

# **Félvezetők elektromos viselkedése**



**GIMNÁZIUMI TANKÖNYV**



**Molnár Ervin**

# **Félvezetők elektromos viselkedése**

**fakultatív tankönyv a gimnáziumok IV. osztálya számára**

**A Művelődési Minisztérium megbízásából  
kiadja a Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985**

A 27/1965. Korm. számú rendelet alapján a művelődési miniszter 26335/1985. IX.sz. alatt jóváhagyta, bevezetését és alkalmazását az 1985/86. tanévtől engedélyezte.

Lektorok:

Dr. KOVÁCS ISTVÁN  
FLÓRIK GYÖRGY

ISBN 963 10 6747 - 5

Kiadja a Műszaki Könyvkiadó  
Felelős kiadó: Fischer Herbert igazgató  
Felelős szerkesztő: Juhász Ágnes

Váci ÁFÉSZ Sokszorosító üzeme, 85112

Műszaki vezető: Kőrösi Károly  
Műszaki szerkesztő: Müller Károlyné  
A könyv formátuma: B5. Terjedelme: 3,275(A5) iv.  
Ábrák száma: 18. Példányszám: 13000.  
Papír minősége: 80 g ofszet. Azonossági száma: 28974/II-7a.  
Kézirat lezárva: 1985. május 15.  
Készült az MSZ 5601 és 5602 szerint

## TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
1. BEVEZETÉS .....	5
2. FÉLVEZETŐK ELEKTROMOS VISELKEDÉSÉNEK ALAPJAI .....	7
3. SZENNYEZÉS HATÁSA A FÉLVEZETŐK ELEKTROMOS TULAJDONSÁGAIRA .....	11
4. FÉLVEZETŐK ELEKTROMOS TULAJDONSÁGAI .....	19
4.1. Hall-hatás .....	19
4.2. Fotoelektromos és elektrooptikai jelenségek ...	24
4.3. Termoelektromos jelenségek félvezetőkben .....	34

.

## 1. BEVEZETÉS

A félvezetők fontosabb tulajdonságait már a múlt század első felében ismerték, az első gyakorlati alkalmazást 1884-ben Bell javasolta, de tényleges, széles körű elterjedésük csak a tranzisztor felfedezésétől (1948) számítható. Az ugrásszerű elterjedés részben a felhasználók újabb és újabb igényeinek, részben a kristályos anyagok elméleti leírását adó szilárdtestfizika eredményeinek (amelyek alapján előzetesen, elméletileg becsülhetővé vált egy új eszköz viselkedése, ill. néhány fontos tulajdonsága) köszönhető. Ennek következtében az elmúlt, közel negyven évben különböző típusú és rendeltetésű félvezető eszközöket fejlesztettek ki, amelyek a mindennapi élet szinte összes területére bevonultak. A széles körű alkalmazás a félvezetők elektromos (és optoelektromos, ill. magnetoelektromos) tulajdonságainak felhasználásán alapszik, és a következőkben ezeket a gyakorlatban fontos tulajdonságokat kívánjuk - a tankönyvben leírtak alapján, de azt néhol kibővítve - röviden áttekinteni, ill. értelmezni. A továbbiakban tárgyalt jelenségekről elsősorban szemléletes képet kívánunk adni, amelyhez mindig a kísérleti eredményekből indulunk ki, és a gyakorlati alkalmazhatóságot tekintjük elsődlegesnek

1

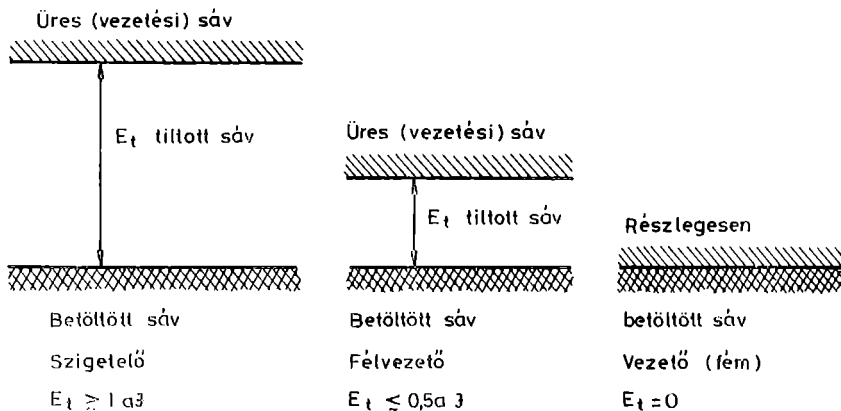
2

3



## 2. FÉLVEZETŐK ELEKTROMOS VISELKEDÉSÉNEK ALAPJAI

A félvezetők elektromos tulajdonságainak vizsgálatához a kristályos anyagok vezetési folyamatából indulunk ki, amelynek értelmezéséhez az 1. ábrán látható egyszerűsített elektronenergia-diagramot használjuk fel. Az elektromos áram az elektronok (vagy mint később látni fogjuk, általános esetben a töltéshordozók) elektromos tér okozta rendezett (egyirányú) mozgása. Az elektronok a betöltött sávban, ahol minden energiaállapot "foglalt", nem képesek rendezetten mozogni, mivel helyhez kötöttek. A rendezett mozgás csak az üres sávban (amelyben betöltetlen energiaállapotok vannak) jöhet létre, amit ezért vezetési sávnak is neveznek.



1. ábra

Fémekben a sáv lehetséges energiaállapotainak csak egy része van betöltve, a többi üres, így az elektronok az adott energiaállapotukból már nagyon kis energiabefektetéssel egy

üres energiaállapotba kerülhetnek és szabadon mozoghatnak. Szigetelőben a betöltött és a vezetési sávot egy - az elektronok gyakorlatban előforduló termikus, optikai stb. hatásokkal elérhető energiáihoz képest - jelentős nagyságu tiltott sáv választja el, így az elektronok nem mozdíthatók ki a betöltött sávból és nem jöhet létre vezetés. (Elméletileg természetesen tökéletes szigetelő nincs. Pl. a szigetelőként viselkedő gyémántban az  $E_t$  tiltott sáv kb. 0,96 eV széles, ami a szobahőmérsékletre jellemző kb. 0,004 eV átlagos termikus energiához képest rendkívül nagy, viszont 1000 K-en már néhány elektron termikus energiája eléri a 0,96 eV-t, így a gyémánt kismértékben vezetővé válik.)

Félvezetőkben a tiltott sáv szélessége 0,05...0,5 eV, ami a szobahőmérsékleti átlagos termikus energiához képest nagy, de összemérhető a látható fény okozta optikai gerjesztési energiával (ill. néhány anyagnál még ennél is kisebb). Ezért a kristályos szerkezetű, ideálisan tiszta félvezetők sötétben szigetelőként, megvilágítva vezetőként viselkednek. A kísérletek azt mutatják, hogy a félvezető anyagok kismértékben sötétben is vezetnek az áramot, ami részben a kristályban levő szennyezők hatásával (amelyről a következő fejezetben lesz szó), részben az elektronok termikus energiájának statisztikus értelmezésével magyarázható. Az elektronok átlagos termikus energiája a hőmérséklet növelésével növekszik. Ez az átlagos viselkedés természetesen a valóságban úgy jelentkezik, hogy lesznek az átlagosnál sokkal nagyobb és sokkal kisebb energiájú elektronok is. Így néhány elektron energiája elegendő lehet a tiltott sáv átlépéséhez (természetesen ilyen elektron szobahőmérsékleten nagyon kevés van). A jelenség hasonló ahhoz, ami a viznél játszódik le: a tálkába öntött víz szobahőmérsékleten lassan elpárolog, annak ellenére, hogy a teljes vízmennyiséget nem melegítettük forráspontig. Az elektronok így létrejövő gerjesztését termikus gerjesztésnek nevezzük. A termikus gerjesztés hatására a vezetési sávba jutó elektron helyén a betöltött sávban egy "lyuk" (elektronhiány) keletkezik. A vezetési sávba került elektron már résztvesz a vezetésben, így a félvezető anyag elektromosan vezető lesz. A vezetési folyamathoz a betöltött sávban maradt lyukak is hoz-

zárulnak, hiszen a lyuk egy elektron hiánya, így a betöltött sávban is keletkezik egy üres energiaállapot (a hiányzó elektron állapota). A lyukvezetési folyamatban a lyukba egy szomszédos helyről elektron lép be (elfoglalja a hiányzó elektron állapotát) és annak helyén egy új lyuk keletkezik. A folyamat hatására a lyuk látszólag mozog (az elektronokkal ellentétes irányba) a kristályban, és lyukáramot idéz elő. A lyuk mozgásának feltételezése és a lyukáram fogalmának bevezetése csak egyszerűsíti és szemléletessé teszi a vezetési folyamat leírását. A lyukakat célszerű úgy elképzelni, mint a vízben levő buborékokat, amelyek lényegében folyadékhiányos helyek. Amíg a vízbe ejtett fémrészecskék az edény aljára süllyednek az elektromos térrel analóg gravitáció hatására, addig a buborékok felfelé szállnak (és mivel a helyüket a folyadék tölti ki, így a felszálló buborékárammal ellentétes irányú folyadékáram is kialakul).

