

## **Змістовий модуль 2. Методи вирощування кристалів і кристалізація розплавів.**

**Тема 3.** Загальні положення процесів вирощування кристалів і кристалізація розплавів.

Дефекти структури и процеси вирощування кристалів. Кристалізація розплавів. Методи вирощування кристалів.

**Тема 4.** Поведінка домішок в кристалі напівпровідника.

Типи домішок в напівпровіднику. Поведінка домішок в кристалі напівпровідника. Розташування домішок в забороненій зоні напівпровідника.

### **Поведінка домішок в кристалі напівпровідника**

Оскільки одержати ідеальний кристал практично неможливо, то для практики велике значення має провідність, обумовлена наявністю в кристалі напівпровідника домішок і дефектів структури. Крім того, введення в безпримісний напівпровідник нікчемної кількості атомів домішки дуже сильно, іноді в мільйони разів, збільшує його електропровідність.

Розглянемо появу в ідеальному напівпровіднику діркової або електронної провідності, що виникає в результаті заміщення в кристалічній решітці атомів напівпровідника атомами домішок. Такого роду заміщення має в більшості випадків місце при введенні в напівпровідник домішок.

Припустимо, що в кристалі кремнію один з атомів заміщений елементом V групи, наприклад атомом фосфору (рис.1.8,а), на зовнішній електронній оболонці якого є п'ять електронів. Чотири з них підуть на утворення ковалентних тетраедричних зв'язків з атомами кремнію. П'ятий електрон рухатиметься навколо ядра атома фосфору по круговій орбіті, подібно до електрона в атомі водню. Але на відміну від нього електрон в кристалі рухається не у вакуумі, а в середовищі з певною діелектричною проникністю. Тому тяжіння електрона до ядра атома фосфору буде набагато менше і відрив його зажадає набагато меншої енергії, ніж для звільнення електрона шляхом розриву валентного зв'язку.

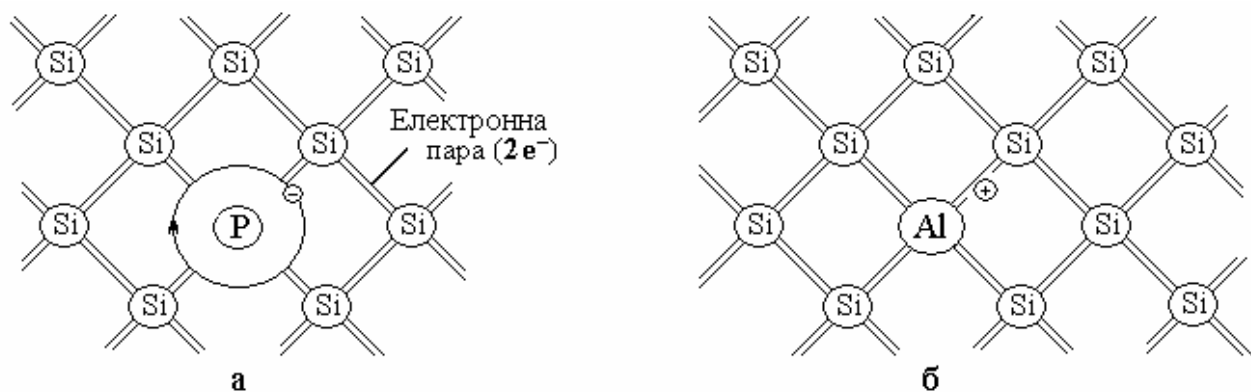


Рисунок 1.8 – Схеми виникнення електронної (а) і діркової (б) провідності при заміщенні атома кремнію в його кристалічній решітці атомом фосфору і алюмінію

В результаті вже при невеликих значеннях енергії, що одержала назву енергії іонізації, що підводиться до кристала напівпровідника ззовні у формі тепла, світла або іншим шляхом, електрон легко відщеплюється від атома домішки і стає носієм заряду. Атом домішки, наприклад фосфору, втративши електрон, іонізується, тобто перетворюється на позитивний іон фосфору  $P^+$ . Проте кристал напівпровідника в цілому залишається електронейтральним, оскільки кількості вільних електронів, що містяться в ньому, і нерухомих позитивно заряджених іонів рівні.

По-іншому поводиться в кристалічній решітці напівпровідника атом домішки елементу III групи, наприклад алюмінію, у якого на зовнішній електронній оболонці є тільки три електрони. Утворення ковалентного тетраедричного зв'язку супроводжуватиметься в даному випадку захопленням одного електрона, що виривається з сусіднього ковалентного зв'язку (рис.1.8,б). При цьому в розірваному парному валентному зв'язку утворюється дірка, яка при повідомленні кристалу напівпровідника деякої енергії стає носієм заряду. Атом алюмінію при заповненні четвертого зв'язку набуває негативного заряду і стає іоном  $Al^-$ .

Домішки, здатні віддавати свій електрон, створюючи в напівпровіднику електронну провідність, називаються донорами. До них відносяться елементи V групи в таких елементарних напівпровідниках, як германій і кремній, елементи VI групи в напівпровідникових з'єднаннях

$A^{III}B^V$  і т.д. Аналогічно домішки, що створюють в напівпровіднику дірки і викликають появу в ньому провідності діркового типу, називають акцепторами. До них відносяться елементи III групи в германії і кремнії, IV - в  $A^{III}B^V$  і т.д. Концентрацію домішок позначають: донорів -  $N_D$  і акцепторів -  $N_A$ , а їх енергії іонізації відповідно  $\Delta E_D$  і  $\Delta E_A$  (eV).

