

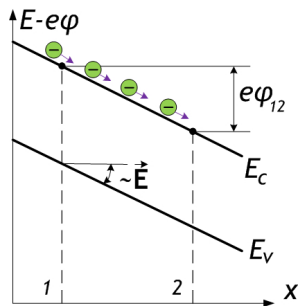
# p-n-перехід

## Модуль 2, лекція 8

Р. Коломієць

12 листопада 2020 р.

## Зонна діаграма напівпровідника в електричному полі



На всіх попередніх зонних діаграмах вважалось, що електричного поля у напівпровіднику немає. Однак коли ви вводимо якусь напівпровідникову деталь у електричне коло, то отримується, що напівпровідник знаходиться в електричному полі, і електрони, які знаходяться у зоні провідності, створюють електричний струм. Тоді зонна діаграма напівпровідника якби “викривлюється” від точки з більшим потенціалом (1) до точки з меншим потенціалом (2). Кутовий коефіцієнт нахилу енергетичних зон при цьому пропорційний напруженості електричного поля  $E$ .

# Процеси перенесення зарядів у напівпровідниках

Процес перенесення зарядів може відбуватися у напівпровідниках при наявності електронів у зоні провідності та при неповному заповненні електронами валентної зони. При виконанні цих умов та за відсутності градієнта температури перенесення носіїв заряду може відбуватися або під впливом електричного поля, або під впливом градієнта концентрації носіїв заряду.

Направлений рух носіїв заряду під впливом електричного поля називають дрейфом.

У результаті дрейфу електрони рухаються в одну сторону, а дірки — в іншу. Таким чином, у напівпровіднику розрізняють електронний та дірковий струми, які направлені протилежно.

## Щільність дрейфового струму

Для електронів у зоні провідності:

$$J_{n_{dr}} = e_0 n \mu_n E,$$

де  $e_0$  — заряд електрона;  $n$  — концентрація електронів у зоні провідності;  $\mu_n$  — рухливість електронів — фізична величина, яка чисельно дорівнює середній швидкості їх направленої руху в електричному полі, напруженість якого дорівнює одиниці.

Для дірок у валентній зоні:

$$J_{p_{dr}} = e_0 p \mu_p E,$$

де  $\mu_p$  — рухливість дірок.

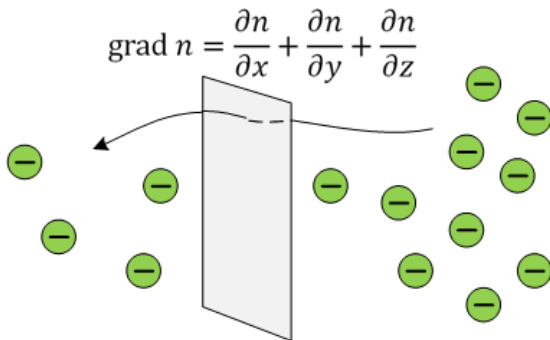
Повна щільність дрейфового струму при наявності вільних електронів та дірок дорівнює сумі електронної та діркової складових:

$$J = J_{n_{dr}} + J_{p_{dr}} = e_0 (n \mu_n + p \mu_p) E = e_0 \gamma E,$$

де  $\gamma = n \mu_n + p \mu_p$  — питома провідність напівпровідника, [См·м].

## Дифузія носіїв заряду

Поведінка вільних електронів та дірок дещо нагадує поведінку молекул газу в замненомк просторі. Так само, як газ заповнює весь доступниу йому простір, так і вільні електрони/дірки заповнюють весь об'єм напівпровідника. В цьому випадку відбувається дифузія — процес вирівнювання концентрації носіїв заряду по напівпровіднику.



Щільність потоку частинок при дифузії (тобто число частинок, яке перетинає одиничну площинку, перпендикулярну напрямку градієнту концентрації, за одиницю часу) пропорційна градієнту концентрації цих частинок:

$$\Phi = -D_m \operatorname{grad} m,$$

де  $D_m$  — коефіцієнт дифузії, який дорівнює абсолютному значенню відношення потоку частинок до градієнту їх концентрації.

Вектор градієнта концентрації направлений у сторону зростання аргумента, а частинки дифундують з області, де їх більше — у область, де їх менше, тобто проти напрямку вектора градієнта.