A félvezetőben létrejövő, egymással ellentétes irányú elektron- és lyukáram adja a félvezető mintán átfolyó teljes áramot. A tiszta félvezető anyag vezetőképessége viszonylag kicsi, mivel termikus gerjesztéssel szobahőmérsékleten csak kevés elektron (Si esetén az elektronok kb.  $10^{-10}$ -ed része, Ge esetén a kisebb szélességű tilos sáv miatt kb.  $10^{-6}$ -od része) jut a vezetési sávba. Ezt a vezetési folyamatot sajátvezetésnek hívják, mivel csak a tiltott sáv szélességétől (ami a kristályszerkezettel kapcsolatos) és a hőmérséklettől függ. A gyakorlatban szobahőmérsékleten a sajátvezetési járulékat elhanyagolható a szennyezőktől eredő járulékok mellett.

### 1. példa:

Sajátvezető állapotban a vezetésben résztvevő elektronok koncentrációja megegyezik a lyukak koncentrációjával (hiszen minden elektron egy lyukat hagy vissza), és ez jó közelítéssel a következő összefüggéssel adható meg:

$$n_i = p_i = aT^{3/2} e^{-\frac{E_t}{2kT}}$$

ahol az  $i$  index a sajátvezető (intrinsic) jellegre utal;  $n_i$  és  $p_i$  az elektronok és lyukak koncentrációja sajátvezető állapotban; az  $a$  paraméter közelítőleg  $4,82 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$ .

Az összefüggés felhasználásával határozzuk meg a tiszta, szobahőmérsékletű (300 K-es) Ge kristályban kialakuló töltéshordozó-koncentrációt! (A Ge tiltott sávjának szélessége  $E_t = 0,11 \text{ aJ}$ .)

Az értékeket behelyettesítve:

$$\begin{aligned} n_i = p_i &= 4,82 \cdot 10^{21} \cdot 300^{3/2} e^{-\frac{0,11 \cdot 10^{-18}}{2 \cdot 300 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}} = \\ &= 2,5 \cdot 10^{25} \cdot e^{-13,28} = 4,28 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} = \\ &= 4,28 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}. \end{aligned}$$

Si esetén a számítás hasonló, csak az  $E_t = 0,18 \text{ aJ}$  szélességű tiltott sávot kell használni. Így

$$\begin{aligned} n_i = p_i &= 2,5 \cdot 10^{25} \cdot e^{-\frac{0,18 \cdot 10^{-18}}{2 \cdot 300 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}} = \\ &= 2,5 \cdot 10^{25} \cdot e^{-21,74} = 9,05 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3} = \\ &= 9,05 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}. \end{aligned}$$

A töltéshordozó-koncentrációkat (sajátvezető esetben) más hőmérsékletekre is kiszámíthatjuk. A következőkben néhány, hasonló módon számolt értéket ismertetünk:

	300 K	500 K	1000 K
Ge: $n_i = p_i$	$4,28 \cdot 10^{13}$	$1,86 \cdot 10^{16}$	$2,83 \cdot 10^{18}$
Si: $n_i = p_i$	$9,05 \cdot 10^9$	$1,17 \cdot 10^{14}$	$2,26 \cdot 10^{17}$

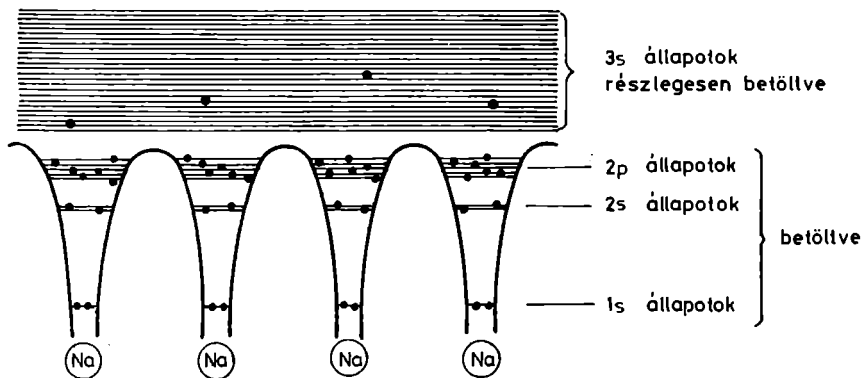
(Minden koncentrációt  $\text{cm}^{-3}$  egységben adtuk meg.)

A Ge és Si sűrűségére és atomsúlyára vonatkozó adatok alapján (figyelembe véve, hogy mindkét anyag négy vegyértékelektront tartalmaz) számítsuk ki az egyes anyagok  $\text{cm}^{-3}$ -enkénti vegyértékelektron-sűrűségét! Figyeljük meg a töltéshordozó-koncentráció hőmérséklet növelésével bekövetkező gyors növekedését!

### 3. SZENNYEZÉS HATÁSA A FÉLVEZETŐK ELEKTROMOS TULAJDONSÁGAIRA

A félvezető anyagok sajátvezetésből eredő kis vezetőképessége a gyakorlati eszközök számára nem megfelelő, ezért a szennyezés okozta vezetési folyamatot használják ki. A szennyezéses vezetési folyamatot a félvezetőbe gyártás közben bevitt megfelelő adalékanyagokkal valósítják meg, és a szennyezéssel a félvezetők vezetőképessége széles tartományban szabályozható. A vezetőképesség nagyon érzékenyen függ a szennyező anyag fajtájától és koncentrációjától, így pl., ha a szilíciumba annyi bóratomot viszünk be, hogy minden százezredik Si atomra jusson egy B atom, akkor a szilícium vezetőképessége kb. ezerszeresére növekszik.

A leggyakrabban használt félvezető anyag a Ge és a Si, amely négy vegyértékű és a gyémánthoz hasonló kristályrácsot alkot. A legjelentősebb szennyezőhatás a Ge és Si atomokhoz hasonló (a kristályrácsba beépülni képes) három vagy öt vegyértékű szennyező anyagokkal érhető el.



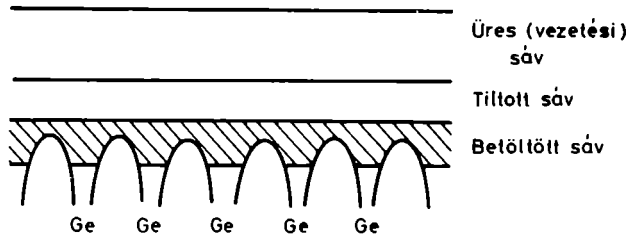
2. ábra

A szennyező anyagok hatásának elemzéséhez célszerű a pontosabb elektronenergia-diagramból kiindulni, amely egy fém (nátrium) esetén a 2. ábrán látható. Az ábra jól szemlélteti a periodikus kristályrácsban levő rögzített helyü (de természetesen 0 K felett a hőmérséklet hatására rezgő) atomok keltette periodikus potenciáletteret. Az ábrán berajzoltuk (természetesen nem méretarányosan) a Na atom egyes energiaszintjeit is. Mint ismeretes, a nátrium fém, így az 1s, 2s és 2p betöltött állapotokon kívül egy részlegesen betöltött sávot is tartalmaz, amely a 3s állapotokból áll. Félvezetők esetén hasonló periodikus potenciáltér alakul ki, de itt a legfelső sáv minden helye betöltött, és csak egy jelentős szélességű tiltott sáv után helyezkednek el üres állapotok (vezetési sáv).

