

**Az anyagok vezetési tulajdonságai**  
(segédanyag a "Vezetési jelenségek" című gyakorlathoz)

**Bevezetés**

A fémek és ötvözetek közismerten jó elektromos és hővezető anyagok. E két tulajdonság gyakori egybeesése az elmozdulni képes ún. szabad elektronoknak az elektromos és hővezetés folyamatában betöltött szerepével függ össze. A szabad elektronok elektromos töltés ill. hőtranszport folyamatokban játszott hasonló szerepe miatt sokszor célszerű közösen tárgyalni e folyamatokat. A vezetési elektronok mozgásállapotát több hatás befolyásolhatja, a legismertebbek a következők; külső *elektromos tér (E)*, *mágneses tér, anyagi minőségben* (összetételben) *történő változás, hőmérsékletkülönbség* stb. Az elektromos ill. hővezetést leíró transzport egyenletekben megtalálhatjuk az ezekhez rendelhető tagokat és a megfelelő, anyagjellemzőnek tekinthető vezetési együtthatókat. A konvencionálisan elfogadott, alapvető vezetési együtthatók a következők:

- $\sigma$ : fajlagos elektromos vezetőképesség (vagy reciproka  $\rho$  a fajlagos elektromos ellenállás),
- $S$ : Seebeck tényező (ill.  $\pi = T S$ , abszolút Peltier-együttható),
- $\kappa$ : hővezetési tényező.

Az elektromos áramsűrűség számítására ismert  $j = \sigma E = \sigma \frac{dU}{dx}$  Ohm-törvény, ill. a

hőáramsűrűség meghatározására használatos  $w = -\kappa \frac{dT}{dx}$  Fourier hővezetési törvény az

említett általános összefüggések speciális esetei, amelyek csak a külső elektromos tér ill. a hőmérséklet inhomogenitását veszik figyelembe. Érdeemes észrevenni, hogy a két fenomenologikus összefüggés analóg az anyagtranszportra vonatkozó Fick-I törvénnyel.

A klasszikus fizikából ismert Franz-Wiedemann törvény szerint – főként az egyvegyértékű – fémek hő és elektromos vezetési tulajdonságai között szoros kapcsolat van, azaz:

$$L = \frac{\kappa}{\sigma T}$$

A képletben szereplő  $L$  az ún. Lorentz-szám aminek elméleti értéke  $2,44 \cdot 10^{-8} \Omega W/K^2$  független a hőmérséklettől és azonos minden olyan fémre amelyekben az elektronok döntő szerepet játszanak a hővezetés folyamatában.

A fémek vezetési mechanizmusainak leírására alkalmazott legegyszerűbb modell a *klasszikus elektron elmélet*. Ami szerint, a vezetésben résztvevő elektronok egymással kölcsönhatásban nem álló, saját térfogattal nem rendelkező részecskék, amik a molekuláris fizika ideális gázának részecskéihez hasonlóan, rendezetlen hőmozgást végeznek a vezető anyagban. Ha a vezető belsejében elektromos teret hozunk létre, az elektronok a térerősséggel ellentétes irányban gyorsuló mozgást végeznek egészen addig, amíg egy

ionnal ütközve annak összes többletenergijukat átadják. Ennek eredményeként, egy rendezetlen mozgásra szuperponált, a térerősség irányával ellentétes, azzal arányos translációs mozgást, tehát elektromos áramot kapunk. A külső elektromos tér által létesített rendezett mozgás átlagsebességét driftsebességnek ( $v_d$ ) nevezzük. A driftsebesség és a külső tér nagysága ( $E$ ) között az ún. szabad töltéshordozó mozgékonyosság ( $\mu$ ) teremti meg a kapcsolatot, azaz  $v_d = \mu E$ . A klasszikus vezetési modell segítségével levezethetjük az Ohm-törvényt az egyvegyértékű fémekre és megmagyarázhatjuk a fémek alapvető vezetési tulajdonságait, azonban számos kérdésre (pl. több vegyértékű fémek és a félvezető anyagok tulajdonságai) nem adhatunk választ.

