

Урок 16 Електричний струм у напівпровідниках

Мета уроку:

Навчальна: Надати уявлення про природу струму в чистих провідниках; розкрити механізм електропровідності напівпровідників при наявності домішок; формувати знання про основні закономірності електронно-діркового переходу; ознайомити учнів з будовою та призначенням основних напівпровідникових приладів.

Розвивальна. Сприяти збагаченню словникового запасу; формуванню пізнавальної самостійності; розвитку спостережливості, уваги, пам'яті, уяви, мислення; виробленню звички до планування своїх дій.

Виховна. Виховувати уважність, зібраність, спостережливість.

Тип уроку: комбінований

Наочність і обладнання: навчальна презентація, комп'ютер, підручник.

Хід уроку

I. ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ЕТАП

II. АКТУАЛІЗАЦІЯ ОПОРНИХ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ

Технічна можливість створення невеликих за габаритами та масою електронних приладів (радіоприймачі, плеєри, мобільні телефони) з'явилася завдяки розробкам у галузі напівпровідників.

Що ж це за матеріали – напівпровідники – та чому вони надають такі величезні можливості?

III. ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Напівпровідники

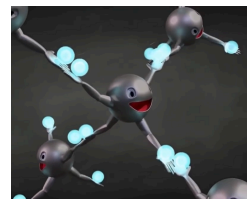
Напівпровідники – це речовини, значення електропровідності яких лежить в межах між провідностями провідників та діелектриків.

Властивості напівпровідників:

- 1) питомий опір напівпровідників зазвичай зменшується з підвищенням температури;
- 2) питомий опір більшості напівпровідників зменшується зі збільшенням освітленості;
- 3) різко зменшити питомий опір напівпровідників може введення домішок.

2. Власна провідність напівпровідників

Пояснимо властивості напівпровідників, розглянувши їхню будову на прикладі чотиривалентного елемента *Германію*. Взаємодія пари сусідніх атомів у кристалі германію здійснюється завдяки *ковалентному зв'язку* (тобто його забезпечують пари валентних електронів, кожний із яких «належить» двом атомам).



Ковалентний зв'язок – це хімічний зв'язок, який утворюється за рахунок спільних електронних пар.

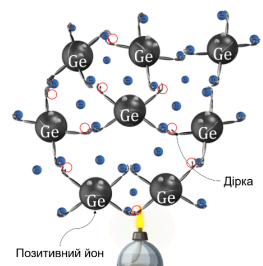
У *темноті* й за *низьких температур*, ковалентні зв'язки германію досить міцні, і він є *діелектриком*.

За підвищення температури кристала (або під дією опромінення світлом, рентгенівськими променями, або за впливу сильних електричних чи магнітних полів) ковалентні зв'язки руйнуються, і, отже, деякі *електрони стають вільними*.

Електронна провідність – це провідність напівпровідників, зумовлена наявністю в них вільних електронів.

На місці кожного розірваного зв'язку утворюється вакантне місце з нестачею електрона. Така конфігурація називається *діркою*.

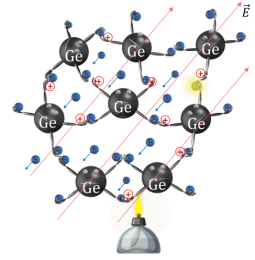
Дірка – це вакантне місце з відсутнім електроном в ковалентному зв'язку.



На вакантне місце (в дірку) може «перестрибнути» електрон від сусіднього зв'язку. Тоді дірка з'явиться біля сусіднього атома. Послідовність таких «стрибків» виглядає так, ніби дірка (позитивний заряд) переміщується в кристалі.

Діркова провідність – це провідність напівпровідників, зумовлену переміщенням дірок.

Власна провідність напівпровідників – це провідність, зумовлена рухом вільних електронів та дірок в чистому напівпровіднику.



3. Провідність напівпровідників з домішками

Проблемне питання

- Чи впливають на провідність напівпровідників домішки?

Власна провідність напівпровідників невелика, оскільки малою є кількість вільних носіїв струму – електронів і дірок. Дуже важлива особливість напівпровідників полягає в тому, що за наявності домішок у них поряд із власною провідністю виникає додаткова – *домішкова провідність*.