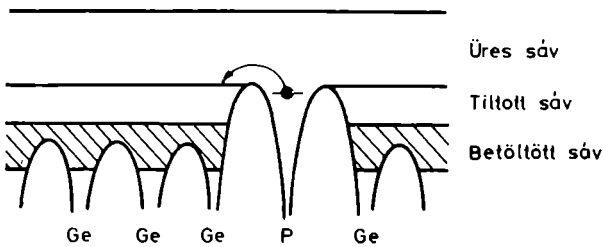
Az energiaviszonyokat tiszta Ge esetén a 3a ábra mutatja.

Az öt vegyértékű szennyező (leggyakrabban foszfor, arzén, antimon) atomja egy Ge atom helyét foglalja el a kristályban, és négy elektronja a szomszédos Ge atomokkal alkotott kötésben vesz részt. Az ötödik, a szomszédokhoz való kötődés szempontjából felesleges elektron a többiektől jelentősen különböző energiaszinten helyezkedik el. A szennyezőatom természetesen a Ge atomoktól kismértékben eltérő energiadiagrammal jellemezhető, de a potenciáltér periodicitása jó közelítéssel megmarad. A kialakuló energiaviszonyokat foszforral szennyezett germánium esetén a 3b ábra mutatja. Az ábrán látható, hogy a szennyezőatom többletelektronja egy önálló, a vezetési sáv széle alatt elhelyezkedő energiaszintre kerül. Mivel a szennyezőatom többletelektronjának alapállapotban elfoglalt energiaszintje nagyon közel van a vezetési sávhoz, így ez az elektron már szobahőmérsékleten a termikus gerjesztés hatására a vezetési sávba jut. A félvezető anyagba bevitt öt vegyértékű szennyezőt donornak (átadónak) nevezik, és az ilyen félvezetőt, mivel itt a vezetési folyamathoz a donoroktól származó elektronok adják a fő járulékot (az elektronok alkotják az ún. többletségi töltéshordozókat), n-típusúnak hívják.

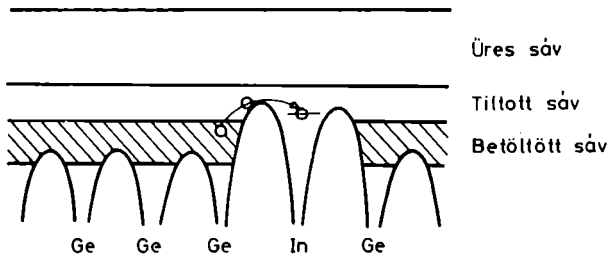
A három vegyértékű szennyezőt (leggyakrabban bórt, alumíniumot, galliumot vagy indiumot) tartalmazó félvezetőben a szennyezőatom környezetében egy elektronhiány, azaz lyuk kép-



a)



b)



c)

3. ábra

zódik, amelybe egy másik elektron léphet. Ezért a három vegyértékű szennyezőt akceptornak hívják, és az ilyen félvezetőt p-típusunak nevezik. A p-típusú vezetési folyamatban a többségi töltéshordozók lyukak. A p-típusú germániumban kialakuló energiaviszonyokat a 3c ábra mutatja. Az ábra egyúttal jól szemlélteti a lyukak keletkezésének folyamatát is. Látható, hogy az In atom egy betöltetlen energiaszinttel rendelkezik (amely a hiányzó, negyedik elektronhoz tartozik), és ez az

energiaszint kicsivel a betöltött sáv széle fölött helyezkedik el. Alapállapotban ez a szint betöltetlen, és két oldalról az In atomtól eredő potenciálgát határolja el a Ge vegyértéksávjában levő elektronoktól. Mivel az akceptorszint csak kismértékben nagyobb a betöltött sáv felső szélénél, így a szobahőmérsékleten létrejövő termikus gerjesztés hatására nagy valószínűséggel betöltődik egy elektronnal. Ez az elektron a Ge betöltött sávjából ugrik az akceptorszintre és egy lyukat hagy vissza. Az In atomtól eredő potenciálgát a betöltött akceptorszintnek bizonyos stabilitást biztosít, mivel az elektron csak energiabefektetéssel képes visszaugrani a betöltött sávba. Az n-típusú félvezetőben a P atomtól eredő potenciálgát hasonló stabilizáló szerepet tölt be, mivel megakadályozza, hogy a donor szintről az elektron egy esetleges lyukba ugorjon.

Még egyszer hangsúlyozzuk, hogy a félvezető anyagba bevitt n- vagy p-típusú szennyező nem közvetlenül elektronok vagy lyukak keltésével fejti ki a hatását, hanem ezek az elektronok vagy lyukak a donorok vagy akceptorok termikus gerjesztésével keletkeznek. A termikus gerjesztődéshez szükséges energiát a donorok vagy akceptorok ionizációs energiájának nevezik, és az ionizációs energia donorok esetén a donorszint és a vezetési sáv alja, akceptorok esetén pedig a betöltött sáv teteje és az akceptorszint közti energiakülönbség. A szilíciumban és a germániumban levő tipikus donorok és akceptorok ionizációs energiáit az 1. és 2. táblázat tartalmazza. Látható, hogy az ionizációs energia nem sokkal nagyobb (sőt, néha kisebb), mint a szobahőmérséklethez tartozó átlagos termikus energia (0,004 eV), így érthető, hogy miért ionizálódnak könnyen a donorok és akceptorok.

A gyakorlatban használt félvezető eszközök mindig szennyezett alapanyagból készülnek, és a szennyezőatomok koncentrációja  $10^{14} \dots 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . (Összehasonlításképpen: egy  $\text{cm}^3$  Ge kristály kb.  $4,1 \cdot 10^{22}$  atomot, a Si kristály pedig kb.  $5 \cdot 10^{22}$  atomot tartalmaz.) Speciális eszközökben  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ -nél nagyobb szennyező-koncentrációt is használnak, de az ilyen anyagokban a túl sűrűn elhelyezkedő szennyezőatomok egymásra hatása miatt bonyolult energiaviszonyok alakulnak ki (az ilyen nagy szennyezettségű félvezető anyagokat elfajult félvezetőknek hívják).



1. táblázat

Néhány öt vegyértékű donor ionizációs energiája Si és Ge kristályrácsban (az energiák aJ-ban mérve)

	F	As	Sb
Si	0,0072	0,0078... ...0,0090	0,0062
Ge	0,0019	0,0020	0,0001

2. táblázat

Néhány három vegyértékű akceptor ionizációs energiája Si és Ge kristályrácsban (az energiák aJ-ban mérve)

	B	Al	Ga	In
Si	0,0072	0,0091... ...0,0107	0,0104... ...0,0114	0,0256
Ge	0,0017	0,0016	0,0017	0,0018

A szennyezett félvezetőben a szennyezés jellegétől függetlenül valamelyik töltéshordozó túlsúlyban van. Ezeket a töltéshordozókat többségi töltéshordozónak nevezik, mivel koncentrációjuk általában több nagyságrenddel nagyobb, mint a másik (kisebbségi) töltéshordozó koncentrációja, és így a vezetéshez adott járulékok is lényegesen nagyobbak. A szennyezés folyamatából nyilvánvaló, hogy az n-típusú mintában az elektronok, a p-típusú mintában pedig a lyukak a többségi töltéshordozók (de természetesen a mintákban a kisebbségi töltéshordozók, azaz lyukak, ill. elektronok is jelen vannak). Bár a félvezetők vezetési folyamatát a többségi töltéshordozók határozzák meg, a kisebbségi töltéshordozók hatása is jelentős lehet bizonyos alkalmazásokban (pl. a tranzisztornál).

A félvezetők gyakorlati alkalmazhatóságát az anyagban létrejövő vezetési folyamatok határozzák meg. A vezetés az elektronok és lyukak áramából áll, és kialakulásának feltéte-

le a töltéshordozók gerjesztése. A gerjesztéshez szükséges energia termikus energiából vagy elektromágneses sugárzásból (pl. fény) származhat. A következőkben a félvezetők szokásos gerjesztési folyamatokkal létrehozott vezetési jelenségeinek rövid leírását adjuk, de előtte példákon keresztül megvizsgáljuk a szennyezés vezetőképességre gyakorolt hatását.