A klasszikus csoportosítás az anyagokat vezetőképességük alapján szigetelőkre, félvezetőkre és vezetőkre osztotta fel. E felosztás szerint a vezetők fajlagos vezetőképessége jobb mint  $10^6$  siemens  $m^{-1}$ , a szigetelőké rosszabb mint  $10^{-8}$  siemens  $m^{-1}$ , a közttes tartományba tartozó anyagokat félvezetőknek nevezzük. A későbbi tapasztalatok azonban azt mutatták, hogy ez a meghatározás -különösen a félvezetők esetén- nem megfelelően ragadja meg a vezetőképességükkel kapcsolatos sajátosságokat. A félvezetők vezetőképessége ugyanis, számos külső paramétertől (mint pl. a hőmérséklet, megvilágítás, külső elektromos/mágneses terek, részecske sugárzás, nyomás stb.) a fémekétől eltérően változik. Gondoljunk pl. arra a tényre, hogy a fémek ellenállása a hőmérséklettel közel egyenes arányban nő, ezzel szemben a félvezetőké exponenciálisan csökken.

### ***A fémek vezetési tulajdonságai***

A fémeknek, azaz a gyakorlati vezeték és ellenállásanyagainak legalapvetőbb anyagjellemzői a fajlagos ellenállás és ennek hőmérsékleti együtthatója. Ezekon kívül, adott esetben még számos más jellemző figyelembe vétele is indokolt lehet pl. termoelemeknél és precíziós ellenállásanyagoknál a termoelektromotoros erő; elektródáknál az érintkezési potenciálkülönbség; üvegbe forrasztott kivezetéseknél a hőtágulási együttható stb.

A fajlagos ellenállás értékét az állandó keresztmetszetű vezetődarab ellenállásából az alábbi ismert képlettel kapjuk meg:  $\rho = R \frac{A}{l}$ , ahol:  $A$  a vezetődarab keresztmetszete,  $l$  a hosszúsága,  $R$  az ellenállása. A fajlagos ellenállás SI egysége:  $\Omega m$ . A fajlagos ellenállás reciprokát fajlagos vezetőképességnek nevezzük  $\sigma = 1/\rho$  [ $1/\Omega m$ ].

A fajlagos ellenállás hőmérsékleti együtthatóját (temperatura koefficiens, TK) a következőképpen definiáljuk:  $\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho}{dT}$ , mértékegysége: [ $1/^\circ C$ ] ill. [ $1/K$ ]. A definícióból látható, hogy a hőmérsékleti együttható értéke vonatkoztatási vezetőképességtől is függ, amelyet rendszerint  $0^\circ C$ -ra vonatkoztatva adnak meg.

Hasonlóképpen definiáljuk az ellenállás hőmérsékleti együtthatóját is:  $\alpha_R = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT}$ . Az utóbbi egyaránt tartalmazza az ellenállás geometriai változásaiból (hőtágulás) és a fajlagos ellenállás megváltozásából származó hatást is. Könnyen igazolható, a kétféle együttható között az alábbi összefüggés:  $\alpha_R = \alpha_\rho - \beta$ , ahol  $\beta$  a lineáris hőtágulási együttható.

A különféle fizikai és technológiai tényezők hatásának hozzávetőleges előrelátásában segítséget nyújt néhány alapelv és félempirikus szabály, amiket a

következőkben ismertetünk. Ezek a szabályok csupán közelítőleg érvényesek és nem minden esetre teljesülnek, ezért pontos számításra nem mindig alkalmasak.

Tökéletesen szabályos fémkristályban a vezetésben résztvevő elektronok akadálytalanul, impulzus és energia veszteség nélkül mozoghatnak. Az ideális fémkristályt 0 K hőmérsékleten tehát tökéletes vezetőnek képzeljük. Az ellenállás okozója a kristályrácsban jelenlévő szabálytalanságok, kristályhibák, amiken az elektronok impulzus és energia veszteséggel járó szóródást szenvednek. A fajlagos ellenállás arányos a szóródás valószínűségével, azaz a hibasűrűséggel.

Az alábbi rácsrendezetlenségek számottevően növelik az elektromos ellenállást:

- a rács ionjainak termikus rezgései
- ponthibák (idegen atomok, termikusan generált hibák)
- vonalszerű rácshibák (diszlokációk)
- felületszerű rácshibák (kristályfelület, krisztallithatár, idegen fázis határa, stb.)