## Щільність дифузійного струму електронів та дірок

Оскільки електрони мають негативний заряд, то щільність дифузійного струму електронів

$$J_{n_{dif}} = e_0 D_n \text{grad} n$$

Аналогічно, щільність дифузійного струму дірок:

$$J_{p_{dif}} = -e_0 D_p \text{grad} p$$

Коефіцієнти дифузії пов'язані із рухливістю співвідношеннями  
Ейнштейна:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e_0}$$

## Рівняння струмів

При наявності електричного поля та градієнту концентрації носіїв заряду в напівпровіднику загальна щільність струму електронів буде дорівнювати:

$$J_n = J_{n_{dr}} + J_{n_{dif}} = e_0 n \mu_n E + e_0 D_n \text{grad} n$$

а загальна щільність струму дірок буде дорівнювати:

$$J_p = J_{p_{dr}} + J_{p_{dif}} = e_0 p \mu_p E - e_0 D_p \text{grad} p$$

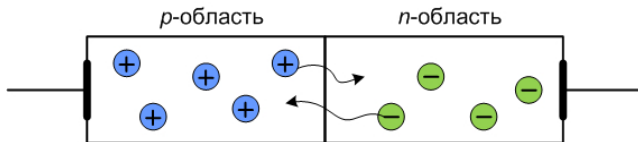
Для розрахунку повного струму слід додати ці дві складові струму і ще додати до них щільність струму зміщення:

$$J = J_n + J_p + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

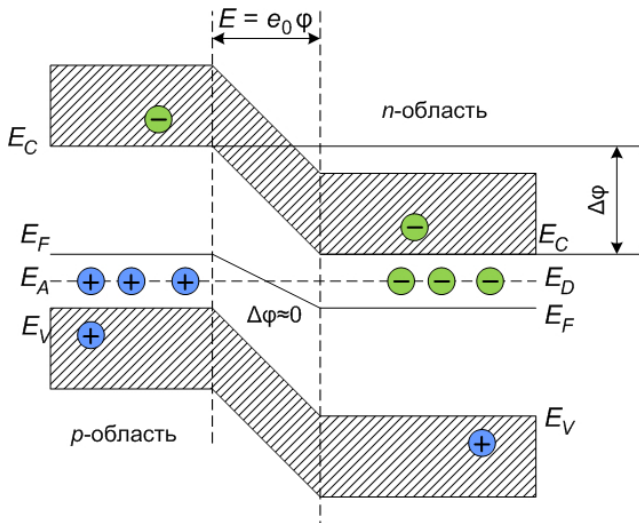


## p-n-перехід

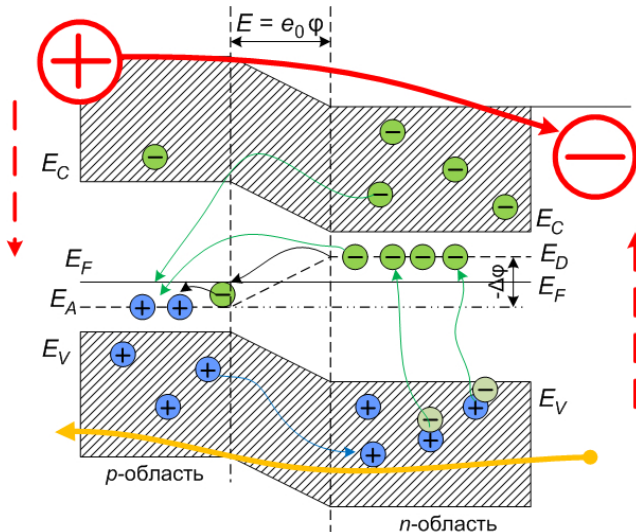
Електронно-дірковий перехід (або p-n-перехід) — це перехідний шар між двома областями напівпровідника з різною електропровідністю, якому існує дифузійне електричне поле. При ідеальному контакті двох напівпровідників з різним типом електропровідності внаслідок градієнту концентрації носіїв заряду виникає їх дифузія в області з протилежним типом провідності. В *n*-області основними носіями заряду є електрони, а неосновними — дірки. В *p*-області навпаки: електрони є неосновними носіями заряду, а дірки — основними.