## 2. példa:

Egy anyag fajlagos elektromos vezetőképessége

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p),$$

ahol  $e$  az elemi töltés ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C);  $n$  és  $p$  az elektronok, ill. lyukak koncentrációja az anyagban;  $\mu_n$ , ill.  $\mu_p$  az elektronok, ill. lyukak mozgékony-sága (1 V/cm elektromos térerő-ség hatására kialakuló sebessége).

Az 1. példában kapott sajátvezetési töltéshordozó-koncentráció felhasználásával határozzuk meg a tiszta Ge fajla-gos ellenállását 300 K-en! Az elektronok és lyukak mozgékony-sága Ge mintában  $\mu_n = 3900$  cm<sup>2</sup>/Vs és  $\mu_p = 1900$  cm<sup>2</sup>/Vs.

Mivel sajátvezetés van, így  $n = p = n_i = p_i = 4,28 \cdot 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>, ezt felhasználva:

$$\begin{aligned} \sigma &\approx 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,28 \cdot 10^{13} \cdot (3900 + 1900) = \\ &= 0,04 (\Omega \text{ cm})^{-1}. \end{aligned}$$

Ebből a Ge fajlagos ellenállása:

$$\rho \approx 25,1 \Omega \text{ cm}.$$

A vezetőképességre vonatkozó összefüggés fémekre is érvé-nyes, de természetesen fémekben csak elektronvezetés van, így  $p = 0$ . Az összefüggés érvényességének igazolására számítsuk ki a réz fajlagos elektromos ellenállását, feltételezve, hogy  $\mu_n = 40$  cm<sup>2</sup>/Vs, a réz atomsűrűsége  $8,5 \cdot 10^{22}$  cm<sup>-3</sup> (a sűrű-ségből és az atomsúlyból számolva) és, hogy a szabad elektro-nok az egyes rézatomok egyetlen vegyértékelektronjából adód-nak (így az elektronkoncentráció  $8,5 \cdot 10^{22}$  cm<sup>-3</sup>).

Fém esetén

$$\begin{aligned}\sigma &\approx en\mu_n = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{22} \cdot 40 = \\ &= 5,4 \cdot 10^5 (\Omega\text{cm})^{-1}.\end{aligned}$$

Innen a fajlagos ellenállás:

$$\rho \approx 1,83 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}.$$

A kapott érték viszonylag jól (5%-on belül) egyezik a réz, táblázatból vett  $0,0175 \Omega\text{mm}^2/\text{m} = 1,75 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$  fajlagos ellenállásával.

### 3. példa:

Van egy 25 g tömegű, p-típusú,  $5 \Omega\text{cm}$  fajlagos ellenállású Ge mintánk. A mintát megolvasztással és antimon adalékolással n-típusú,  $1 \Omega\text{cm}$  fajlagos ellenállású félvezetővé kívánjuk alakítani. Ha az eredeti minta minden akceptorának semlegesítéséhez egy antimon (donor) atom szükséges, akkor számítsuk ki, hogy az n-típusú minta előállításához összesen mekkora tömegű antimon szükséges! A számolásnál a 2. példa töltéshordozó-mozgékonyságait használjuk fel! A Ge sűrűsége  $5,32\text{g/cm}^3$ , az antimon atomsulya 121,8.

A számoláshoz a vezetőképességre vonatkozó összefüggést használjuk fel. Mivel a kiinduló minta szennyezett, p-típusú, így  $p \gg n$ , az elektronok járulékát elhanyagoljuk. Így

$$\sigma_p \approx ep\mu_p,$$

amiből az adott fajlagos ellenálláshoz szükséges akceptor-koncentráció

$$p \approx \frac{\sigma_p}{e\mu_p} = \frac{1}{e\rho_p\mu_p}.$$

Behelyettesítve:

$$p \approx (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 1900)^{-1} = 6,6 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}.$$

Az átolvastás után kapott n-típusú minta esetén hasonló közelítéssel élhetünk, mivel itt  $n \gg p$ . Az adott fajlagos ellenállás eléréséhez szükséges donor-koncentráció:

$$n \approx \frac{1}{e\mu_n\tau_n} \approx (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 3900)^{-1} \approx 1,6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}.$$

(Ez látszólag nem sokkal nagyobb az akceptor-koncentrációnál, de vegyük figyelembe, hogy az akceptorok mozgékonyasága kisebb, így azok áramhoz adott járuléka azonos koncentráció esetén is kb. fele a donorok járulékéának.)

Az adalékoláshoz szükséges antimonmennyiség egy része az akceptorok kompenzálását, másik része az n-típusú szennyezést hozza létre, így az Sb atomok száma  $6,6 \cdot 10^{14} + 16 \cdot 10^{14} = 2,26 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Mivel a minta térfogata  $25 \text{ g}/5,32 \text{ gcm}^{-3} \approx 4,7 \text{ cm}^3$ , ezért az n-típusú minta kialakításához összesen  $4,7 \cdot 2,26 \cdot 10^{15} = 1,06 \cdot 10^{16}$  Sb atom szükséges. Egy molnyi (121,8 g) antimon  $6,024 \cdot 10^{23}$  atomot tartalmaz, így az  $1,06 \cdot 10^{16}$  atom tömege:

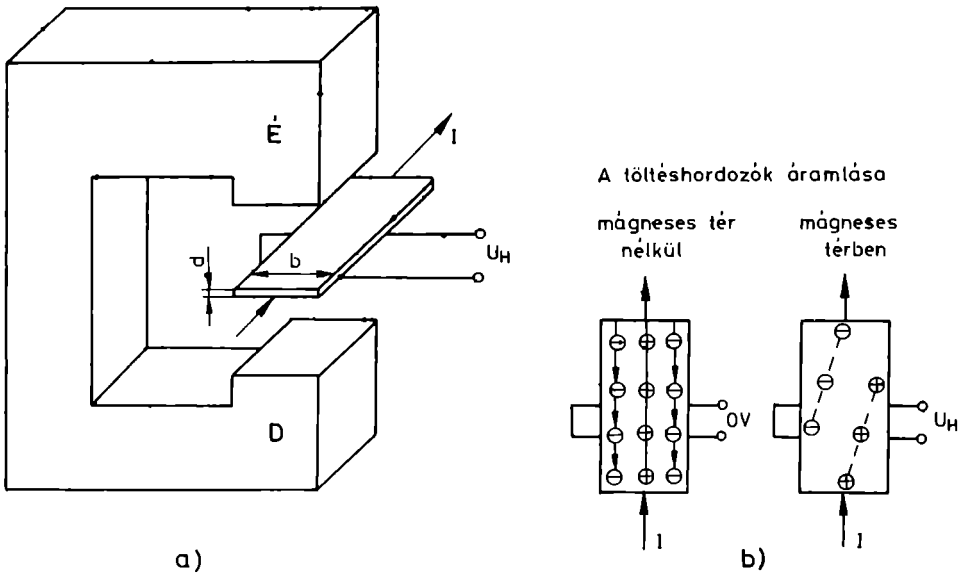
$$m \approx \frac{121,8 \cdot 1,06 \cdot 10^{16}}{6,024 \cdot 10^{23}} \approx 2,14 \cdot 10^{-6} \text{ g} = 2,14 \text{ } \mu\text{g}.$$

A kapott (közelítő) eredményből látható, hogy már ilyen kis mennyiségű (a kiinduló Ge minta tömegének kb.  $10^7$ -ed része) szennyező is milyen nagymértékben befolyásolja a félvezető viselkedését. (Jól látszik ez a szennyezett mintákra megadott fajlagos ellenállásnak és a sajátvezető Ge fajlagos ellenállásának összehasonlításából is.)