Sok esetben néhány célszerűen megválasztott, egymástól függetlennek tekinthető tényező eredőjeként felírható a teljes ellenállás, (Matthiesen-szabály).

$$\rho = \rho_{\text{termikus}} + \rho_{\text{ötvöző}} + \rho_{\text{rácsrendezetlenség}} + \dots$$

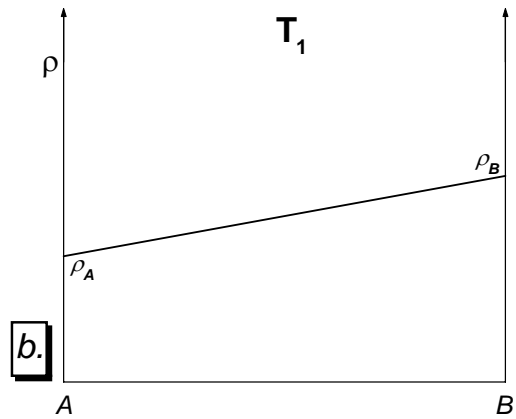
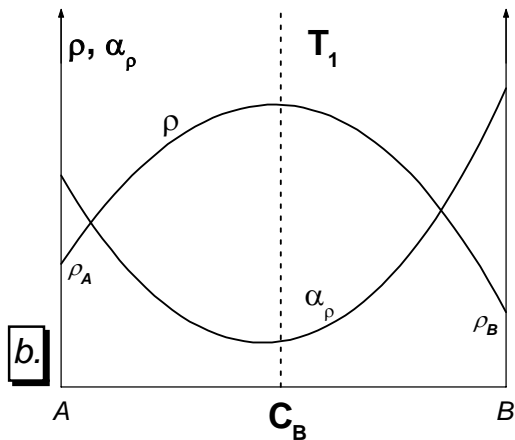
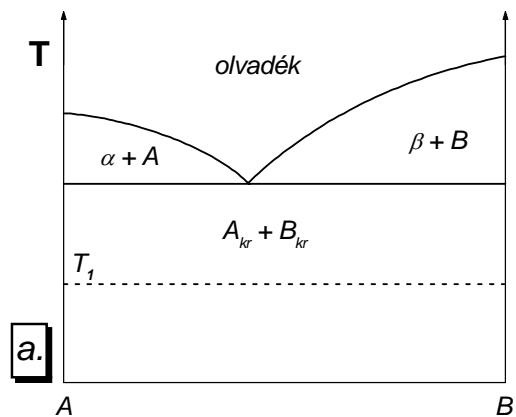
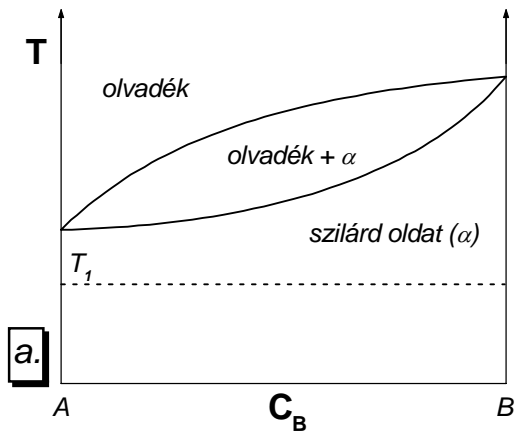
A termikus tag zérus felé tart ha a hőmérséklet abszolút zérus fokhoz közeledik. Alacsony hőmérsékleten (-250 °C...-50 °C) a termikus tag viselkedése bonyolult, azonban közepes hőmérsékleten viszonylag lassan változik a hőmérséklettel és gyakran megengedhető a lineáris közelítés viszonylag széles hőmérséklettartományban:

$$\rho(T) = \rho(0 \text{ °C}) (1 + \alpha_{\rho} \Delta T)$$

A legtöbb fém olvadásakor a fajlagos ellenállás ugrásszerűen változik (két-háromszorosára növekszik). Ez a hirtelen változás a szerkezeti rendezettség ugrásszerű csökkenésének tulajdonítható.

Az idegen atomok hatása igen különböző lehet aszerint, hogy ezek az ötvöző vagy szennyező atomok milyen fázisban vannak jelen a fémekben. Két szélső esetet érdemes megkülönböztetni. Ha két fém minden összetételben szilárd oldatot alkot egymással (**1/a. ábra**) és a különmemű atomok véletlenszerű rendezetlenséggel foglalják el a különböző rácspontokat, akkor bármilyen idegen atom jelenléte jelentősen növeli a fajlagos ellenállást a tiszta féméhez képest. A koncentráció függvényében a fajlagos ellenállás jellegzetes maximumos görbét ad. A maximum közelében a fajlagos ellenállás többszöröse a tiszta fémének. Ugyanitt a fajlagos ellenállás hőfoktényezőjének minimuma van (**1/b. ábra**). Ez a tény különösen a precíziós ellenállásötvözetek szempontjából fontos.