Домішкова провідність напівпровідника – це провідність, зумовлена наявністю домішок в напівпровіднику.

Додамо у кристал германію домішку п'ятивалентного елемента, наприклад Арсену. Частина атомів Германію буде заміщена атомами Арсену. Чотири валентні електрони атома Арсену утворюють парні електронні зв'язки із сусідніми атомами Германію; п'ятому валентному електрону зв'язку не вистачить, тому він легко може стати вільним. У результаті майже кожен атом домішки дасть вільний електрон.

Донорні домішки (від латин. *donare* – дарувати, жертвувати) – це домішки, атоми яких відносно легко віддають електрони.

В напівпровідниках із донорними домішками концентрація вільних електронів є значно вищою, ніж концентрація дірок.

Напівпровідники *n*-типу (від латин. *negativus* – негативний) – це напівпровідники з переважно електронною провідністю.

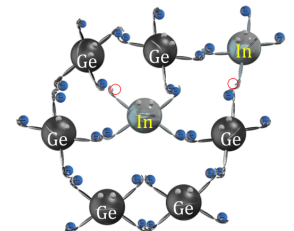
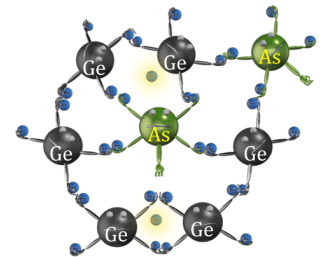
Додамо у кристал германію домішку тривалентного елемента, наприклад Індію. Атом Індію має три валентні електрони, тому він може «встановити зв'язки» тільки з трьома атомами Германію. Щоб утримати структуру кристалічної ґратки, відсутній електрон (четвертий) Індій «запозичує» в атомів Германію. У результаті кожен атом Індію спричиняє утворення дірки.

Акцепторні домішки (від латин. *acceptor* – той, що приймає) – це домішки, атоми яких «запозичують» електрони.

У напівпровідниках із акцепторними домішками основні носії струму – дірки.

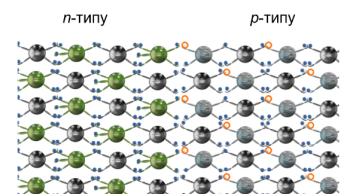
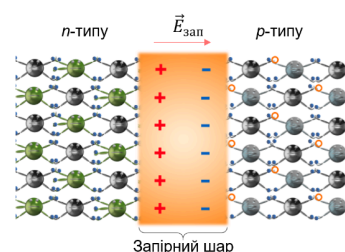
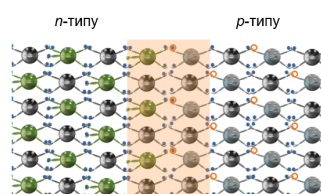
Напівпровідниками *p*-типу (від латин. *positivus* – позитивний) – це напівпровідники з переважно дірковою провідністю.

Змінюючи концентрацію домішки, можна істотно змінити кількість носіїв заряду того або іншого знака, а отже, створити напівпровідники з переважаючою концентрацією або позитивно, або негативно заряджених носіїв.

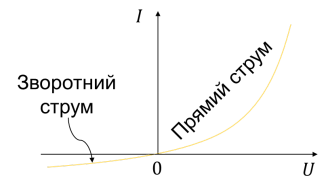


4. Електронно-дірковий перехід

Електронно-дірковий перехід (*p-n*-перехід) – це ділянка контакту двох напівпровідників із різними типами провідності – дірковою (напівпровідник *p*-типу) та електронною (напівпровідник *n*-типу).