## 4. FÉLVEZETŐK ELEKTROMOS TULAJDONSÁGAI

### 4.1. Hall-hatás

A félvezetők elektromos tulajdonságainak tárgyalását a - elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt lényeges - Hall-hatással kezdjük. A Hall-hatás a töltéshordozók és a mágneses tér közti kölcsönhatás következtében alakul ki, és vizsgálatához a 4. ábrán látható összeállítást használják. A vizsgálatokhoz a két-két szemközti oldalán fémezett elektródával ellátott vékony félvezető lapkát használnak, amelyen az egyik elektródapár felhasználásával  $I$  áramot vezetünk keresztül. A lapka a síkjára merőleges irányú mágneses térben helyezkedik el, és a másik elektródapárhoz érzékeny feszültségmérő kapcsolódik.



4. ábra

Mint ismeretes, a mágneses tér és az elektromos áramot létrehozó töltéshordozók között kölcsönhatás van, ami a töltéshordozókra ható erő formájában jelentkezik. Ha  $v$  sebességgel haladó  $q$  töltést vizsgálunk ( $q = \pm e$ , ahol  $e$  az elemi töltés és elektronok esetén a negatív, lyukak esetén a pozitív előjel érvényes) akkor az erő

$$F = qvE$$

összefüggéssel adható meg, ha a töltés a mágneses indukció irányára merőleges irányban mozog, és az ilyenkor kialakuló erő a  $v$  sebesség és a  $B$  mágneses indukció vektorával kiegészített síkra merőleges. A  $B = \mu_0 H$  összefüggés felhasználásával a  $H$  mágneses térerősséget bevezetve ( $\mu_0$  a vákuum permeabilitása) az

$$F = qv\mu_0 H$$

összefüggést kapjuk. A mágneses térerősség kísérleti elrendezésben adott irányát, ill. a  $v$  sebesség irányát (amit most tekintünk az áram irányával megegyezőnek, mivel a szokásos irányítás ugyanis csak az elektronokra érvényes) felhasználva látható, hogy az  $F$  erő a minta szélességének irányába hat. Ez az  $F$  erő a 4b ábrán látható módon eltéríti a töltéshordozókat (az elektronokat és a lyukakat ellentétes irányba), így az eredetileg egyenes vonalú pályák görbültté válnak. A görbültség következtében a minta egyik oldalán elektronok, a másikon lyukak halmozódnak fel (ill. egyféle töltéshordozó esetén az egyik oldalon nagyobb töltéshordozó-koncentráció jön létre, mint a másik oldalon). A töltéshordozók szétválásával egyidejűleg olyan elektromos tér alakul ki, amely korlátozza a töltéshordozók szétválását. Egyensúlyi állapotban a  $q$  töltésre a mágneses tér miatt fellépő  $F$  erő és a szétválás keltette  $E$  erősségű elektromos tér miatt fellépő  $qE$  erő hat, amelyek az egyensúly miatt egymással egyenlő nagyságúak (de az irányuk ellentétes). Az egyensúlyi feltétel a

$$qE = qv\mu_0 H$$

összefüggéssel adható meg. Az összefüggésben szereplő  $v$  és  $E$  más, szemléletesebb jellemzőkkel is kifejezhető: bevezetve a minta két szélé között kialakuló  $U_H$  potenciálkülönbséget (amelyet Hall-feszültségnek neveznek)

$$E = \frac{U_H}{b},$$

ahol  $b$  a minta szélessége. A töltéshordozók átlagos sebessége az  $A = bd$  keresztmetszeten  $t$  idő alatt átáramló összes töltést megadó

$$Q = NqAvt$$

összefüggésből fejezhető ki (ahol  $N$  a töltéshordozó-koncentráció). Ebből

$$v = \frac{1}{NqA} \cdot \frac{Q}{t}.$$

A kapott összefüggésbe az  $A = bd$  és az  $I = \frac{Q}{t}$  helyettesítéseket elvégezve kapjuk, hogy:

$$v = \frac{I}{Nqbd}.$$

A kapott eredményeket az egyensúlyi egyenletbe helyettesítve:

$$\frac{qU_H}{b} = \frac{I\mu_0 gH}{Nqbd}.$$

A kifejezés két oldalát  $\frac{q}{b}$ -vel egyszerűsítve és bevezetve az

$$R_H \doteq \frac{1}{Nq},$$

un. Hall-állandót, a minta két szélé között kialakuló  $U_H$  feszültségre azt kapjuk, hogy:

$$U_H = R_H \frac{\mu_0 HI}{d}.$$

Az összefüggésből látható, hogy a Hall-feszültség a mérési elrendezés jellemzőitől (a minta vastagsága, a mintán átfolyó áram, a külső mágneses térerősség) - amelyek általunk választott értékek -, valamint a minta anyagára jellemző  $R_H$  arányossági tényezőtől függ. Az  $R_H$  Hall-állandót meghatározó  $q$  töltés a töltéshordozók típusától (elektron vagy lyuk) függő előjelű, így a Hall-állandó n-típusú félvezetők és fémek (amelyekben az áramot elektronok vezetik) esetén negatív előjelű és p-típusú félvezetők (amelyekben az áramot lyukak vezetik) esetén pozitív előjelű.

A Hall-hatást fémek esetén már régebben ismerték, és a félvezetők Hall-feszültségének mérésekor bizonyos esetekben a fémeknél tapasztalható képest fordított irányú feszültséget kaptak. Ez a tapasztalati tény csak a lyukvezetés fogalmának bevezetésével magyarázható, és ez volt az első kísérleti eredmény, amely a lyukak létezését, ill. az áramvezetésben betöltött szerepét igazolta.

A Hall-állandó a  $q$  töltésen ( $+1,6 \cdot 10^{-19}$  As) kívül az áramvezetésben résztvevő töltéshordozók koncentrációjától (amit megkülönböztetésül az n elektron-koncentrációtól  $N$  betűvel jelöltünk) függ. A fém és a félvezető Hall-hatása közötti különbséget csak a Hall-állandók eltérő értéke (és így azonos mérési elrendezésben a kialakuló Hall-feszültségek eltérő nagysága) okozza, és ez az eltérés jelentős. A nagy eltérés oka az, hogy a fémekben lényegesen nagyobb a töltéshordozók koncentrációja, mint a félvezetőkben, ezért a fémek Hall-állandója több nagyságrenddel kisebb, mint a félvezetőké.

A Hall-feszültség kísérleti meghatározása azért fontos, mert a kapott eredmény alapján eldönthető a vezetési folyamatban résztvevő többségi töltéshordozók típusa, és meghatározható a töltéshordozók koncentrációja.

Ismert Hall-állandóju és vastagságu félvezető mintát használva, a mért Hall-feszültség a mágneses térerősséggel lesz arányos, így ezek az eszközök (amelyeket a műszaki gyakorlatban Hall-generátornak vagy hallotronnak neveznek) a mágneses térerősség egyszerű mérésére használhatók.\*

\*/ L. a Szilárdtestek mágneses tulajdonságai c. fakultációs tankönyvet.



A Hall-generátorokat általában a nagy Hall-állandóju sziliciumból vagy germániumból (amelyek  $R_H$  Hall-állandója sajátvezető típusu félvezető anyag esetén közelítőleg  $-100$ , ill.  $-0,1 \text{ m}^3/\text{C}$ ) készítik, vastagságuk néhány tized milliméter, és a gyakorlati Hall-generátorokkal  $0,1 \text{ Vs/m}^2$  mágneses indukció esetén  $0,02 \dots 0,05 \text{ V}$  Hall-feszültség érhető el. Ezeket a Hall-generátorokat a mágneses térerősség érzékelésére, ill. mérésére, valamint az irányítástechnikában használják.