Якщо ввести у власний напівпровідник деяку кількість домішки, то при одній і тій же температурі він володітиме набагато більшою електропровідністю, тобто великою кількістю вільних носіїв заряду. Тоді стає очевидним, що енергія, необхідна для перекладу домішкового носія заряду в зону провідності, буде набагато менше енергії, визначуваною шириною забороненої зони у власному напівпровіднику. Звідси можна припустити, що енергетичні рівні носіїв заряду  $E_D$  або  $E_A$ , створювані домішкою, що вводиться в напівпровідник, потрапляють всередину забороненої зони (рис.1.9).

Домішковий рівень  $E_D$ , що створюється донорними домішками, розташовується поблизу нижнього краю зони провідності і називається донорним рівнем. Відповідно домішковий рівень  $E_A$ , що створюється акцепторами, одержав назву «акцепторний рівень». Він розташовується поблизу верхнього краю валентної зони.

При температурах, відмінних від абсолютного нуля, донорні домішки віддають електрони з свого рівня в зону провідності тим інтенсивніше, чим вище температура. Це забезпечує протікання по напівпровіднику електронного струму.

Акцепторні домішки на відміну від донорних приймають електрони із заповненої зони на ближче розташований ним акцепторний рівень. При цьому у валентній зоні утворюються дірки, які і забезпечуватимуть протікання по напівпровіднику діркового струму.

Домішки в решітку кристала можуть входити різними способами. Найчастіше зустрічається заміщення домішковим атомом атома напівпровідника, що знаходиться у вузлі решітки, або розміщення домішкового атома в міжвузлях. У першому випадку (див. рис.1.8) утворюються так звані тверді розчини заміщення і в результаті виникає один носій заряду (електрон або дірка). У другому випадку утворюються так звані тверді розчини впровадження.

Проте результат такої взаємодії набагато складніший, чим в першому випадку. Упроваджений атом може іонізуватися, віддаючи носій заряду в

зону провідності. Він може знаходитися також в неіонізованому стані і тоді не впливатиме на електричні властивості напівпровідника.

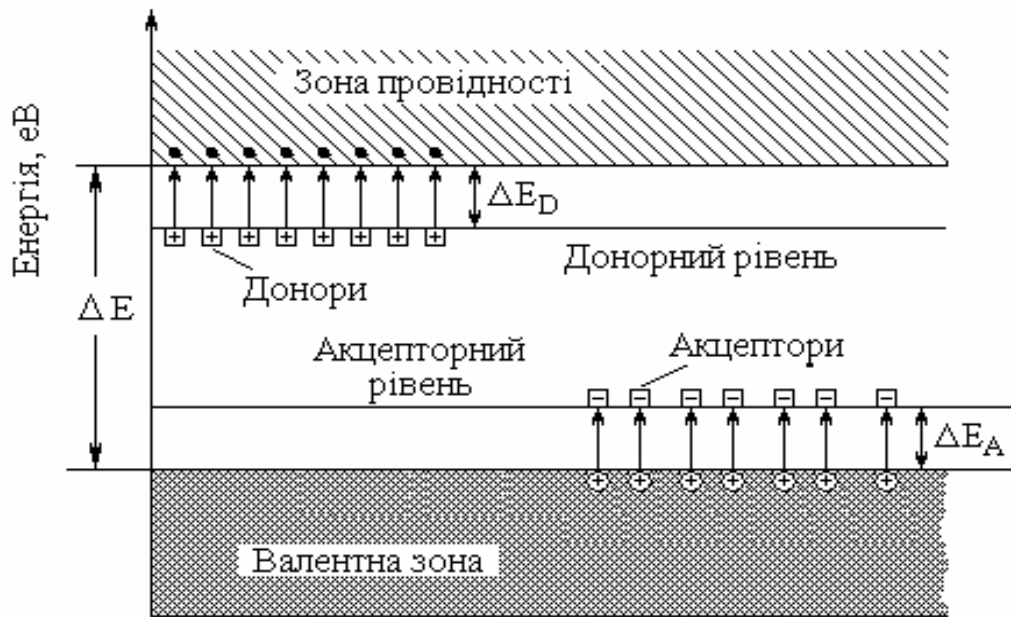
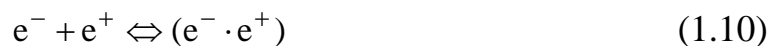


Рисунок 1.9 – Схема розташування домішкових рівнів в забороненій зоні напівпровідника

При одночасній наявності в кристалі напівпровідника домішок донорного і акцепторного типів може мати місце їх хімічна взаємодія. Таку взаємодію можна виразити у вигляді ряду реакцій типу хімічних:



де  $N_D$  і  $N_A$  - концентрації донорів і акцепторів в кристалі;  $N_D^+$  и  $N_A^-$  - концентрації іонізованих донорів і акцепторів відповідно;  $e^-$  і  $e^+$  - негативні і позитивні заряди.