Відразу після того як відбувся контакт двох напівпровідників із різними типами провідності, починається процес дифузії електронів і дірок. Електрони дифундують у напівпровідник p -типу, і деякі з них рекомбінують із дірками; дірки «дифундують» у напівпровідник n -типу, і деякі з них рекомбінують із вільними електронами. Тобто відбуваються процеси відновлення зв'язків. Унаслідок цих процесів:

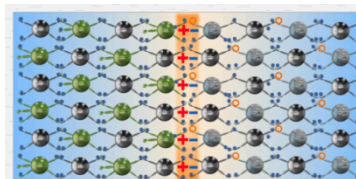
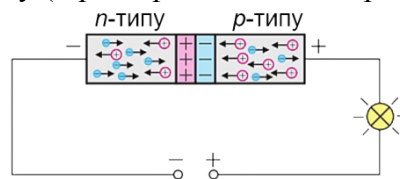


1) у прилеглих до місця контакту ділянках напівпровідників зменшується концентрація вільних носіїв струму (n -ділянка втрачає вільні електрони, p -ділянка – дірки), тому опір ділянки біля місця контакту істотно збільшується;

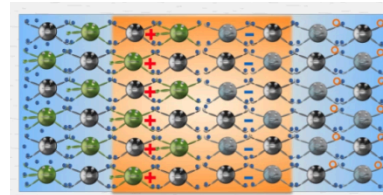
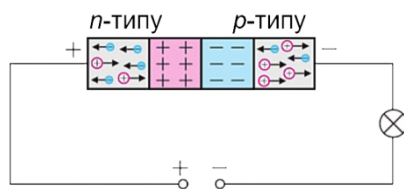
2) прилегла до місця контакту n -ділянка набуває позитивного заряду; прилегла до місця контакту p -ділянка набуває негативного заряду.

Таким чином, навколо місця контакту формується подвійний *запірний шар* (p - n -перехід), електричне поле якого ($\vec{E}_{\text{зап}}$) перешкоджає подальшій дифузії електронів і дірок.

Якщо підключити p - n -перехід у *прямому ввімкненні*, тобто приєднати позитивний полюс джерела струму до p -зони, а негативний – до n -зони, то заряд через pn -перехід переноситимуть *основні носії* заряду (дірки з p -зони та електрони з n -зони). При цьому запірний шар звужується.



Якщо підключити pn -перехід у *зворотному ввімкненні*, тобто приєднати позитивний полюс джерела струму до n -зони, а негативний – до p -зони, то заряд через pn -перехід переноситимуть *неосновні носії* заряду (електрони з p -зони та дірки з n -зони). При цьому запірний шар стає більш широким.



pn-перехід має односторонню провідність: він пропускає помітний струм від p - до n -зони і лише дуже малий струм у зворотному напрямі.

5. Приклади напівпровідникових пристроїв

Напівпровідниковий діод – це пристрій, що містить p - n -перехід і здатен пропускати струм в одному напрямку та не пропускати в протилежному.

Термо- і фоторезистори – це прилади, дія яких ґрунтується на використанні залежності опору напівпровідників від температури (освітленості).

Транзистор – це напівпровідниковий елемент електронних схем із трьома електродами, один з яких служить для керування струмом між двома іншими.

Світлодіод (англ. *LED – light-emitting diode*) – це напівпровідниковий пристрій, що випромінює світло, коли через нього проходить електричний струм.

Інтегральна мікросхема – мініатюрний мікроелектронний виріб, елементи якого нерозривно зв'язані конструктивно, технологічно та електрично.

IV. ЗАКРІПЛЕННЯ НОВИХ ЗНАНЬ І ВМІНЬ

1. Щоб дістати домішкову провідність потрібного типу, в напівпровідниковій техніці часто застосовують фосфор, галій, миш'як, індій та сурму. Який з цих елементів можна ввести в германій як домішку, щоб мати електронну провідність?

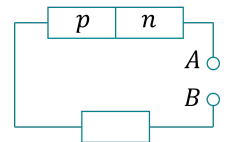
Валентність германію дорівнює 4, отже, для отримання домішки електронної провідності в германій необхідно додати в якості домішки елементи з валентністю 5. Серед перерахованих в умові завдання це фосфор, миш'як, сурма.

2. Доведіть міркуванням, що сполука InAs (арсенід індію), в якій кількості речовини (в молях) індію та миш'яку однакові, матиме провідність типу власної провідності елементів четвертої групи (Ge, Si). Якого типу буде провідність, якщо збільшити концентрацію індію? миш'яку?