#### 4. példa:

Határozzuk meg egy  $1 \text{ mm}$  vastag tiszta Ge lapka és egy ugyanolyan vastag Cu lemez Hall-állandóját, és  $1 \text{ Vs/m}^2$  mágneses indukcióju térben,  $10 \text{ mA}$  mérőáram esetén kialakuló Hall-feszültségét! A számításokhoz használjuk a sajátvezető Ge l. példában kiszámított  $n_i = p_i = 4,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  töltéshordozó-koncentrációját és a réz 2. példában kiszámított  $8,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  elektron-koncentrációját! A kapott adatokból

$$R_H^{\text{Cu}} = \frac{1}{nq} \approx (8,5 \cdot 10^{22} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{-1} \approx 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{C} = 7,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{C} \text{ és}$$

$$R_H^{\text{Ge}} = \frac{1}{n_i q} \approx (4,3 \cdot 10^{13} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19})^{-1} \approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ cm}^3/\text{C} = 1,4 \cdot 10^{-1} \text{ m}^3/\text{C}.$$

Az  $U_H$  Hall-feszültség az azonos mérési elrendezés miatt csak a Hall-állandóktól függ. A mérési elrendezésre jellemző  $M$  értéket külön kiszámíthatjuk:

$$M = \frac{\mu_0 H I}{d} = \frac{B I}{d} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ VC/m}^3.$$

A Hall-feszültségek:

$$U_H^{\text{Cu}} = R_H^{\text{Cu}} M \approx 7,3 \cdot 10^{-11} \cdot 10 = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ V és}$$

$$U_H^{\text{Ge}} = R_H^{\text{Ge}} M \approx 1,4 \cdot 10^{-1} \cdot 10 = 1,4 \text{ V}.$$

A kapott eredmények jól mutatják a félvezető és a fém Hall-hatása közötti nagy eltérést. Ge Hall-feszültsége viszonylag egyszerűen mérhető, viszont a Cu Hall-feszültségének méréséhez speciális, nagy érzékenységu feszültségmérő szükséges.

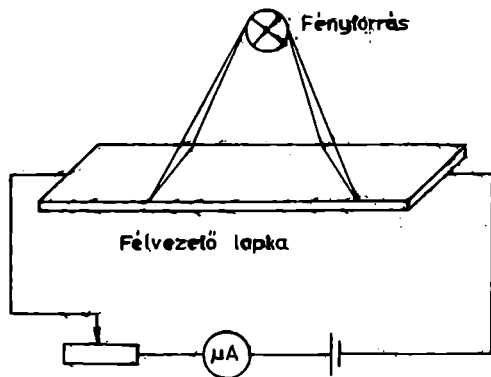
Megjegyezzük, hogy a közelítő elmélet alapján számolt Hall-állandók csak nagyságrendileg egyeznek a mért értékekkel.

#### Kérdések:

1. Gondoljuk meg, hogy hogyan változik a Hall-állandó, ha növeljük a minta hőmérsékletét! Magyarázzuk meg a változás okát!
2. Hogyan módosul a donorokat és akceptorokat egyaránt tartalmazó félvezető minta Hall-feszültsége az egyneműen szennyezett félvezető Hall-feszültségéhez képest?

#### 4.2. Fotoelektromos és elektrooptikai jelenségek

A félvezetők legrégebben ismert és a gyakorlatban legelőször felhasznált tulajdonsága a fotovezetés. Mint korábban említettük, az ideálisan tiszta félvezető anyagok sötétben szigetelők és csak megvilágítás hatására válnak elektromosan vezetővé (5. ábra). A vezetés kialakulása függ a fény hullámhosszától, és csak egy küszöbhullámhossz (az un. hosszuhullámu küszöb) alatti hullámhosszaknál figyelhető meg.



5. ábra

Néhány optoelektromos tulajdonságok szempontjából  
jelentős félvezető anyag tiltott sávjának  
szélessége és küszöbhullámhossza

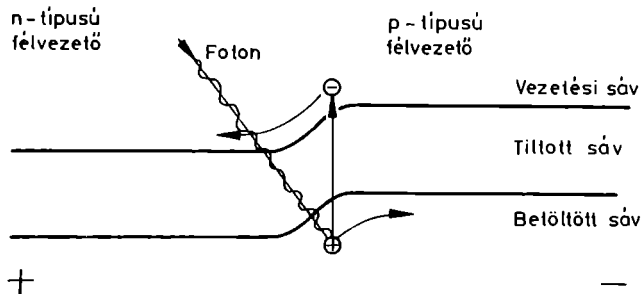
Anyag	$E_t$ , eV	$\lambda_k$ , $\mu\text{m}$
Si	0,18	1,12
Ge	0,11	1,77
GaAs	0,22	0,88
InP	0,19	1,03
CdS	0,38	0,52
CdSe	0,27	0,73
ZnS	0,59	0,33
ZnSe	0,42	0,48

A 3. táblázat néhány, a gyakorlatban használt félvezető anyag tiltott sávjának szélességét és a hosszuhullámú küszöbhullámhosszt tartalmazza. A táblázatban néhány, korábban nem említett félvezető anyag adatai is megtalálhatók. Ezek az anyagok elsősorban kedvező fotoelektromos tulajdonságaik miatt fontosak, és láthatóan a periódusos rendszer III. és V., ill. II. és VI. oszlopában található elemek vegyületeiből állnak. A felsorolt anyagok többsége a látható fény tartományában (0,3... ..0,8  $\mu\text{m}$ ) már elektromosan vezető.

A jelenség egyszerűen magyarázható a betöltött sávban lévő elektronok optikai gerjesztésével, amelynek során az elektronok átveszik a beeső foton energiáját és ennek hatására a vezetési sávba jutnak (miközben lyukak maradnak hátra a betöltött sávban).

A fotovezetésen alapuló fénydetektorok hibáinak kiküszöbölésére inkább fotodiódákat vagy fototranzisztorokat alkalmaznak.

A fotovezetéssel, a fotodiódával és a fototranzisztorral a Félvezetők és ionkristályok néhány optikai tulajdonsága c. fakultációs tankönyv foglalkozik.



6. ábra

A 6. ábra egy, a gyakorlati felhasználások szempontjából egyre fontosabb eszköz, a fényelem vagy napelem működését írja le. A napelem, szemben a fotodiódával, aktív eszköz, amely megvilágítás hatására villamos energiát termel. A napelemek legismertebb változata az önállóan vagy fényképezőgépbe beépítve készített un. fénymérő, amely a megvilágítás erősségével arányos feszültséget állít elő, ill. mér egy érzékeny műszerrel. A napelem működésének megértéséhez tegyük fel, hogy a p-n átmenetre nem kapcsolunk feszültséget. Ekkor a p-n átmenet két oldalán a többségi töltéshordozók (p-típusú oldalon a lyukak, n-típusú oldalon az elektronok) egy egyensúlyi állapotot igyekeznek felvenni, amelynek hatására az n-típusú oldalról elektronok diffundálnak a p-típusú oldalra, és a p-típusú oldalról lyukak diffundálnak az n-típusú oldalra. A diffúziós folyamatok következtében az átmenet egyes oldalain a többségi töltéshordozókból hiány lesz, ami megbontja a kezdeti elektromos semlegességet, és az n-típusú oldal kismértékben pozitív, a p-típusú oldal pedig kismértékben negatív töltésűvé válik. Természetesen ez a töltésszétválás az átmenet körüli szűk tartományra korlátozódik, és ebben a tartományban egy belső elektromos tér alakul ki. A napelemet megvilágítva a keletkező elektron-lyuk párt ez a belső tér választja szét, amelynek hatására az elektron az n-típusú oldalra, a lyuk pedig a p-típusú oldalra vándorol, és a p-n átmenet a telephez hasonlóvá válik. (A pozitív pólus a p-típusú oldal, a negatív pólus az n-típusú oldal lesz.) Az átmenetre mint energiaforrásra kapcsolt külső áramkörön keresztül eltávozó töltéseket a folyamatos megvilágítás pótolja.

Az első, energiatermelésre használt napelemek rendkívül drágák voltak, így főleg csak műholdak energiaellátására használták őket. A kutatások célja eddig is, de részben még ezután is az olcsó, nagy hatásfoku napelemek kidolgozása volt, ill. lesz, de egyes szakértők szerint a napelemes energiatermelés költsége az 1990-es években a hagyományos energiatermelési eljárások költségeinek szintjére csökken. A jelenlegi napelemek szilíciumból (mint legolcsóbb alapanyag) készülnek, hatásfokuk (a termelt villamos energia teljes besugárzási energiához viszonyított aránya) 12...18%, maximális kapocsfeszültségük 0,5...0,6 V és maximális fajlagos teljesítményük 100...200 mW/cm<sup>2</sup>.

