

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

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни «Електротехнічні матеріали»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого рівня вищої освіти

Електромеханіка

за темою № 12 - Домішкова провідність напівпровідників

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.01.2023 № 1

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Протокол від 19.12.2022 № 5

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 27.01.2023 № 1

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 10.12.2022 № 8.

Розробник:

1. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, Волканін Є.Є.
2. Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, спеціаліст першої категорії, Голованов С.Л.

Рецензенти:

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

План лекції:

1. Концентрація носіїв заряду в домішковому напівпровіднику.
2. Рухливість. Питома провідність напівпровідників.
3. Нерівноважні носії заряду. Рекомбінація.

Рекомендована література:**Основна:**

1. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник / В. О. Леонтьєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 122 с.
2. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали). Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с.
3. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.–344 с.; ч.2, 2004. – 368 с.

Допоміжна:

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електротехнічні матеріали» для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Укладачі: Будько М.О., Кириленко В.М., Кириленко К.В., Затверджено Вченою радою ФЕА НТУУ «КПІ» (Протокол № 11 від 23 червня 2015 р.) К.: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016. – 94 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. <http://electricalschool.info/spravochnik/material/310-klassifikacija-jelektrotekhnicheskikh.html>
2. <http://lib.madi.ru/fel/fel1/fel08E024.pdf>
3. <https://www.twirpx.com/files/science/tek/ematerials/>

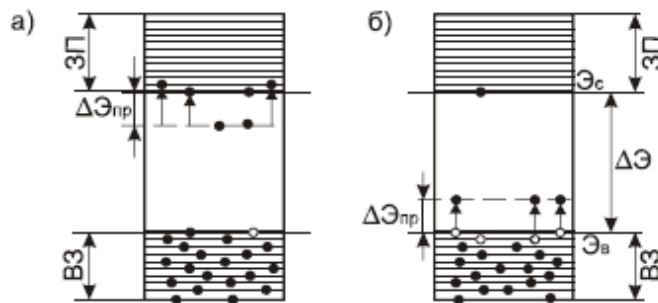
Текст лекції

1. Концентрація носіїв заряду в домішковому напівпровіднику.

Домішкова провідність забезпечується зарядами домішок.

Домішки створюють дрібні енергетичні рівні в забороненій зоні напівпровідника. Завдяки малій величині енергії іонізації домішки ($\Delta E_{\text{пр}} = 0,01 \dots 0,1 \text{ eV}$), в напівпровіднику можуть виникати значні струми при слабких енергетичних впливах. Роль домішок виконують не тільки легуючі елементи, спеціально вводяться в напівпровідник, але і різні дефекти структури, перш за все, вакансії і межузельні атоми. Розрізняють два типи домішок: донорні і акцепторні.

Донорні домішки поставляють електрони в зону провідності напівпровідника. Енергетичні рівні донорної домішки розташовані в забороненій зоні напівпровідника поблизу дна зони провідності (рис. А). При зовнішньому енергетичному впливі валентні електрони домішки легко переходять в зону провідності напівпровідника, створюючи провідність n-типу.



Енергетичні діаграми напівпровідника з донорной (а) і акцепторной (б) домішками

Для елементів IV групи (германію і кремнію) донорами є-ються елементи V групи - миш'як (As), сурма (Sb), фосфор (P)

Акцепторні домішки захоплюють валентні електрони напівпровідника. Акцептори мають незаповнені енергетичні рівні, розташовані в забороненій зоні напівпровідника поблизу стелі валентної зони (рис. Б). При зовнішньому енергетичному впливі частина валентних електронів напівпровідника переходить на вільні рівні акцепторной домішки, і в його валентній зоні відбувається естафетної переміщення валентних електронів від атома до атома, від дірки до дірки.

Акцептори забезпечують провідність р-типу. Для германію та кремнію акцепторами є елементи 3-ї групи - бор (B), алюміній (Al), галій (Ga), індій (In).

Основні і неосновні носії заряду. У домішковому напівпровіднику n-типу основними носіями заряду є електрони, але є і деяка концентрація дірок, які є неосновними носіями заряду. У напівпровіднику р-типу дірки - основні носії заряду, а електрони - неосновні.

У невідродженому напівпровіднику при будь-якій температурі в умовах термодинамічної рівноваги твір концентрації основних і неосновних носіїв

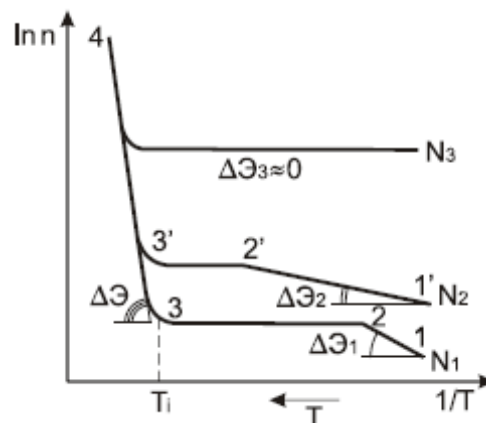
заряду (рівноважних електронів n_0 і дірок p_0) є величина постійна, яка не залежить від вмісту домішок

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2,$$

де n_i - власна концентрація носіїв заряду при даній температурі.

Цей вислів називають співвідношенням діючих мас для носіїв заряду. Наприклад, якщо в напівпровіднику n-типу збільшити концентрацію донорів, то зросте число електронів, що переходять з примісних рівнів в зону провідності. Відповідно зросте швидкість рекомбінації носіїв заряду і зменшиться рівноважна концентрація дірок, так що твір $n_0 \cdot p_0$ збережеться незмінним. Закон діючих мас можна застосовувати тільки до рівноважним концентраціям і дозволяє визначити концентрацію неосновних носіїв заряду, якщо вона відома для основних.