Так як кількість речовини індію та миш'яку рівні, то утворюється однакова кількість вільних електронів і дірок. В цьому випадку утворюється власна електропровідність. При збільшенні концентрації індію буде діркова провідність, миш'яку – електронна.

3. На рисунку наведено схему прямого ввімкнення напівпровідника з p - n -переходом у коло постійного струму. Якою є полярність підключення джерела струму до клем A і B ?

Щоб підключити p - n -перехід у *прямому напрямі*, необхідно приєднати позитивний полюс джерела струму до p -зони ($B \llcorner +$), а негативний – до n -зони ($A \llcorner -$), то заряд через pn -перехід переноситимуть *основні носії* заряду (дірки з p -зони та електрони з n -зони). При цьому запірний шар звужується.



4. До кінців кола, що складається з послідовно ввімкнених термістора та резистора опором 1 кОм, подали напругу 20 В. При кімнатній температурі сила струму в колі була 5 мА. Коли термістор занурили у гарячу воду, сила струму стала 10 мА. У скільки разів змінився опір термістора?

Дано:

$$R_p = 1 \text{ кОм} =$$

$$= 1 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$U = 20 \text{ В}$$

$$I_1 = 5 \text{ мА} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$I_2 = 10 \text{ мА}$$

$$= 10 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$\frac{R_{\tau 1}}{R_{\tau 2}} = ?$$

Розв'язання

Опір кола, що складається з послідовно ввімкнених термістора опором R_{τ} та резистора опором R_p :

$$R = R_{\tau} + R_p$$

Сила струму в колі при початковій температурі дорівнює:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{U}{R_{\tau 1} + R_p} \Rightarrow R_{\tau 1} = \frac{U}{I_1} - R_p$$

Сила струму в колі після нагрівання дорівнює:

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{U}{R_{\tau 2} + R_p} \Rightarrow R_{\tau 2} = \frac{U}{I_2} - R_p$$

$$\frac{R_{\tau 1}}{R_{\tau 2}} = \frac{\frac{U}{I_1} - R_p}{\frac{U}{I_2} - R_p} \quad \left[\frac{R_{\tau 1}}{R_{\tau 2}} \right] = \frac{\frac{20}{5 \cdot 10^{-3}} - 1 \cdot 10^3}{\frac{20}{10 \cdot 10^{-3}} - 1 \cdot 10^3} = \frac{3 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 3$$

$$\frac{R_{\tau 1}}{R_{\tau 2}} = \frac{\frac{20}{5 \cdot 10^{-3}} - 1 \cdot 10^3}{\frac{20}{10 \cdot 10^{-3}} - 1 \cdot 10^3} = \frac{3 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} = 3$$

$$\text{Відповідь: } \frac{R_{\tau 1}}{R_{\tau 2}} = 3.$$

5. Знайдіть загальну силу струму в ділянці кола (див. рисунок) під час протікання струму: 1) від A до B ; 2) від B до A . Діод є ідеальним, всі резистори мають однаковий опір 2 Ом , напруга, підведена до ділянки кола, 36 В .

Дано:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

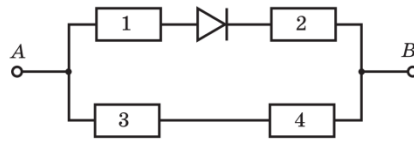
$$= R_0 = 2\text{ Ом}$$

$$U = 36\text{ В}$$

$$I_{AB} - ?$$

$$I_{BA} - ?$$

Розв'язання



1) Струм протікає від A до B :

На ділянці 1-2 діод має пряме ввмикнення, тому струм протікає.

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 2R_0$$

$$R_{34} = R_3 + R_4 = 2R_0$$

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_0} \quad R_{AB} = R_0$$

$$I_{AB} = \frac{U}{R_{AB}} = \frac{U}{R_0} \quad [I_{AB}] = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \frac{\text{В}}{\frac{\text{В}}{\text{А}}} = \text{А}$$

$$I_{AB} = \frac{36}{2} = 18\text{ (А)}$$

2) Струм протікає від B до A :

На ділянці 1-2 діод має зворотне ввмикнення, тому струм не протікає.

$$R_{BA} = R_{34} = R_3 + R_4 = 2R_0$$

$$I_{BA} = \frac{U}{R_{BA}} = \frac{U}{2R_0} \quad [I_{BA}] = \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = \frac{\text{В}}{\frac{\text{В}}{\text{А}}} = \text{А}$$

$$I_{BA} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9\text{ (А)}$$

Відповідь: $I_{AB} = 18\text{ А}$; $I_{BA} = 9\text{ А}$.