Általában az említett maximumos görbe jól közelíthető parabolával. Így az egyvegyértékű fémekre érvényes Nordheim-szabály értelmében, a fajlagos ellenállás hőmérséklettől független része:  $\rho_a = A c (1-c)$  összefüggés szerint változik a koncentrációval. Ahol: A a fém párra jellemző konstans, c pedig a "B" fém atomszázalékban megadott koncentrációja.



1/a és 1/b. ábrák

2/a és 2/b. ábrák

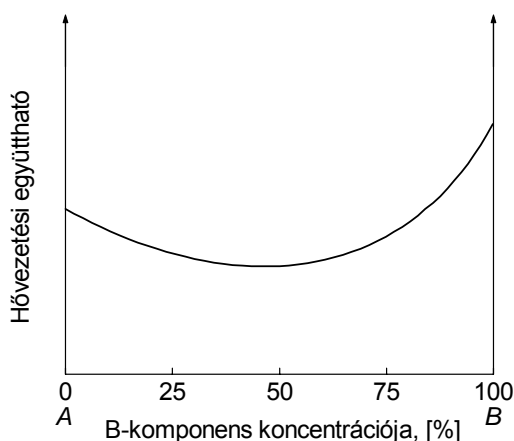
Tekintettel arra, hogy az ötvözet komponenseinek fajlagos ellenállása legtöbbször eltérő a fajlagos ellenállás ötvöző függő részét célszerű az előbb említett  $\rho_a$  és egy  $\rho_b = \rho_A (1-c) + \rho_{BC}$  tag eredőjeként előállítani:

$$\rho = \rho_a + \rho_b = \rho_A + (\rho_B - \rho_A)c + A_c (1-c)$$

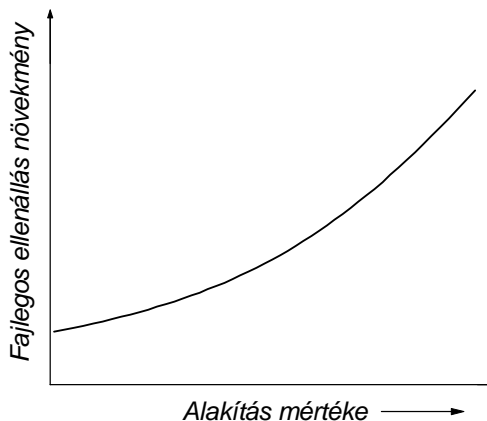
A parabolikus összefüggés a rendezetlen szilárd oldatokra ad jó közelítést, amikben a különmemű atomok véletlenszerűen foglalják el a rácshelyeket. A rendezett szilárd oldatokban kisebb a töltéshordozók szóródásának valószínűsége, ezért fajlagos ellenállásuk mindig kisebb, mint az ugyanolyan összetételű rendezetlen szilárd oldatoké.

Ha két fém szilárd állapotban egyáltalán nem oldódik egymásban (2/a. ábra), a heterogén szövétű ötvözet fajlagos ellenállása közelítőleg lineárisan változik a két fázis relatív térfogat arányával (2/b. ábra). Az ötvözés ilyenkor lényegesen kisebb mértékben befolyásolja a fajlagos ellenállást mint oldáskor.

A fémek hővezetőképessége csökken az ötvözés vagy szennyezés hatására. Az ötvöző atomok – főként a szilárd oldatokban – jelentősen növelik a szórócentrumok számát amivel a szabad elektronok mozgását lassítják. Az ötvözetek hővezetőképessége a fajlagos ellenállás hőmérsékleti együtthatójához hasonlóan változik az ötvözőkoncentráció függvényében, azaz közel 50% ötvözőkoncentrációnál minimumot mutat (**3. ábra**).