Реакції (1.8) і (1.9) виражають процес іонізації домішок, а реакція (1.10) - процес створеної слабо дисоційованої електронно-діркової пари ( $e^- \cdot e^+$ ). В результаті розчинність, наприклад, донорів із зовнішньої фази у присутності акцепторів збільшується



(1.11)

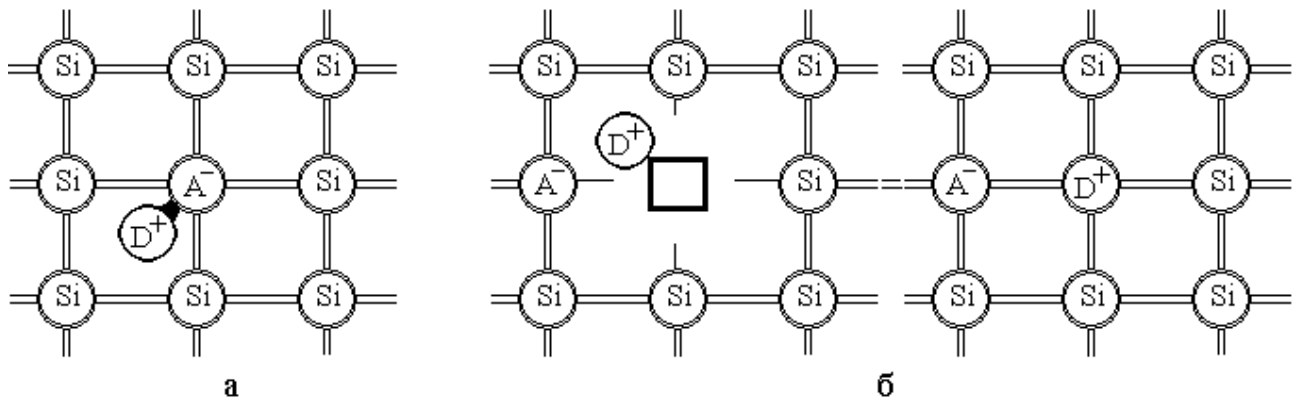
Це відбувається унаслідок того, що зменшення в правій частині реакцій (1.8) або (1.11) концентрації  $e$  в результаті реакції (1.10), згідно принципу Ле-Шательє, зрушує рівновагу всієї реакції управо.

Експериментально це положення може бути підтверджено, наприклад, даними про розчинність літію в германії залежно від вмісту в ньому галію (рис.1.10).



Рисунок 1.10 – Залежність розчинності літію в германії від вмісту в ньому галію (при кімнатній температурі)

Ще однією причиною збільшення взаємної розчинності донорів і акцепторів служить утворення іонних пар. При цьому одна домішка повинна знаходитися в напівпровіднику у вузлі решіток, а друга міжвузловині (рис.1.11,а). Рухомий донор, наприклад атом літію, наблизившись до протилежно зарядженого акцептора (атому галію), утворює з ним іонну пару. Вище розглянуті ефекти мають місце при низьких температурах, коли електронно-діркова або іонна пари достатньо стійкі. При високих температурах вони повністю дисоційовані. Проте і при високих температурах ефект взаємного впливу донорів і акцепторів на розчинність зберігається, що пояснюється утворенням дефекту структури - вакансії в області, сусідній із заміщеним атомом (рис.1.11,б).

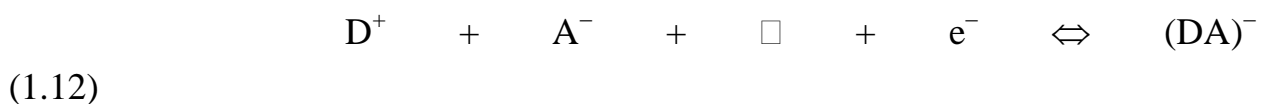


а - утворення нейтральної іонної пари (іон донора розташовується в міжвузловині); б - утворення зарядженого комплексу типу  $(DA)^-$

Рисунок 1.11 – Схеми утворення іонних комплексів в кристалічній решітці кремнію в результаті взаємодії домішок донорного і акцепторного типа:

Такий дефект виникає із-за напруг в решітках, викликаних невідповідністю розмірів домішкового атома з атомом напівпровідника, що зростає при підвищенні температури.

Тоді рухомий донор може зайняти місце вакансії і утворити з акцептором заряджений комплексний іон типу  $(DA)^-$ . Такий процес протікає по реакції



де  $\square$  - вакансія.

Слід зазначити, що вплив структурних дефектів (вакансій, дислокацій, меж блоків і ін.) на електричні властивості напівпровідника порівняльний невелике. Основний вплив на електричні властивості напівпровідника роблять електрично активні домішки, що залишаються в ньому після вирощування або що вводяться в процесі легування (при вирощуванні монокристалів з рідкої або газової фаз або при хіміко-термічній, дифузійній обробці твердого напівпровідника в процесі виготовлення приладів). Відповідно до впливу на електричні властивості напівпровідника, домішкові елементи можна розділити на чотири основні групи.

Перша - нейтральні домішки, що не приводять до виникнення в напівпровіднику нових носіїв зарядів.

