}.$$

69. Нарисуйте та поясніть зонну діаграму р–п–переходу в рівновазі. Сутність процесів, що протікають у р–п–переході, який знаходиться в рівноважному стані, можна додатково проілюструвати за допомогою його зонної діаграми. Її одержують шляхом взаємного зміщення зонних діаграм ізольованих п–і р–областей, із таким розрахунком, щоб структура в цілому мала однаковий рівень Фермі $W_{Fp}=W_{Fn}=W_F$. Рівень Фермі W_F визначає середню енергію носіїв заряду, тому в рівноважному стані він однаковий для всього кристала. У результаті такого зміщення в зоні контакту неминуче виникає скривлення енергетичних рівнів дна зони провідності W_n і стелі валентної зони W_B .



75. Який режим роботи р–n–переходу називають режимом зворотного зміщення?

Режим зворотного зміщення відповідає такій напрузі, при якому зовнішнє електричне поле $E_{зв}$ збігається за напрямком із внутрішнім полем р–n–переходу $E_{вн}$



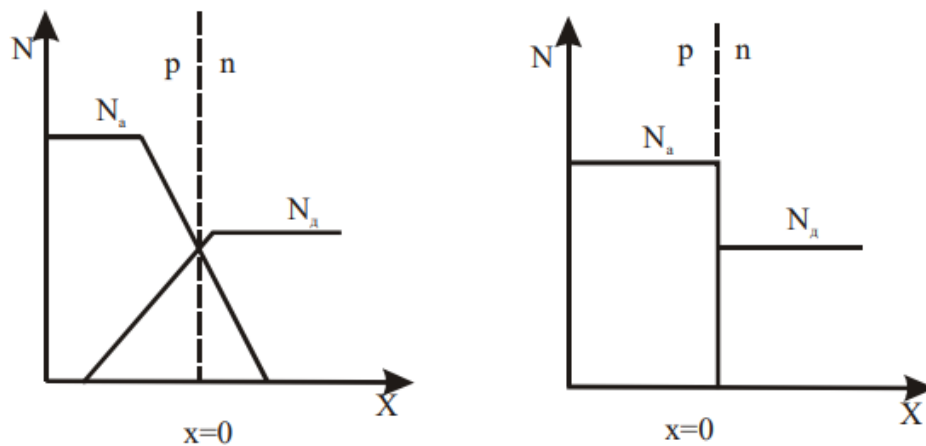
76. Поясніть, як змінюється висота потенціального бар'єра р–n–переходу при подачі на нього зворотного зміщення.

Висота потенціального бар'єру при цьому збільшується:

$$\varphi_{зв} = \varphi_{б0} + U_{зв}$$

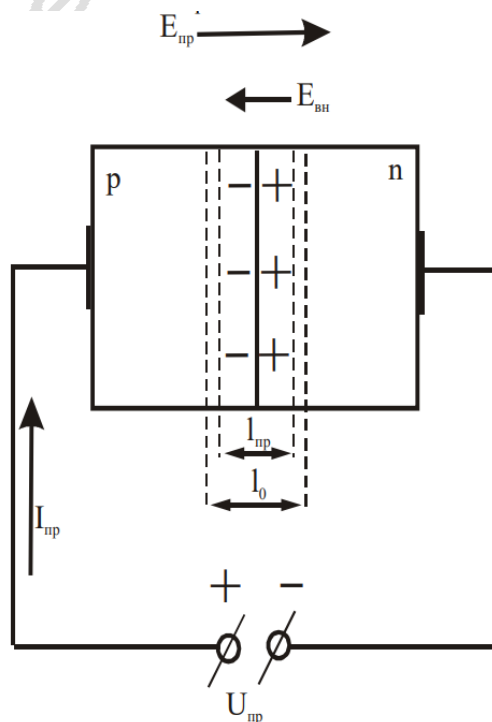
61. Як розрізняються між собою плавні та різкі р–п–переходи?