A félvezetők elektromos tulajdonságainak vizsgálatakor eddig mindig az elektron-lyuk pár keletkezéséből indultunk ki, de természetesen az ellentétes folyamat, azaz az elektronok és lyukak egyesülése is végbemehet. Ezt a folyamatot rekombinációnak (ujraegyesülésnek) hívják, és hatására az elektron-lyuk pár a keletkezésükhöz szükséges energia leadásával megsemmisül. Félvezetőkben termikus egyensúlyi állapot esetén a folytonos töltéshordozó-keltés és rekombináció dinamikus egyensúlyra eredményezi az adott hőmérsékleten kialakuló elektron-és lyukkonzentrációt. A töltéshordozók keltése termikus vagy optikai gerjesztés következménye (mivel ez szolgáltatja a keltéshez szükséges energiát), viszont a rekombináció külső hatások nélkül, spontán módon is végbemegy, és a rekombináció során felszabadul az elektron-lyuk pár keltéséhez szükséges energia. A felszabaduló energiát a félvezető kristály nyeli el (mint rezgési energiát, amely a kristály felmelegedését eredményezi), vagy egy másik elektron, ill. egy foton veszi fel. Az elektronnak átadott energia hatására az gerjesztődik (magasabb energiaszintre, de nem feltétlenül a vezetési sávba kerül). A gyakorlati szempontból legfontosabb eset az, amikor a rekombináció során egy foton keletkezik. A különböző energiaszintű felszabadulási módok valószínűsége a félvezető anyag energiaszint-szervezetétől függ. A fotonkeltéses rekombináció főleg a GaAs (ill. a hozzá hasonló sáv szerkezetű félvezető anyagok) esetén jelentkezik.

A fotonkeltéses rekombináció alapján működő eszköz a világitódióda és a félvezető lézer. Természetesen a folyamatos fotonkeltéshez (fénykeltéshez) a rekombináció során megsemmisülő elektronokat és lyukakat pótolni kell, erre a célra elektromos áramot használnak. A gyakorlati világitódióda vagy félvezető lézer ezért lényegében egy nyitóirányú feszültségre kapcsolt p-n átmenet, amelyen nagy áram folyik. A nagy nyitóirányú áram az n-típusú oldal vezetési sávjában nagy elektron-sűrűséget hoz létre, és innen az elektronok a térerősség hatására a p-típusú oldalra mennek át, ahol a lyukakkal rekombinálnak. Az eszközből kilépő fény erőssége a rekombináció gyakoriságától függ, így nagy fényerősség eléréséhez nagymértékben szennyezett (sok rekombinációra képes töltéshordozót tartalmazó), tipikusan  $10^{18} \dots 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  szennyező-koncentrációjú félvezető anyagot használnak.

A p-n átmeneten kis áramot átvezetve főleg spontán rekombináció jön létre, amely nagy térazögbe szétsugárzott, nem koherens fényt eredményez. Az így működő eszközök a világitódiódák (LED-ek), amelyek főleg kis teljesítményű izzólámpák helyettesítésére alkalmasak.

A lézerhatás kialakulásához az átmeneti tartományban nagy néhányszor tízezer  $\text{A/cm}^2$  küszöbérték feletti áramsűrűség szükséges (amelyhez speciális, az optikai működési feltételeket is kielégítő szerkezet is társul). A félvezető lézerek a szokásos kis teljesítményű lézerek helyett használhatók, és előnyük a kis méret, ill. az alacsony előállítási költség.

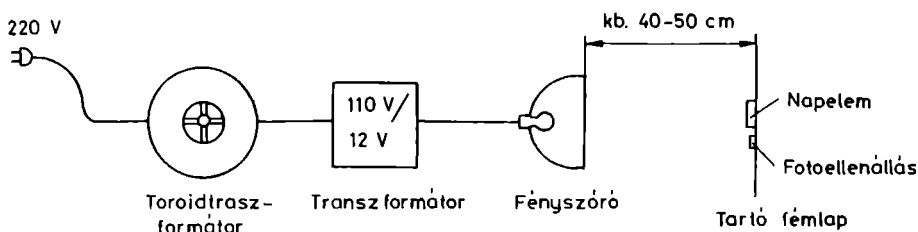
A világitódiódák és félvezető lézerek általában GaAs, InAs, GaSb vagy InSb alapanyagból készülnek.

Az optoelektromos tulajdonságok jobb megértéséhez két, egyszerű eszközökkel megvalósítható kísérletet írunk le.

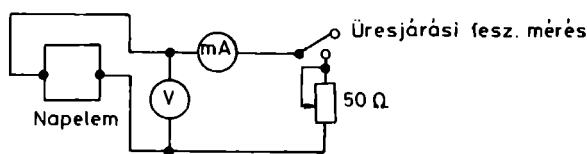
### 1. kísérlet: Napelem viselkedésének vizsgálata

A kísérletet a Volvo cég BPX 33 típusjelű, Si alapanyagú napelemével végezzük. A napelem  $20 \cdot 20 \text{ mm}^2$  méretű lapos kivitelű és viszonylag egyszerűen beszerezhető (bár a gyakorlatban más, hasonló méretű napelemet is használhatunk). A napelemek jellegzetessége, hogy üresjárású feszültségük függet-

len a felülettől, és a megvilágítás növekedésével egy anyagtól függő határértékhez tart (ez Si esetén 0,5...0,6 V). A napelem rövidzárási árama viszont lineárisan függ az aktiv (megvilágított) felülettől és a megvilágítás erősségétől (egy bizonyos határig). A kísérlet célja a napelem gyakorlati alkalmazás szempontjából fontos paramétereinek vizsgálata.



a)



b)

7. ábra

A kísérleti elrendezést a 7a ábra mutatja. A felhasznált fényforrás egy kerek gépkocsi-fényszóró a hozzá tartozó 12 V, 40/45 W-os izzólámpával. (A méréshez csak a 45 W-os, ún. "országuti" fényt előállító izzószálat használjuk.) Az izzólámpát egy 110/12 V-os (megfelelő teljesítményű) transzformátorról működtetjük, és a fényerősséget a transzformátor primer feszültségét előállító 220 V-os toroidtranszformátorral változtatjuk. (Célszerű a lámpa feszültségét mérni és ügyelni arra, hogy az ne legyen több 14 V-nál, mert az a lámpa gyors tönkremenetelét okozza.) Amennyiben megfelelő gyűjtőlencsénk

van, akkor célszerű a fényszóró fényét a napelemre koncentrálni (lehetőleg egyenletes felületi megvilágítást, nem pedig a pontszerű megvilágítást hozni létre, mert ez túlhevíti a napelemet). A napelem jobb hűtése érdekében célszerű azt egy nagyobb fémlapra szerelni. A megvilágítás erősségének hiteles mérése speciális mérőeszközt igényel, így attól eltekintünk (esetleg a tájékoztató értékek meghatározásához a kísérlet végén leírt egyszerű fotoellenállásos fénymérőt használhatjuk). Az üresjárású feszültség méréséhez lehetőleg nagy belső ellenállású feszültségmérőt használjunk (7b ábra). A rövidzárási áram mérésénél a napelem kivezetéseit közvetlenül egy jó minőségű (kis belső ellenállású), kb. 150 mA méréshatáru árammérővel zárjuk rövidre. A kapott értékeket grafikusan ábrázolva (különböző megvilágításoknál felvett értékek esetén) meghatározható az üresjárású feszültség határértéke (tipikusan 0,5...0,6 V), ill. a rövidzárási áram megvilágítástól való függése (a megvilágítást empirikus egységekben, pl. az izzó feszültségével vagy az egyszerű fénymérővel kijelzett feszültséggel, vagy árammal mérhetjük). Figyeljük meg, hogy hogyan változik a rövidzárási áram, ha a napelem felületének egy részét fényt át nem eresztő anyaggal letakarjuk!

A napelem gyakorlati alkalmazásához általában az adott megvilágításhoz tartozó feszültség-áram jelleggörbét szokták megadni. Ennek a jelleggörbének két speciális pontja a rövidzárási áram ( $U = 0, I = I_{RZ}$ ) és az üresjárású feszültség ( $U = U_{ü}, I = 0$ ). A többi pontot a különböző ellenállásokkal terhelte napelem feszültségének és áramának mérésével lehet meghatározni. A terhelőellenállás egy min. 50  $\Omega$ -os tolóellenállás lehet, amellyel a terhelőáram a kb. 10...100 mA tartományban, kellő finomsággal szabályozható. A mérést a maximális erősségű megvilágításnál végezzük, és az egyidejűleg mért terhelőáram, ill. kapocsfeszültség értékeket ábrázoljuk!