Друга і третя - прості акцептори і донори, кожен атом яких заміщає атом напівпровідника в його кристалічній решітці. В результаті в напівпровіднику виникає одна дірка або один електрон. Для простого донора можливий і інший механізм утворення носія заряду. В цьому випадку атом донорної домішки розташовується в міжвузловині (див. рис.1.11, а) і, легко іонізуючись, віддає один валентний електрон, збільшуючи тим самим загальне число електронів провідності.

Остання група - домішки, що створюють глибокі рівні, які, потрапляючи в грати напівпровідника, викликають виникнення в його забороненій зоні енергетичних рівнів, лежачих на великих (більше 0,01 eV) відстанях від верхньої межі валентної зони або від нижньої межі зони провідності, чим рівні, що створюються простими акцепторами або донорами. Особливістю поведінки таких домішок в напівпровідниках є те, що вони можуть утворювати тверді розчини заміщення, створювати декілька донорних або акцепторних рівнів, а також одночасно як донорні, так і акцепторні рівні.

При вирощуванні монокристалів кінцева їх електропровідність визначається переважаючою (надмірним) кількістю донорної або акцепторної домішки. При переважанні донорної домішки електропровідність в монокристалі створюється надмірними електронами, і електропровідність в цьому випадку називається електронна, тобто монокристал володіє електропровідністю **n**-типу. У разі переважання акцепторної домішки електропровідність називається діркова, із-за переважання в монокристалі створених акцепторами дірок, тобто монокристал володіє електропровідністю **p**-типу. Подібний стан напівпровідникового матеріалу можна ілюструвати схемою на рис.1.12.

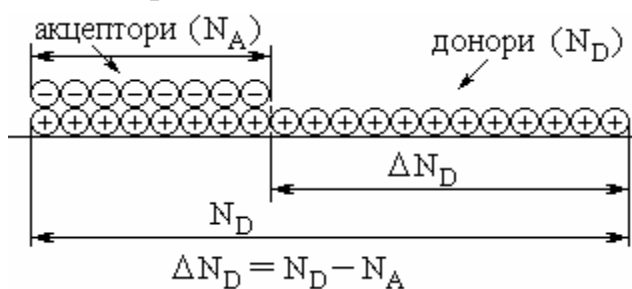


Рисунок 1.12 – Схема утворення електропровідності n-типу

У приведенному випадку переважаючою домішкою є донорна домішка. Різницева концентрація донорної домішки  $N_D$  створює електронні тип (n-тип) електропровідності напівпровідникового монокристала. Наявні в матеріалі акцепторні домішки  $N_A$  компенсовані такою ж кількістю донорної домішки ( $N_D - \Delta N_D = N_A$ ) і не впливають на тип електропровідності матеріалу. У подібних випадках акцепторна домішка компенсована частиною із загальної кількості донорної домішки, а сама акцепторна домішка називається компенсуючою домішкою. Відношення  $\gamma_D = N_A/N_D$  називається ступенем компенсації напівпровідникового матеріалу. Для випадку, коли переважаючою є акцепторна домішка, на схемі рис.1.12 донори і акцептори міняються місцями. В цьому випадку  $\Delta N_A = N_A - N_D$  і дірковий тип електропровідності створюється різницевою концентрацією  $N_A$ . Ступінь компенсації такого матеріалу визначається співвідношенням  $\gamma_A = N_D/N_A$ . Питомий електричний опір легованого напівпровідникового матеріалу визначається надмірною концентрацією донорної або акцепторної домішок

$$\rho_n = \frac{1}{e \cdot \mu_n \cdot \Delta N_D}; \quad \rho_p = \frac{1}{e \cdot \mu_p \cdot \Delta N_A};$$

Таким чином, концентрацією акцепторної або донорної домішки регулюється питомий електричний опір вирощуваних напівпровідникових матеріалів. Величина питомого електричного опору і тип електропровідності матеріалу визначається видом напівпровідникових приладів. Основою більшості напівпровідникових приладів є межа розділу між матеріалами n- і p-типу електропровідності, тобто наявність p-n-переходу. Для прикладу розглянемо процеси на p-n-переході, які використовуються для створення діодної структури (напівпровідникового приладу – діода – перетворювача змінного струму в постійний), рис.1.13. При створенні в одній області напівпровідника за рахунок акцепторної домішки діркового типу електропровідності (p-тип), а в іншій області за рахунок донорної домішки електронного типу електропровідності (n-тип), на межі цих областей виникає тонкий перехідний шар, p-n-перехід, який володіє особливими властивостями. У цьому шарі, в результаті дифузії носії заряду переміщуються звідти, де їх концентрація більша, туди, де їх концентрація менша. Таким чином, з напівпровідника p-типу в напівпровідник n-типу дифундують дірки, а з напівпровідника n-типу в напівпровідник p-типу



дифундують електрони, рис.1.13,а. При цьому вони об'єднуються з наявними в сусідніх областях основними носіями протилежного знаку, тобто рекомбінують.