У випадку плавного р–п–переходу (рис. 1) концентрація акцепторів у р–області при наближенні до контакту зменшується від N_a до нуля поступово. Аналогічно змінюється концентрація донорів у n–області. Площиною контакту в цьому випадку вважають ту площину, де концентрація донорів і акцепторів рівні (на рис. 1 ця площина проходить через точку х координати $x=0$). Чим крутіша зміна домішок, тим менш плавним є перехід. Якщо концентрація домішок змінюється в області контакту дуже різко, практично в одній площині, р–п–перехід називають різким (рис. 2.).



71. Який режим р–п–переходу називають режимом прямого зміщення?

Режим прямого зміщення відповідає подачі такої напруги, при якій викликане нею зовнішнє електричне поле $E_{пр}$ спрямоване назустріч внутрішньому полю переходу.



43. Який фізичний зміст має рухливість носіїв заряду в кристалі?

Рухливість носія заряду (μ_n і μ_p) - це кількісна характеристика носія заряду, яка визначається як середні швидкості дрейфу носіїв в електричному полі з напруженістю $E = 1$ В/см. Дрейфом називають рух носіїв в електричному полі.

44. Чому провідність власного напівпровідника менше, ніж провідність домішкових напівпровідників?

Провідність власного напівпровідника змінюється з температурою за експонентою, тобто так само, як і концентрація власних носіїв n_i . Залежність $\sigma = \sigma(T)$ для домішкових напівпровідників має більш складний характер. Ця різниця відбувається через іонізацію домішок у домішкових провідниках.

45. З яких причин змінюється з температурою електропровідність σ напівпровідників?

Температурні властивості напівпровідників визначаються залежністю їх електропровідності від температури $\sigma = \sigma(T)$. від температури залежать концентрації носіїв заряду n , p і їх рухливості μ_n , μ_p . Але температурна залежність рухливості істотно слабкіша від температурної залежності концентрації, тому в цілому залежність $\sigma(T)$ визначається тим, як змінюються з температурою концентрації $n(T)$ і $p(T)$. Електропровідність напівпровідників сильно залежить від кількості та роду домішок у кристалі.

63. Який стан р–n–переходу називають рівноважним?

Рівноважним називають такий стан р-n-переходу, коли до нього не прикладена зовнішня напруга і відсутні збуджуючі фактори (нагрівання, освітлення та ін.).

64. Поясніть виникнення дифузії основних носіїв через р–n–перехід.

У р-n-переході існує перепад (градієнт) концентрації носіїв одного знаку: дірок у р-області набагато більше, ніж у n-області, а електронів – навпаки. В результаті виникає дифузія основних носіїв заряду через межу розділу областей р- і n-типу, тобто через перехід. Дірки з р-області прагнуть перейти в n-область, а електрони дифундують у протилежному напрямку.

58. Приведіть співвідношення, що встановлюють зв'язок дифузійної довжини носіїв заряду і їх часу життя.

Дифузійна довжина L_n і час життя τ_n зв'язані один з одним співвідношенням:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

46. Нарисуйте та поясніть температурну залежність електропровідності домішкових напівпровідників $\sigma(T)$.

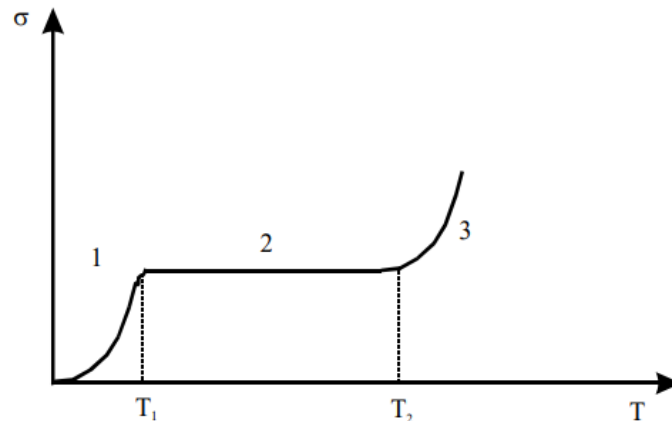


Рисунок 1.7 – Залежність електропровідності домішкового напівпровідника від температури