**3. ábra**



**4. ábra**

Képlékeny hideg alakváltozáskor, (pl a vezetékhez való megújításakor) is változik a fajlagos ellenállás (**4 ábra**). (Nem tévesztendő össze a geometria változásából származó ellenállás változással.) A fajlagos ellenállás növekedésének oka, hogy a képlékeny alakítás hatására növekszik a kristályban lévő rácsrendezetlenségek száma. Ez döntően a ponthibák és a diszlokációk számának változását jelenti. A tapasztalat szerint a rácsrendezetlenségek sűrűségének növekedéséből származó fajlagos ellenállás járuléka a következő összefüggéssel írható le az alakítás mértékének függvényében:  $\rho_{\text{rácsrendezetlenség}} = K \varepsilon^n$ . Ahol,  $\varepsilon$  a maradó alakváltozás mértéke,  $K$  és  $n$  az anyagra jellemző állandók (pl. réznél  $K=0,1 \mu\Omega\text{cm}$ ,  $n=1,2$ ). Ez a járuléka általában nem nagy (néhány százalék), azonban néhány gyakorlati esetben ez nem kívánatos. Ilyenkor a rácsrendezetlenségek számát csökkentő hőkezeléssel (megújulás ill. újrakristályosodás) visszaállítják az anyagban az alacsony hibasűrűségű állapotot.

### ***A félvezetők elektromos vezetési tulajdonságai***

A bevezetőben említett jelenségek leírásához és egy helyesebb félvezető definíció kialakításához az anyagok szerkezetének és vezetési mechanizmusainak tanulmányozása segített hozzá.

A félvezető anyagokat – néhány kivételtől eltekintve (pl. polikristályos napelem) – egykristályos formában használják fel.

Az egykristályos szerkezetű anyagok vezetési mechanizmusainak leírásakor *a szabad elektronokhoz rendelt hullámcsomag mozgását kell vizsgálnunk egy, a kristályszerkezet rácsperiodicitásával megegyező periodikus potenciáltérben*. Mivel az elektronhoz rendelt hullámhossz összemérhető a potenciáltér periódusával (a szerkezet rácsállandójával) ezért kvantummechanikai tárgyalás alkalmazása szükséges. Ennek eredményeképpen kapjuk az ún. diszperziós relációt, aminek egyszerűsített – grafikus –

formája a közismert sávszerkezeti ábra. A megengedett energia értékeket tartalmazó tartományokat kötési ill. vezetési sávoknak nevezzük -ahol az elektronok számára megengedett energia értékek kvázifolytonosak-, közöttük pedig az ún. tiltott sáv helyezkedik el. A félvezető és szigetelő anyagok minden (az elfajult félvezetőtől különböző) esetben ilyen jellegű sávszerkezettel rendelkeznek. A fémek sávszerkezete vegyértékszámuktól függően alakul és a leírtaktól kissé eltérő, de itt nem részletezett sajátosságokat mutat.

A megengedett energiaszinteket az elektronok a Fermi-Dirac statisztika szerint töltik be (ugyanis az elektronok nem megkülönböztethető és feles spinnel rendelkező részecskék). Az ún. Fermi-szint adalékolatlan (intrinsic) félvezetők esetén a tiltott sáv közepén helyezkedik el. Ennek megfelelően, 0 K hőmérsékleten termodinamikai egyensúlyban elektronok csak a teljesen betöltött kötési sávban vannak és a vezetési sáv üres, azaz nincsenek szabad töltéshordozók az anyag nem vezet. Ha a hőmérséklet 0 K-nél magasabb és/vagy bármely más gerjesztéssel energiát közlünk a rendszerrel az elektronok rácsbeli energiája nullától különböző valószínűséggel meghaladhatja a tiltott sáv szélességét, tehát "felugorhatnak" a vezetési sávba maguk mögött hagyva egy-egy betöltetlen helyet (az üres helyeket kvázirészecskéknek, lyukaknak tekinthetjük). Ezt a folyamatot elektron-lyuk párkeltésnek (generációnak) nevezzük, segítségével szabad töltéshordozók keletkeznek az anyagban, tehát az vezetőképessé válik. A töltésfelhalmozódást egy ellentétes folyamat az ún. rekombináció (lyuk-elektron egyesülés) korlátozza. A rekombináció sebessége a szabad töltéshordozók koncentrációjával nő, így minden hőmérsékleten kialakul egy egyensúlyi töltéshordozó koncentráció érték, aminek nagysága a hőmérséklet növelésével nő.