V. ПІДБИТТЯ ПІДСУМКІВ УРОКУ

Бесіда за питаннями

1. Якими є основні властивості напівпровідників?
2. Поясніть механізм власної провідності напівпровідників.
3. Як зміниться опір чистого напівпровідника, якщо додати домішку?
4. Яку домішку називають донорною?
5. Яку домішку потрібно ввести, щоб одержати напівпровідник p -типу?
6. Як можна виготовити кристал із електронно-дірковим переходом?
7. Чому напівпровідниковий кристал із p - n -переходом має однобічну провідність?
8. Що таке напівпровідниковий діод? Наведіть його позначення на електричній схемі.

VI. ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

Опрацювати § 9, Вправа № 9 (1, 3)

Додаткові задачі

1. У кристал Германію як домішку додали: а) Фосфор, б) Індій, в) Арсеній. Яку провідність матиме Германій у кожному випадку?

а) n -типу; б) p -типу; в) n -типу.

2. У кристал Германію в якості домішки додали: а) Бор, б) Стилій, в) Галій. Яку провідність матиме Германій у кожному випадку?

а) p -типу; б) n -типу; в) p -типу.

3. Фоторезистор, який у темряві має опір 25 кОм, ввімкнено послідовно з резистором, що має опір 5 кОм. Коли фоторезистор освітили, сила струму в колі (при тій самій напрузі) збільшилася в 4 рази. Визначити опір фоторезистора.

Дано:

$$R_{\phi 1} = 25 \text{ кОм} =$$

$$= 25 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$R_p = 5 \text{ кОм} =$$

$$= 5 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

$$I_2 = 4I_1$$

$$U = U_1 = U_2$$

$$R_{\phi 2} = ?$$

Розв'язання

Опір кола, що складається з послідовно ввімкнених фоторезистора опором R_{ϕ} та резистора опором R_p :

$$R = R_{\phi} + R_p$$

Сила струму в колі у темряві: $I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{U}{R_{\phi 1} + R_p}$

Сила струму в колі коли фоторезистор освітили:

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{U}{R_{\phi 2} + R_p}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{\phi 2} + R_p}{R_{\phi 1} + R_p} \quad I_2 = 4I_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{4} = \frac{R_{\phi 2} + R_p}{R_{\phi 1} + R_p}$$

$$R_{\phi 1} + R_p = 4R_{\phi 2} + 4R_p$$

$$R_{\phi 2} = \frac{R_{\phi 1} - 3R_p}{4} \quad [R_{\phi 2}] = \text{Ом} - \text{Ом} = \text{Ом}$$

$$R_{\phi 2} = \frac{25 \cdot 10^3 - 3 \cdot 5 \cdot 10^3}{4} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}$$

Відповідь: $R_{\phi 2} = 2,5 \text{ кОм}$.

4. Визначити опір напівпровідникового діода у прямому та зворотному напрямках струму, якщо при напрузі на діоді 0,5 В сила струму 5 мА, а при напрузі – 10 В сила струму 0,1 мА.

Дано:

$$U_1 = 0,5 \text{ В}$$

$$I_1 = 5 \text{ мА} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$U_2 = 10 \text{ В}$$

$$I_2 = 0,1 \text{ мА} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

$$R_1 = ?$$

Розв'язання

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad [R_1] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом} \quad R_1 = \frac{0,5}{5 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ (Ом)}$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad [R_2] = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}$$

$$R_2 = \frac{10}{1 \cdot 10^{-4}} = 1 \cdot 10^5 \text{ (Ом)}$$

Відповідь: $R_1 = 100 \text{ Ом}$; $R_2 = 100 \text{ кОм}$.

$$R_2 - ?$$

5. Знайдіть загальну силу струму в ділянці кола (див. рисунок) під час протікання струму: 1) від A до B ; 2) від B до A . Діод є ідеальним, всі резистори мають однаковий опір 2 Ом , напруга, підведена до ділянки кола, 36 В .