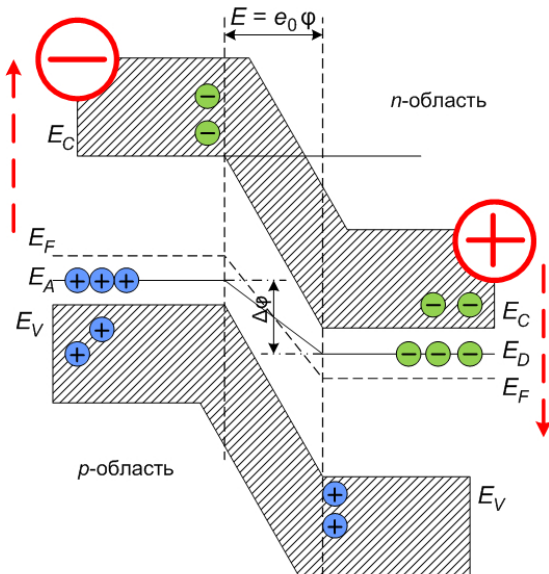
# Зонна діаграма p-n-переходу за відсутності зовнішньої напруги



# Зонна діаграма р-n-переходу при прямому зміщенні

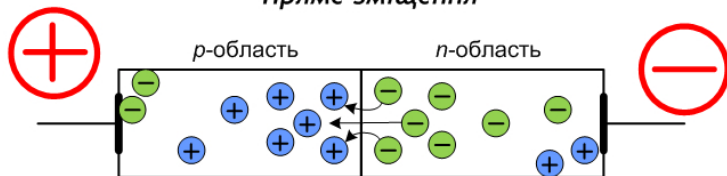


# Зонна діаграма p-n-переходу при зворотному зміщенні

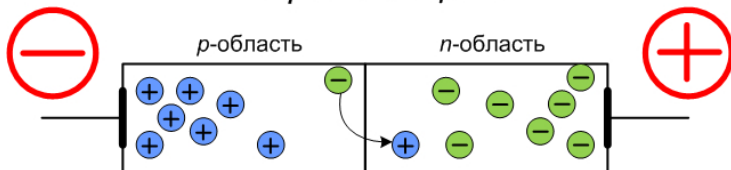


# Схематичне зображення розподілу носіїв заряду

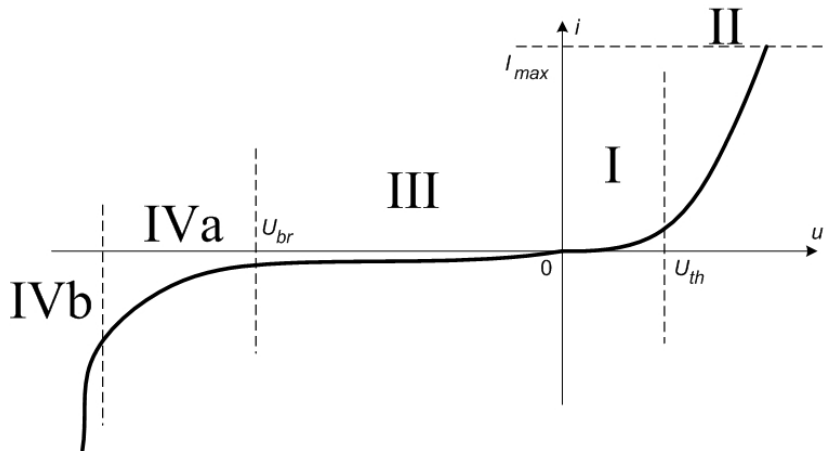
## Пряме зміщення



## Зворотнє зміщення



# Вольт-амперна характеристика р-п-переходу



Тут ми розглянули лише гомо-р-п-перехід. Багато цікавих ефектів (стабілізація напруги, випромінювання світла, тунельний ефект тощо) на ньому не реалізуються — вони реалізуються на геторо-р-п-переході.

Література:

Готра З.Ю., Лопатинський І.Є., Лукіянець Б.А. та ін. Фізичні основи електронної техніки: підручник — Львів: вид-во «Бескид Біт», 2004. — 808 с.