На характеристиці $\sigma = \sigma(T)$ домішкового напівпровідника можна виділити три характерні області:

1 – область домішкової провідності ($T < T_1$). Зростання провідності на цій ділянці обумовлений збільшенням концентрації основних носіїв у результаті іонізації домішок. Цей процес закінчується при температурі T_1 , коли всі атоми домішки іонізовані;

2 – область ($T_1 < T < T_2$), у межах якої всі атоми домішок іонізовані, а енергії теплових коливань недостатньо для утворення власних носіїв. Тому концентрація основних носіїв у ній практично постійна, а провідність незначно зменшується через зменшення рухливості;

3 – область власної провідності ($T > T_2$). У зв'язку із зростанням енергії теплових коливань решітки концентрація власних носіїв в області 3 зростає настільки, що стає більше концентрації домішкових носіїв. Кристал здобуває власну провідність. Після охолодження домішкова електропровідність кристала відновлюється. Гранична температура T_2 таких перетворень залежить від концентрації домішок і ширини забороненої зони. Зі збільшенням ΔW_3 температура T_2 зростає.

48. Чому робочий інтервал температур кремнієвих НПП ширший, ніж від германієвих?

Матеріали, що використовуються під час виробництва НПП і ІМС, вибирають так, щоб у передбачуваних умовах експлуатації їхня провідність якнайменше залежала від температури. Цій умові відповідає ділянка $T_1 - T_2$. Для найбільш розповсюджених напівпровідникових матеріалів (кремній, германій) нижня межа робочих температур $T_1 = -60...-70^\circ\text{C}$... Максимальна робоча температура T_2 для цих же матеріалів дорівнює відповідно $+120...150^\circ\text{C}$ і $+70...+90^\circ\text{C}$ Тому для НПП є більше варіантів температур, ніж для германієвих з відомими інтервалами.

49. Запишіть вираз для визначення щільності дрейфового електронного та діркового струмів?

Дрейфовий струм – це спрямований рух носіїв заряду в електричному полі. Щільність цього струму (A/cm^2) визначається законом Ома:

$$I_{\text{др}} = \sigma E,$$

де E – напруженість електронного поля у напівпровіднику, а провідність σ розраховується за формулою $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$ (питома електропровідність) або за спрощеними формулами, що впливають з неї.

Якщо потрібно розрахувати окремо електронні та діркові компоненти дрейфового струму, то використовують співвідношення:

$$I_{\text{дрн}} = qn\mu_n; \quad I_{\text{дрр}} = qp\mu_p.$$

53. Сформулюйте правило відповідності технічного напрямку електричного струму і фактичного руху носіїв заряду в напівпровідниках.

Технічний напрямок струму збігається з фактичним рухом дірок і протилежний фактичному руху електронів. За технічний напрямок електричного струму приймають напрямок від «+» до «-».

56. Чому при розгляді перехідних процесів оцінюють поведження неосновних нерівноважних носіїв?

Перехідні процеси виникають під час різких («східчастих») змін зовнішнього впливу. За перехідними характеристиками, що відбивають хід цих процесів, можна дати оцінку швидкодії або інерційності НПП (напівпровідниковий прилад). При цьому розглядають тільки неосновні носії, оскільки за звичайних рівнів зовнішніх впливів відносні зміни концентрації основних носіїв зневажливо малі.

50. Нарисуйте та поясніть розподіл носіїв заряду в напівпровіднику, необхідний для існування дифузії?

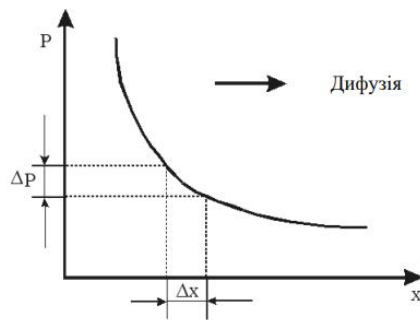


Рисунок 1.8 – Нерівномірний розподіл концентрації дірок p від відстані називають градієнтами

Дірки рухатимуться (дифундуватимуть) з області з більшою концентрацією в область із меншою концентрацією. При цьому переноситься заряд і виникає струм, названий дифузійним. Носії заряду завжди дифундують у бік зменшення концентрації. Оскільки електрони та дірки мають протилежні за знаком заряди, то електронні та діркові складові струми дифузії будуть спрямовані в різні сторони.