A tiltott sáv szélessége egyértelmű összefüggésben van a szabad töltéshordozók keltéséhez szükséges gerjesztő energia nagyságával. Ha a *tiltott sáv szélessége 1-3 eV* között van az anyag szobahőmérsékleten is rendelkezik bizonyos (nem túl jó) vezetési tulajdonságokkal, ha ennél nagyobb akkor szobahőmérsékleten gyakorlatilag nem vezet. Így az első esetben *félvezetőnek* az utóbbiban *szigetelőnek* nevezzük az anyagot.

Az előbbieknél megfelelően a generációs folyamat eredményeként a félvezető anyagok kétféle elmozdulni képes (szabad) töltéshordozót; elektronokat és lyukakat tartalmaznak. Így a félvezetők vezetőképességét a következőképpen írhatjuk:

$$\sigma = q n \mu_n + q p \mu_p .$$

Ahol:

- $q$  az elemi töltés ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)
- $n$  a szabad elektron koncentráció [ $\text{cm}^{-3}$ ]
- $p$  a szabad lyuk koncentráció [ $\text{cm}^{-3}$ ]
- $\mu_n$  az elektron mozgékonyosság [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]
- $\mu_p$  a lyuk mozgékonyosság [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]

Sajátvezető (intrinsic) azaz adalékolatlan félvezető esetén a különböző töltéshordozók koncentrációja azonos: azaz  $n = p$  és az  $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$  alakú hőmérsékletfüggést mutat ( $E_g$  a tiltott sáv szélessége,  $k$  a Boltzmann-állandó).

Ezért, a szerkezeti félvezető vezetőképessége exponenciálisan nő a hőmérséklet növekedésével. E növekedés ellen a hatnak ugyanazok a tényezők, amik a fémeknél a

vezetőképesség  $1/T$ -vel arányos csökkenését okozzák. Az exponenciális növekedés azonban elnyom minden egyéb tendenciát. Ennek megfelelően, ha a vezetőképesség logaritmusát ábrázoljuk az abszolút hőmérséklet reciprokának függvényében, jó közelítéssel egyenest kapunk, aminek meredeksége  $-E_g/2k$ .

Fontos megemlíteni, hogy a vezetőképesség nemcsak a hőmérséklettől függően nő, bármely más energiaközlő folyamat ami a töltéshordozó párok generációját előidézhetheti (optikai gerjesztés, részecske sugárzás stb.) növeli a vezetőképességet.

A félvezető eszközökben alkalmazott félvezetőanyagok – kevés kivételtől eltekintve – mindig adalékoltak (extrinsic félvezetők). Az adalékolás típusa szerint megkülönböztetünk n és p típusú félvezetőt. Az adalék anyagok atomjai a félvezető rácsába szubsztitúciósan épülnek be s vegyértékszámuktól függően vagy a szabad elektronok, vagy a szabad lyukak koncentrációját növelik. Ennek megfelelően az n-típusú adalékok öt (pl. foszfor), a p-típusú adalékok pedig három vegyértékű elemek (pl. bór). A gyakorlatban alkalmazott félvezetőkben – az adalékolás típusával megegyező ill. azzal ellentétes – ún. többségi ill. kisebbségi töltéshordozók koncentrációja között több nagyságrend különbség lehet.

#### *A félvezető anyagok csoportosítása*

A félvezető anyagokat a bennük lévő elmozdulni képes töltéshordozók alapján feloszthatjuk ion és elektron félvezetőkre. Az előbbieken az ionvezetés következtében kémiai átalakulások játszódhatnak le, így összetételük folyamatosan változik. Ebből következően érdemi gyakorlati alkalmazásuk nincs.

Az elektronfélvezetők csoportjába számos anyag tartozik, ezeken belül *elemi és vegyületfélvezetőket* szokás megkülönböztetni. A leggyakrabban alkalmazott elemi félvezetők a *szilícium* és a *germánium* (az utóbbinak ma már csak történeti jelentősége van).

A félvezető tulajdonságú vegyületek aszerint, hogy hány komponensből állnak lehetnek biner, ternér, kvaternér, stb. csoportba tartozók. Az “A” és “B” komponensekből álló vegyületfélvezetők általános képlete  $A^x B^{(8-x)}$ , ahol A az x oszlop, B a (8-x) oszlop elemeit jelenti (azaz átlagos vegyértékszámuk 4). A biner vegyületfélvezetők legfontosabb csoportját az  $A^{III} B^V$  típusú vegyületek alkotják. Ide tartoznak az alumínium, gallium, indium, bór antimonidjai, arzenidjei és nitridjei. E csoport ma már klasszikussá vált képviselője a *galliumarzenid*.