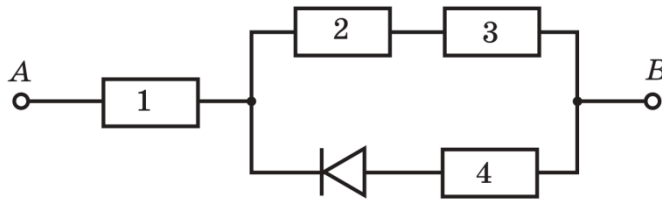
а) Дано:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

$$= R_0 = 2\text{ Ом}$$

$$U = 36\text{ В}$$

Розв'язання



$$I_{AB} - ?$$

$$I_{BA} - ?$$

1) Струм протікає від A до B :

На ділянці 4 діод має зворотнє ввімкнення, тому струм не протікає.

$$R_{AB} = R_{123} = R_1 + R_2 + R_3 = 3R_0$$

$$I_{AB} = \frac{U}{R_{AB}} = \frac{U}{3R_0} \quad [I_{BA}] = \frac{B}{\text{Ом}} = \frac{B}{\frac{B}{A}} = A$$

$$I_{AB} = \frac{36}{3 \cdot 2} = 6\text{ (A)}$$

2) Струм протікає від B до A :

На ділянці 4 діод має пряме ввімкнення, тому струм протікає.

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 2R_0$$

$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_4} = \frac{3}{2R_0} \quad R_{234} = \frac{2}{3}R_0$$

$$R_{BA} = R_1 + R_{234} = \frac{5}{3}R_0$$

$$I_{BA} = \frac{U}{R_{BA}} = \frac{3U}{5R_0} \quad [I_{BA}] = \frac{B}{\text{Ом}} = \frac{B}{\frac{B}{A}} = A$$

$$I_{BA} = \frac{3 \cdot 36}{5 \cdot 2} = 10,8\text{ (A)}$$

Відповідь: $I_{AB} = 6\text{ А}; I_{BA} = 10,8\text{ А}$.

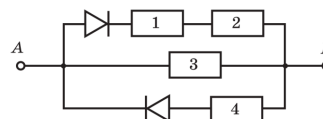
б) Дано:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

$$= R_0 = 2\text{ Ом}$$

$$U = 36\text{ В}$$

Розв'язання



1) Струм протікає від A до B :

На ділянці 1-2 діод має пряме ввімкнення, тому струм протікає.

На ділянці 4 діод має зворотнє ввімкнення, тому струм не протікає.

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 2R_0$$

$$I_{AB} - ?$$

$$I_{BA} - ?$$

$$\frac{1}{R_{123}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3} = \frac{3}{2R_0} \quad R_{AB} = R_{123} = \frac{2}{3}R_0$$

$$I_{AB} = \frac{U}{R_{AB}} = \frac{3U}{2R_0} \quad [I_{AB}] = \frac{B}{\text{Ом}} = \frac{B}{\frac{B}{A}} = A$$

$$I_{AB} = \frac{3 \cdot 36}{2 \cdot 2} = 27 \text{ (A)}$$

2) Струм протікає від B до A :

На ділянці 4 діод має пряме ввімкнення, тому струм протікає.

На ділянці 1-2 діод має зворотнє ввімкнення, тому струм не протікає.

$$\frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{2}{R_0} \quad R_{BA} = R_{34} = \frac{R_0}{2}$$

$$I_{BA} = \frac{U}{R_{BA}} = \frac{2U}{R_0} \quad [I_{BA}] = \frac{B}{\text{Ом}} = \frac{B}{\frac{B}{A}} = A$$

$$I_{BA} = \frac{2 \cdot 36}{2} = 36 \text{ (A)}$$

Відповідь: $I_{AB} = 27 \text{ A}$; $I_{BA} = 36 \text{ A}$.