52. Запишіть формули для визначення щільності електронного та діркового дифузійних струмів. Поясніть фізичний зміст величин, що входять у цю формулу.

Густина дифузійних складових струмів пропорційна градієнту концентрації носіїв і для одновимірного випадку вона становить:

$$j_{p\text{ диф}} = -qD_p \frac{dp}{dx};$$

$$j_{n\text{ диф}} = qD_n \frac{dn}{dx},$$

де D_p і D_n — коефіцієнти дифузії дірок і електронів

Знак (–) у формулі пояснюється тим, що заряд дірок позитивний, а градієнт негативний, оскільки концентрація дірок спадає в бік зростання координати x

$\frac{\Delta n}{\Delta x}$; $\frac{\Delta p}{\Delta x}$ – перепади концентрації на відстані одиничної довжини, такі перепади називають градієнтами.

66. Чим обумовлено виникнення потенціального бар'єра р–n–переходу?

Внутрішнє поле $E_{\text{вн}}$ є гальмуючим для основних носіїв заряду, що дифундують через р–n–перехід. У фізиці в ході оцінки дії таких полів, прийнято замінювати їх потенціальними бар'єрами. «Висота» бар'єра визначається роботою, яку виконує носій, переборюючи гальмуюче поле. Слід чітко уявляти, що потенціальний бар'єр існує тільки для основних носіїв заряду. Для неосновних носіїв у р–n–переході $E_{\text{вн}}$ є прискорюючим електричним полем, тому для цих носіїв потенціального бар'єра в р–n–переході немає.

67. Поясніть як і чому висота потенціального бар'єра переходу залежить від ширини забороненої зони напівпровідника.

Відповідно до формули співвідношення рівноважних онцентрацій електронів n_i і дірок p_i у власному напівпровіднику концентрація власних носіїв n_i експоненціально зменшується зі збільшенням ΔW з (ширина забороненої зони) . Отже, аргумент логарифмічної функції у формулі висоти

потенціального бар'єру зростатиме ($\varphi_{\text{бo}} = \varphi_{\text{T}} \ln \frac{N_{\text{a}} \cdot N_{\text{d}}}{n_i^2}$). Це означає збільшення потенціального бар'єра $\varphi_{\text{бo}}$ зі збільшенням ширини забороненої зони ΔW .

68. Поясніть як залежить висота потенціального бар'єра переходу від ступеня легування напівпровідника n– і р–типу.

З великими ступенями легування ($N_{\text{a}}, N_{\text{d}} \approx 10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$) напівпровідникові шари вироджуються і висота бар'єра $\varphi_{\text{бo}}$ в рівноважному стані досягає максимального для даного напівпровідника значення $\varphi_{\text{бo max}}$, чисельно близького до ширини забороненої зони.

72. Яка природа струму, що проходить через р–n–перехід при прямому зміщенні?

Режим прямого зміщення відповідає подачі такої напруги, за якої викликане нею зовнішнє електричне поле $E_{\text{пр}}$ спрямоване назустріч внутрішньому полю переходу. Під дією прямої напруги основні носії заряду зміщуються від контактів у напрямку переходу, частково заповнюють збіднений шар і ширина останнього зменшується: $l_{\text{пр}} < l_0$.

70. Покажіть на зонній діаграмі, як утворюються дифузійний та дрейфовий струми через перехід.