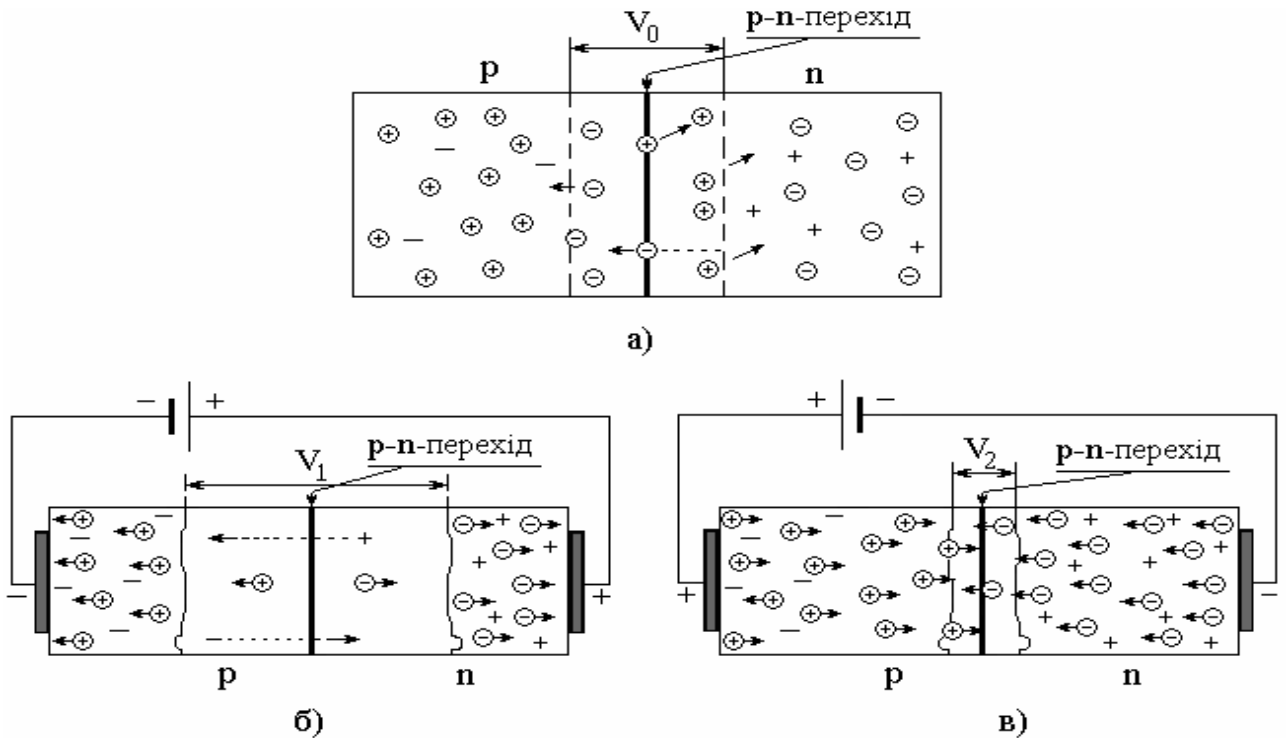


Рисунок 1.13 – Схема роботи p-n-переходу за відсутності напруги а) у при прямому б) і зворотному включенні напруги в)

В цьому випадку, біля кордону перехідного шару виникає область збіднена рухомими основними носіями заряду і що володіє високим опором. Нерухомі іони, що залишаються по обидві сторони граничного шару створюють однакові по значенню, але різні по знаку просторові об'ємні заряди: у шарі р-типу – негативний заряд, а в шарі n-типу – позитивний заряд. Цей подвійний електричний шар створює електричне поле  $V_0$ , яке перешкоджає подальшому проникненню носіїв заряду і виникає стан рівноваги. При зворотному підключенні джерела струму, тобто до області р-типу електропровідності приєднаний негативний полюс джерела, а до області n-типу електропровідності – позитивний полюс виникає поле, і електрони і дірки під впливом цього поля у великій кількості відштовхуватимуться в глиб відповідних областей напівпровідників. Зовнішня напруга відштовхує електрони глибше всередину n-області, а дірки в глиб р-області напівпровідника, рис.1.13,б. Іонізовані атоми домішок не рухаються під дією поля, тому при відході носіїв заряду від межі p-n-переходу походить

розширення подвійного шару об'ємних зарядів. Оскільки в цьому шарі не міститься вільних носіїв зарядів, то він володіє високим опором і в ланцюзі напівпровідникового діода електричного струму практично не буде (у реальних умовах незначній кількості неосновних носіїв зарядів (позитивних) з n-області і (негативних) з p-області, що мають великі швидкості, вдається проскочити p-n-перехід, і в ланцюзі протікатиме вельми невеликий струм, який називається зворотним струмом). Подвійний електричний шар, що утворився в цьому випадку  $V_1$  аналогічний конденсатору, в якому роль діелектрика грає ширина p-n-переходу (замикаючий шар), має значний опір. Місткість p-n-переходу, виникає в цьому випадку носить назву бар'єрної. При прямому підключенні джерела струму, тобто коли до області p-типу електропровідності приєднаний позитивний полюс джерела, а до області n-типу електропровідності – негативний полюс, виникає поле, і електрони і дірки під впливом цього поля ряснітимуть притягуватимуться до p-n-переходу, рис.1.13,в. В цьому випадку подвійний електричний шар  $V_2$  зменшується (тобто товщина p-n-переходу зменшиться). Все це полегшує перехід електронів в p-область і дірок в n-область напівпровідника. В результаті опір p-n-переходу зменшується і забезпечується протікання електричного струму. Такий стан означає, що p-n-перехід буде відімкнений і через нього піде прямий струм. Така властивість p-n-переходу забезпечує його використання при перетворенні змінного струму в постійний, рис.1.14.