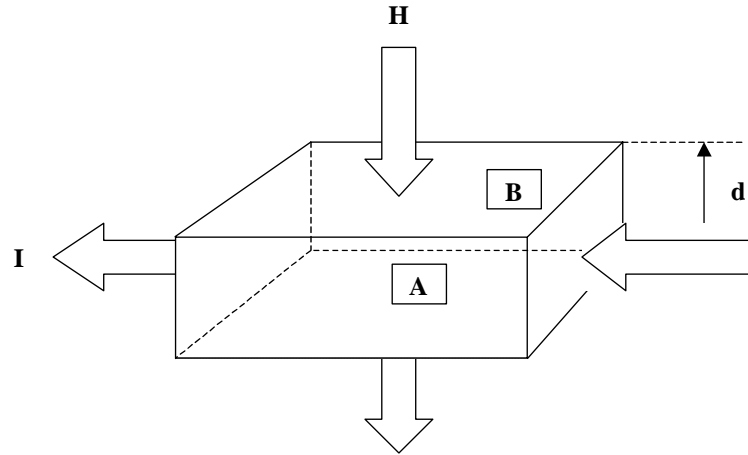
#### *A szabad töltéshordozók mozgékonyságának meghatározása Hall-méréssel*

A félvezető anyagok egyik legfontosabb paramétere a *fajlagos ellenállás* és az ezzel kapcsolatban lévő *szabad töltéshordozó mozgékonyság*. A mozgékonytságot természetesen elsősorban az anyagi minőség határozza meg, azonban több más tényező befolyásolhatja. Ilyenek például:

- az adalékoltság mértéke (adalék koncentráció)
- az adalékolás típusával ellentétes szennyezők koncentrációja (kompenzáció)
- a kristályhibák száma.

A félvezető anyag mozgékonyága tehát, jellemzi a kristályszerkezet tökéletességét és szennyezőanyag tartalmát, ezért mérését gyakran a technológiai folyamatok rutinszerű ellenőrzésére és minősítésére használják.

Mozgékonytágot legcélszerűbben a *Hall-effektus* felhasználásával mérhetünk, mérésének egyben ez a gyakorlatban legelterjedtebben használt módja.



**5. ábra**

A méréshez felhasznált Hall-effektus röviden a következő: ha az **5. ábrának** megfelelően egy félvezető mintán keresztül bocsátunk I áramot és azt H télerősségű mágneses térbe helyezzük, akkor az AB pontok között feszültségkülönbséget mérhetünk. Az anyagban mozgó negatív (elektron) és pozitív (lyuk) töltéshordozókra ugyanis, a külső mágneses tér a Lorentz-törvénynek megfelelően erőhatást gyakorol. Ennek következtében az A, B lapokon töltésfelhalmozódás kezdődik, ami egészen addig tart amíg az ebből származó elektromos tér által a töltéshordozókra gyakorolt erő nem kompenzálja a Lorentz-erőt.

Az AB lapok között keletkező feszültséget Hall-feszültségnek ( $U_{\text{Hall}}$ ) nevezzük. Tételezzük fel, hogy a mintában csak egyféle töltéshordozó van (a kisebbségi töltéshordozók koncentrációja elhanyagolható) továbbá a mágneses tér merőleges a minta felületére, ekkor a Hall-feszültség a következőképpen adódik:

$$U_{\text{Hall}} = \frac{1}{nq} \frac{BI}{d}$$

Ahol:

- $n$  a szabad töltéshordozók koncentrációja
- $B$  a mágneses tér indukciója ( $B = \mu_{\text{perm}} H$ )
- $d$  a minta vastagsága
- $q$  az elektron töltése

Ebből az egyenletből a szabad töltéshordozók koncentrációja meghatározható a Hall-feszültség ismeretében. Ismert, hogy  $\sigma = q n \mu$ , amiből a szabad töltéshordozó koncentráció és a – más mérés segítségével meghatározott – vezetőképesség ismeretében  $\mu$  azaz a szabad töltéshordozók mozgékonytága számolható.

Látható tehát, hogy a megfelelő kísérleti és a minta geometriájára vonatkozó adatok ismeretében a Hall-feszültség értékéből a töltéshordozók mozgékonytága meghatározható.