Розглянемо температурну залежність концентрації носіїв заряду в напівпровіднику n-типу (рис.). При малій концентрації донорної домішки N_1 нагрів в області низьких температур збільшує іонізацію атомів домішки і, відповідно, підвищується концентрація вільних електронів в зоні провідності. Кут нахилу прямої на ділянці 1-2 характеризує енергію іонізації домішки. При температурі, що відповідає точці 2, атоми домішки повністю іонізовані, і всі електрони домішкових рівнів виявляються перекинутими в зону провідності. На ділянці 2-3 концентрація носіїв заряду зберігається постійною, рівною концентрації донорів N_1 . Ця ділянка називають областю виснаження домішки. При температурі вище точки 3 концентрація носіїв заряду різко зростає за рахунок власної провідності напівпровідника (ділянка 3-4). Температура переходу до власної провідності T_i залежить від концентрації домішок і ширини забороненої зони. Кут нахилу ділянки 3-4 визначається шириною забороненої зони напівпровідника



Температурні залежності концентрації носіїв заряду в напівпровіднику при різній концентрації донорної домішки, $N_1 < N_2 < N_3$

Зі збільшенням концентрації домішки ($N_2 > N_1$) концентрація

носіїв заряду зростає, температура виснаження домішки підвищується (точка 2' на рис. 32). Дискретні енергетичні рівні домішкових атомів розщеплюються в домішкові зони, енергія іонізації домішки зменшується (кут нахилу ділянки 1'-2'). При певній високій концентрації домішки $N_3 >$

$N_2 > N_1$ примесная зона перекривається із зоною провідності, енергія іонізації домішки стає рівною нулю. Такий напівпровідник називається виродженим. У виродженому напівпровіднику n-типу концентрація електронів постійна в усій області домішкової провідності.

2. Рухливість. Питома провідність напівпровідників.

Рухливість - це відношення середньої швидкості спрямованого руху (швидкості дрейфу v) до напруженості електричного поля E

$$\mu = v/E, \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}.$$

У напівпровідниках розрізняють рухливість електронів μ_n і рухливість дірок - μ_p .

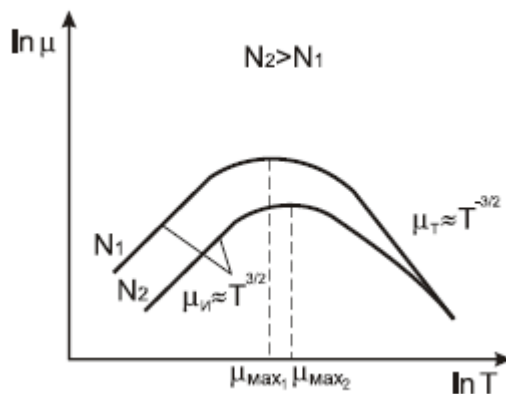
Рухливість в напівпровідниках може бути значно вище, ніж в металах, тобто в погано проводять кристалл електрони можуть рухатися більш вільно. У деяких чистих напівпровідників рухливість становить $10 \text{ м}^2 / \text{В}\cdot\text{С}$ і більш.

У невиродженому напівпровіднику дефекти атомних розмірів мало впливають на розсіювання електронів.

Основні причини розсіювання носіїв заряду в напівпровідниках, що призводять до зменшення їх рухливості, є:

- теплові коливання атомів або іонів кристалічної решітки;
- іонізовані домішкові атоми.

Таким чином, рухливість залежить від температури і концентрації домішки (рис.).



Температурна залежність рухливості носіїв заряду при різній концентрації домішки

В області низьких температур переважає розсіювання на іонізованих атомах домішки: кожен іонізований атом домішки створює навколо себе кулоновское поле, викривляє траєкторію руху носія заряду. Істотний вплив робить концентрація іонізованих домішок $\mu_n \approx T^{3/2} / N_d$, де N_d - концентрація іонізованих атомів домішки.

Розсіювання на іонізованих домішках з ростом температури зменшується, тобто μ_i зростає.

Розсіювання на теплових коливаннях ґрат грає домінуючу роль при підвищених температурах, рухливість зменшується пропорційно $\mu_T \approx T^{-3/2}$.
 результуюча рухливість визначається зі співвідношення:

$$1/\mu = 1/\mu_T + 1/\mu_G.$$

Таким чином, температурна залежність μ виражається кривою з чітко вираженим максимумом. Зі збільшенням концентрації домішки максимальне значення μ зменшується і зміщується в бік більш високих температур.

Рухливість в іонних кристалах нижча, так як розсіювання носіїв заряду на теплових коливаннях іонів набагато інтенсивніше, ніж в решітці з нейтральними атомами.

3. Нерівноважні носії заряду. Рекомбінація.

Крім теплової генерації носіїв заряду, можлива додаткова їх генерація при впливі на напівпровідник електромагнітним випромінюванням, електричним полем і ін., Що призводить до появи надлишкових нерівноважних носіїв заряду

$$\Delta n = n - n_0; \Delta p = p - p_0,$$

де n_0 , p_0 - рівноважні концентрації електронів і дірок від теплового впливу; n , p - повні концентрації електронів і дірок.

Після припинення нетеплового впливу напівпровідник повертається в рівноважний стан, при цьому концентрація нерівноважних носіїв заряду падає до нуля за рахунок процесу рекомбінації.

Розрізняють пряму рекомбінацію і рекомбінацію з участю пасток. При прямій рекомбінації вільний електрон із зони провідності переходить в валентну зону на один з вільних енергетичних рівнів, в результаті зникає пара носіїв заряду - вільний електрон і дірка. Але такий процес рекомбінації малоймовірний. Зазвичай рекомбінація відбувається через проміжні енергетичні рівні, звані пастками.