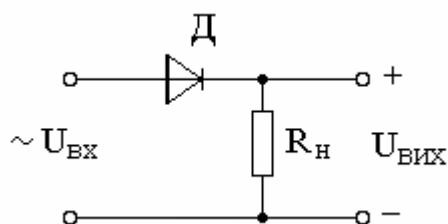


Рисунок 1.14 – Схема включення напівпровідникового діода для випрямлення змінного струму

При підключенні змінного струму в ланцюг його верхня півхвиля співпадає з прямим підключенням діода (p-n-перехід буде відімкнений) і струм проходить по ланцюгу. Нижня півхвиля змінного струму створює зворотне підключення діода, і струм через нього не проходитиме. Таким чином, по електричному ланцюгу проходитиме тільки верхня півхвиля

змінного струму, тобто по ланцюгу протікатиме випрямлений – постійний струм.

## Методи вирощування кристалів

Отримання кристалів напівпровідників здійснюють в основному методами, які ділять на дві групи: кристалізація з розплаву і з газової фази. Методи вирощування з розплаву кристалів елементарних і складних речовин мають ряд переваг. Це висока швидкість росту, достатньо хороша відтворюваність властивостей і можливість отримання великих кристалів. Проте ця група методів непридатна для матеріалів, які плавляться з розкладанням, або, якщо спостерігається фазовий перехід в твердому стані. Окрім цього, для деяких речовин, наприклад для оксидів, потрібне використання достатньо високих температур, що також обмежує застосування рідкофазних методів.

Швидкість росту кристала у всіх випадках визначатиметься двома чинниками: швидкістю утворення зародків кристалізації і швидкістю відведення тепла від фронту кристалізації. На формування кристала з розплаву істотний вплив надає і форма фронту кристалізації, оскільки зростання кристала завжди відбувається в напрямку, перпендикулярному фронту кристалізації. Форма фронту кристалізації залежить від способу нагріву і відведення тепла від розплаву і кристал, що росте. Якщо тепло відводиться з периферійної частини кристала, то фронт кристалізації може мати увігнуту форму. Це спостерігається при вирощуванні монокристалів безпосередньо в контейнері, наприклад по методу направленої кристалізації. При витягуванні кристала з розплаву тепло відводиться через кристал, що росте, і фронт кристалізації при цьому може мати опуклу форму. Вочевидь, що в обох випадках в кристалі виникатиме додаткова напруга, проте опуклий фронт є найбільш переважним, оскільки в цьому випадку збільшується вірогідність зникнення в процесі зростання побічних центрів кристалізації.

Слід також враховувати, що практично в будь-якому розплаві присутні домішки, а реальні процеси кристалізації завжди пов'язані з відносно великими швидкостями росту так, що рівновага між розплавом і кристалом, що росте, не встигає встановлюватися, тобто домішка що відтиснеться від фронту кристалізації (при  $K < 1$ ) не встигає рівномірно розподілятися по

розплаву і накопичується поблизу фронту кристалізації. Це приводить до так званого концентраційного переохолодження. Таке явище виникає при недостатньо крутому градієнті температур в експериментальній установці і приводить до переохолодження рідини поблизу фронту кристалізації, оскільки температура плавлення шару виявляється вищою за фактично існуючий розподіл температури (рис. 1.15). У переохоложеній рідині можуть спонтанно виникати нові центри кристалізації, внаслідок чого велика вірогідність зростання полікристала. Щоб уникнути цього необхідно створювати як можна крутіший градієнт температур (рис.1.15, б).

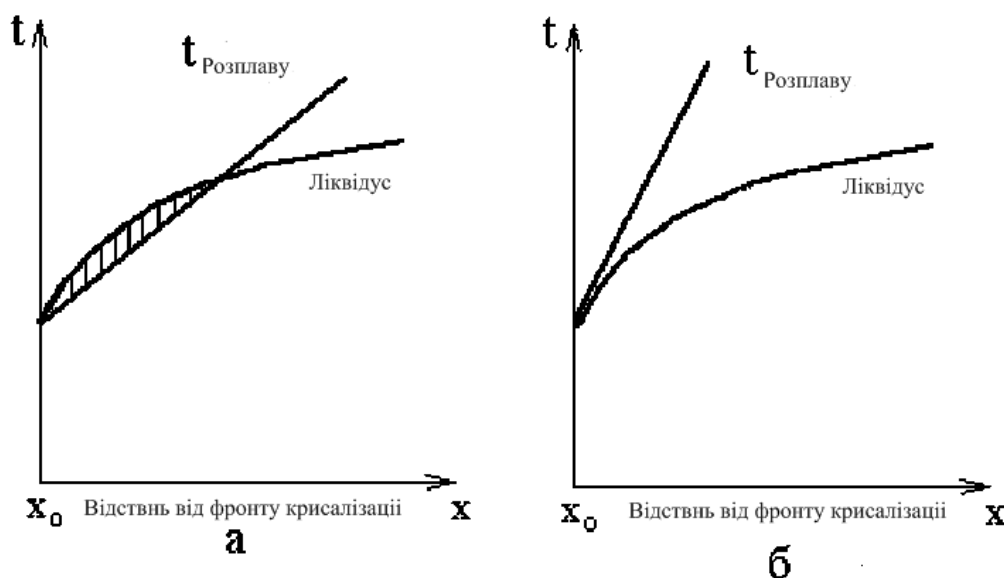


Рисунок 1.15 – Кристалізаційне переохолодження (а) і спосіб його усунення (б)

При вирощуванні монокристалів використовують ряд технічних прийомів, наприклад, встановлення теплового екрану, що дозволяє ліквідувати або значно понизити вплив вказаних недоліків.