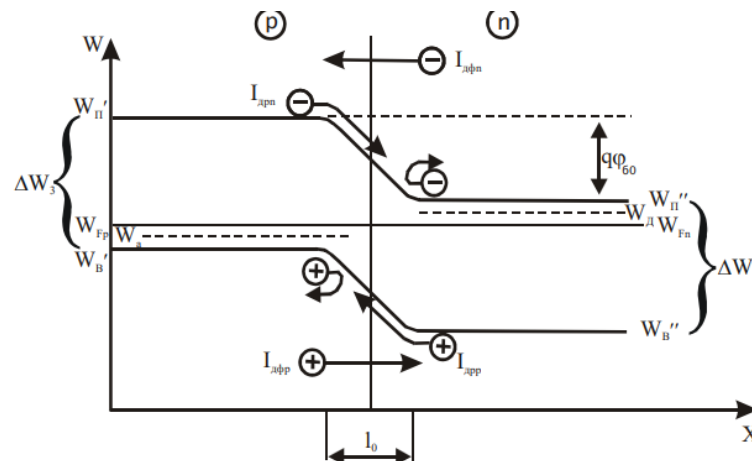


Рисунок 2.10 – Зонна діаграма p - n -переходу в рівноважному стані

З рисунку видно, що в створенні струму дифузії електронів $I_{дф.п.}$ беруть участь тільки ті електрони з зони провідності n -області, які займають рівні, що перевищують енергію $q\phi_{60}$. Цій умові відповідають рівні $W > W_n'$. Електрони, що займають рівні $W_n'' < W < W_n'$ відбиваються бар'єром і в p -область не попадають. З іншого боку, будь-який електрон, що знаходиться в зоні провідності p -області, можна уподобити кульці, що легко скачується в n -область, тому що для нього немає бар'єра. Ці електрони створюють дрейфовий струм $I_{др.п.}$.

74. Як пояснити зменшення з відстанню концентрації інжекттованих носіїв?

В результаті появи на межі переходу надлишкових неосновних носіїв $p_n(0) > p_{no}$, виникає перепад концентрації цих носіїв за напрямком до середини кристала. При цьому надлишкові нерівноважні дірки активно рекомбінують з основними носіями електронами та концентрація їх поступово зменшується, прагнучи до рівноважного значення p_{no} . Залежність концентрації від відстані згідно з формулою можна записати:

$$(p_n - p_{no}) = [p_n(0) - p_{no}] e^{\frac{-X}{L_p}}.$$

77. Яка природа струму, що протікає через p - n -перехід при зворотному зміщенні?

Режим зворотного зміщення відповідає такій напрузі, за якого зовнішнє електричне поле $E_{зв}$ збігається за напрямком із внутрішнім полем p - n -переходу $E_{вн}$. Під час подання зворотної напруги $U_{зв}$ основні носії у p - і n -областях відтягуюватимуться від меж запірного шару, що призведе до збільшення його ширини $I_{зв} > I_0$.

78. Поясніть, чому при прямому зміщенні опір р–n–переходу малий, а при зворотному зміщенні великий.

Оскільки концентрація неосновних носіїв у кристалі напівпровідника дуже мала, то зворотний струм має незначну величину (одиниці мікроампер і менше). У режимі зворотного зміщення перехід має великий опір (від сотень кілоом до декількох мегаом). А концентрація неосновних носіїв мала, бо під час зворотного зміщення основні носії заряду мають енергію, що не достатня для подолання потенціального бар'єра. Тому дифузійний струм через перехід у такому режимі різко зменшується і переважаючим стає дрейфовий струм неосновних носіїв.

65. Як зв'язані між собою дифузійний і дрейфовий струми через р–n–перехід у рівноважному стані?

У рівноважному стані дифузійний і дрейфовий струми за величиною дорівнюють один одному, і результуючий струм через р–n–перехід відсутній:

$$I = I_{\text{дф}} - I_{\text{др}} = 0$$

дифузія основних носіїв $n_{\text{по}}$ та $p_{\text{ро}}$ через р–n–перехід продовжується доти, доки не сформується таке внутрішнє електричне поле $E_{\text{вн}}$, яке ці носії не зможуть здолати. Іншими словами, поки не виникне такий дрейфовий струм неосновних носіїв $I_{\text{др}}$, який зрівноважить дифузійний струм основних носіїв $I_{\text{дф}}$, так що повний струм $I = (I_{\text{дф}} - I_{\text{др}})$ дорівнюватиме нулю.