Вирощування кристалів може здійснюватися як з монокристалічною затравкою, так і без неї. В цьому випадку використовують капіляр, який сприяє розвитку кристалічного зародка в одному напрямі.

Всі методи вирощування монокристалів з розплаву можна умовно розділити на три групи: направлена кристалізація в контейнері; витягування кристала з розплаву і зростання кристала на «п'єдесталі». Процес може здійснюватися в інертному середовищі, у вакуумі або в атмосфері якогось газу. У останньому випадку вирощування кристала проводять, якщо

дана речовина частково розкладається з виділенням газоподібного компоненту.

Розглянемо деякі найбільш поширені методи вирощування монокристалів кристалізацією з розплавів (рис. 1.16).

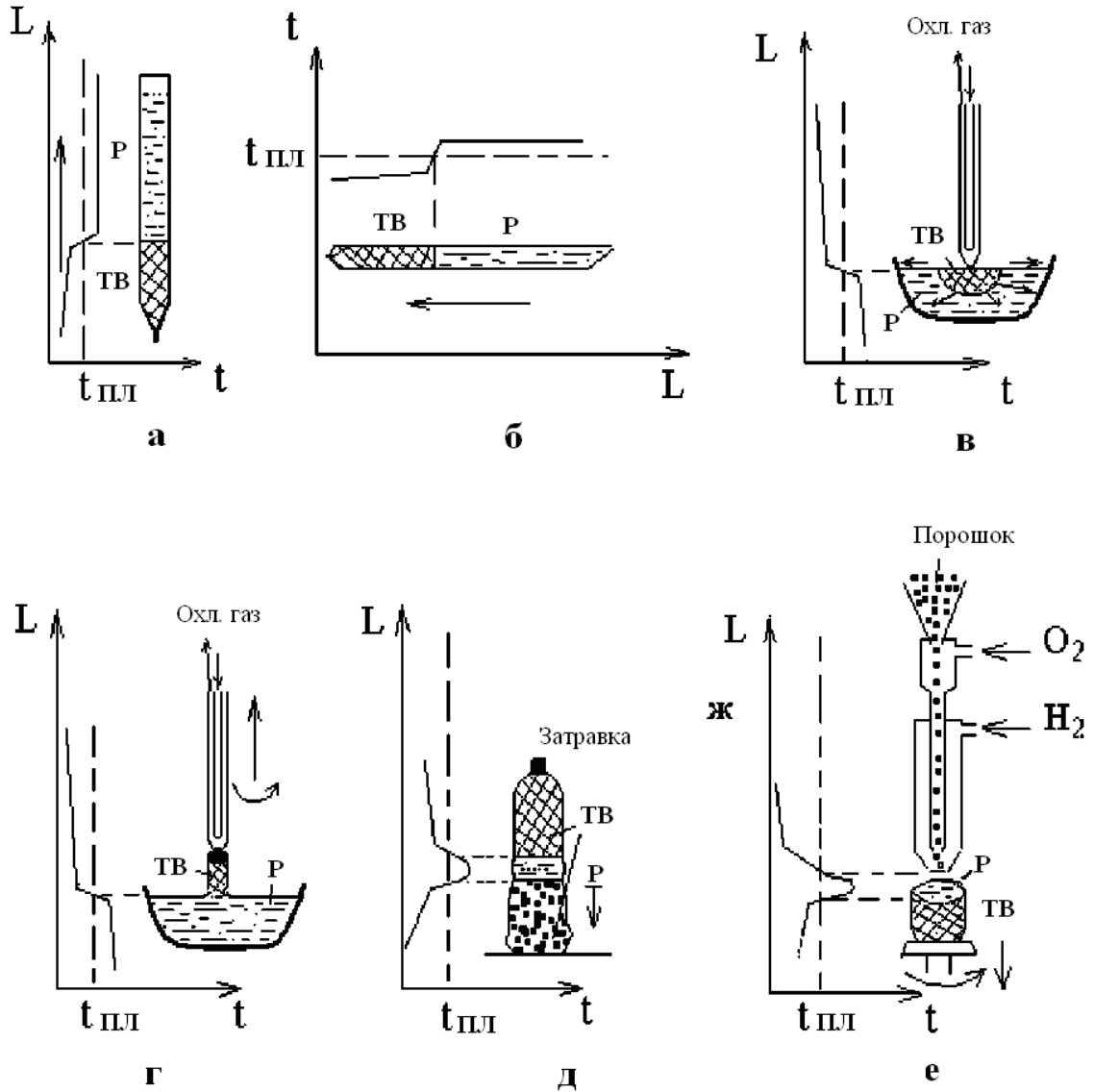


Рисунок 1.16 – Схематичне зображення методів вирощування монокристалів. Направлена кристалізація у вертикальному (а) і горизонтальному (б, в) контейнерах; витягування монокристала з розплаву (г); вирощування на «п'єдесталі» по методу Хорна (д) і Вернейля (е)

Направлена кристалізація найчастіше здійснюється в контейнерах вертикальної або горизонтальної форми, причому розплав кристалізується поступово від одного кінця контейнера до іншого (рис. 1.16, а, б).

Вирощування кристала цим методом зазвичай суміщають з його очисткою. Розглянемо більш детально деякі з варіантів направленої кристалізації.

По методу Шубникова (1924 р.) використовується вертикальний контейнер (рис. 1.16, *a*), причому він має на кінці капіляр для утворення одного зародка. Піч з температурним градієнтом переміщається відносно контейнера.

Горизонтальний варіант направленої кристалізації по методу Бріджмена (1925 р.) використовує контейнер, що має конічну верхню частину, що сприяє утворенню єдиного зародка. В цьому випадку контейнер переміщається відносно печі.

Метод Стокбакера (1939 р.) аналогічний методу Бріджмена, тільки в цьому випадку використовуються дві печі, між якими встановлюється металевий тепловий екран для збільшення температурного градієнта, що сприяє дифузійному відтисненню домішок углиб розплаву і покращує умови очищення вирощуваного монокристала.

Метод Киропулоса (1926 р.) частіше використовується для вирощування кристалів великого діаметру (рис. 1.16, *в*). Кристалізація розплаву здійснюється в контейнері за рахунок відведення тепла через точковий контакт розплаву з охолоджуваним «пальцем» з затравкою, який вводиться в поверхневу частину розплаву в середину контейнера, що має невелику глибину. Відведення тепла в цьому варіанті направленої кристалізації здійснюється через кристал, що росте, що робить профіль фронту кристалізації опуклим, що, як вже наголошувалося, переважніше.

По методу Капіци (1928 р.) використовується горизонтальний варіант направленої кристалізації (див. рис. 1.16, *б*) з монокристалічною за-травкою на кінчному кінці. В принципі, цей метод аналогічний методу Бріджмена.

Вибір вертикального або горизонтального варіанту направленої кристалізації найчастіше обумовлений різницею в щільності розплаву і твердої фази даної речовини. Якщо щільність твердої фази менша, що спостерігається, наприклад, для кремнію і інших алмазоподібних напівпровідників, то для уникнення спливання кристала використовують горизонтальний варіант. У всіх випадках направленої кристалізації, окрім методу Киропулоса, відведення тепла здійснюється через периферійну частину, роблячи фронт кристалізації увігнутих, тобто менш переважним для вирощування кристала.

Витягування кристала з розплаву було вперше використане Нансеном в 1915 р. Для вирощування кристала він використовував монокристалічну приманку, яка встановлювалася на охолоджуваному вертикальному штоці, з малою швидкістю що переміщається вгору.

Метод Чохральського (1918 р.) один з найбільш поширених методів вирощування напівпровідникових кристалів (рис. 1.16, з). Він є подальшим вдосконаленням методу Нансена. У цьому методі може використовуватися як готова монокристалічна затравка, так і затравка, вирощена в капілярі, укріпленому на кінці охолоджуваного вертикального пальця, який ще і обертається навколо осі. Обертання кристала при витягуванні з розплаву покращує умови кристалізації і очищення монокристала від домішок за рахунок кращого перемішування розплаву поблизу фронту кристалізації. Для з'єднань, що розкладаються, наприклад напівпровідників групи  $A^{III}B^V$ , процес проводять в запаяній ампулі. Витягування монокристала здійснюють переміщенням зовнішнього магніта уздовж камери вирощування. Такий процес вимагає використання підвищеного тиску легколетючого компоненту і використовується порівняно рідко.

Вирощування монокристалів на «п'єдесталі» по методу Хорна (1952 р.) (рис. 1.16, д) здійснюється таким чином. Полікристалічна заготовка, що виконується найчастіше звичайним пресуванням порошкоподібної початкової сировини, поміщається в піч із зоною, що переміщається (плаваючою). У розплавлену частину (зону) вводиться монокристалічну затравку. Готовий кристал утворюється за допомогою повільного переміщення розплавленої зони уздовж пресованої заготовки. Іноді його просто витягають з розплавленої частини, яка поволі переміщується у зворотному напрямі. По суті, це комбінація методів витягування з розплаву і зонної плавки.

По методу Вернейля (1902 р.) початковий порошкоподібний матеріал подається в полум'я пальника з температурою вище за його температуру плавлення, наприклад водневою, де розплавляється. Розплав кристалізується на готовій затравці, яка поміщається на тугоплавкий п'єдестал і обертається (рис. 1.16, е). У міру зростання розплавленої зони, порошок додають в полум'я пальника, поволі пересуваючи п'єдестал разом з приманкою вниз, що забезпечує необхідну швидкість кристалізації. Полум'я пальника регулюють так, що у верхній частині речовина залишається в розплавленому стані і зчіплюється з рештою частини завдяки поверхневому натягненню. Цей метод використовується для вирощування монокристалів оксидів з високою

температурою плавлення, наприклад  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рубін, сапфір),  $\text{ZrO}_2$  та ін. Його істотним недоліком є важкість отримання кристалу великого діаметру і постійного перетину.