#### Feladatok:

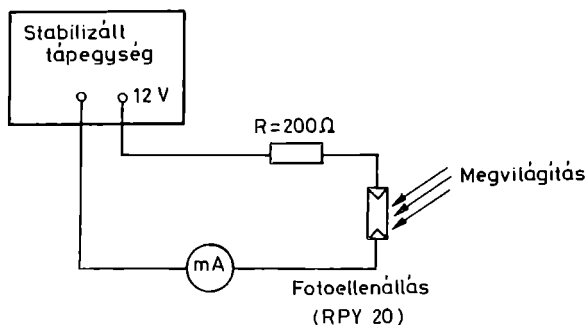
1. A napelem mért feszültség-áram jelleggörbéje alapján becsüljük meg a napelemből kivehető maximális teljesítményt (ahol a feszültség és áram szorzata maximális)!



- Amennyiben több azonos napelemünk van, akkor ismételjük meg a mérést azok soros- és párhuzamos kapcsolásával (természetesen minden napelemet lehetőség szerint egyforma erősségű fényvel világítsunk meg)!
- A napelem aktív felületének részleges letakarásával igazoljuk, hogy a rövidzárási áram a megvilágított felület lineáris függvénye!

### Kérdések:

- A napelem működéséről elmondottak alapján gondoljuk meg, hogyan függ az üresjárású feszültség a félvezető tilos sávjának szélességétől! (Gondoljunk a fordított működési elvű világítódiódákra!)
- A napelem árama a megvilágítás erősségétől függ. A technikai korlátoktól eltekintve mi korlátozza a rövidzárási áram értékét?
- Egy tipikus zsebrádió 9 V-os telepből kb. 40 mA áramot vesz fel. A mérési eredmények felhasználásával tervezzünk a zsebrádióhoz napelemes tápegységet!



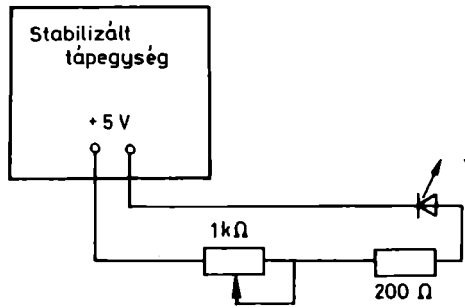
8. ábra

Az előző kísérleti elrendezést kiegészítetjük a 8. ábrán látható egyszerű fénymérővel. A fénymérő érzékelőeleme egy RPY 20 típusjelű CdS fotoellenállás, amelyet célszerűen a vizsgált napelem mellett, azzal azonos megvilágítású helyen helyezhetünk el. A fotoellenállás 50 lx megvilágítás esetén kb.

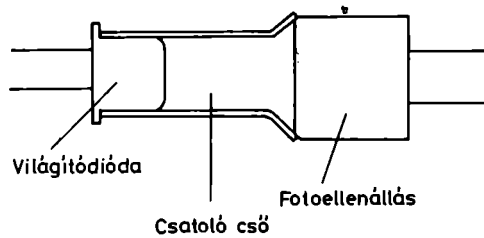
1500  $\Omega$  ellenállású (ez függ a megvilágítás hullámhosszától) és érzékenysége viszonylag nagy. A fotoellenállást tartalmazó körben folyó áram a megvilágítás erősségétől függ, így összehasonlítójellegű méréseknél a fényerősséget a mért árammal adhatjuk meg. A fotoellenállással sorbakötött 200  $\Omega$ -os ellenállás a fotoellenállás védelmét szolgálja (kb. 2 W terhelhetőségű legyen). A fénymérőhöz 12 V tápfeszültség esetén kb. 100 mA méréshatáru árammérőt használjunk! Nagyon kis megvilágítások esetén a fotoellenállásra kapcsolt feszültséget növelhetjük, de a fotoellenálláson hővé alakuló teljesítmény max. 1 W lehet. (Nagy megvilágítás esetén viszont a tápfeszültség csökkentésével csökkenthetjük az érzékenységet.) Ha a fénymérőt a napelem vizsgálatához használjuk, akkor az izzólámpa tápfeszültségének változtatásával egy lineárisan növekvő fényerősség sorozatot kereshetünk (amelynél a fénymérő árama lineáris függvény szerint változik, amelyhez általában nemlineárisan változó feszültség tartozik).

## 2. kísérlet: Világítódioda vizsgálata

Vizsgáljuk meg a széles körben elterjedt, vörös fényt adó CQY 26 típusjelű világítódioda néhány tulajdonságát! A méréshez az előzőekben leírt egyszerű fénymérőt használjuk, és a világítódioda fényét nemátlátszó, lehetőleg fényes belső felületű, kb. 1...2 cm-es csődarabbal vezetjük a fotoellenállásra (a 9b ábra szerinti elrendezést alkalmazva). Erre a célra jól használható egy megfelelő átmérőjű alumínium csődarab, amelyhez fekete szigetelőszalaggal rögzítjük a világítódiodát és a fotoellenállást. A mérőrendszer vázlatát a 9. ábra mutatja. A mérés során meghatározzuk a világítódiodán átfolyó áram nagysága, iránya, valamint a kapott fényerő közötti kapcsolatot. A mérésnél a dióda nyitóirányú árama max. 50 mA lehet, és az áramot 5 V-os feszültség esetén egy min. 1 k $\Omega$ -os (min. 2 W-os) huzalpotenciométerrel szabályozhatjuk (a világítódioda védelmét szolgálja a potenciométerrel sorbakapcsolt 200  $\Omega$ -os ellenállás). Az áramot 50 mA méréshatáru árammérővel mérhetjük.



a)



b)

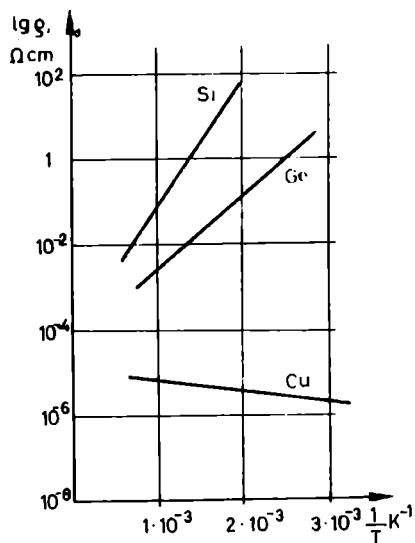
9. ábra

Feladatok:

1. Határozzuk meg és ábrázoljuk a világítódióda áram-feszültség jelleggörbéjét (egyszerű diódként, nyitóirányba kapcsolva) és hasonlítsuk össze egy közönséges egyenirányító dióda jelleggörbéjével!
2. A fénymérő áramát fényerősségértékként felfogva határozzuk meg a világítódióda áram-fényerősség jelleggörbéjét!
3. Vizsgáljuk meg, mi történik, ha a világítódiódára záróirányú feszültséget kapcsolunk! (A biztonság kedvéért a mérést 3 V feszültséggel és maximális ellenállással végezzük!)

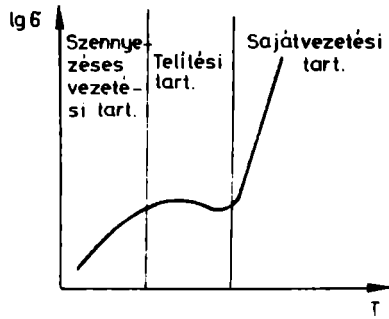
### 4.3. Termoelektromos jelenségek félvezetőkben

A félvezetők elektromos tulajdonságait befolyásoló hatások között első helyen a hőhatás áll. A félvezető eszközök jellemzőinek hőmérsékletfüggése annyira jelentős, hogy gyakran azt mondják, hogy minden félvezető eszköz egy hőmérő, csak esetleg más célra használják. A nagyfokú hőmérsékletfüggés jól magyarázható a töltéshordozók termikus gerjesztési folyamatával és ennek a vezetési folyamatban elfoglalt fontos szerepével.



10. ábra

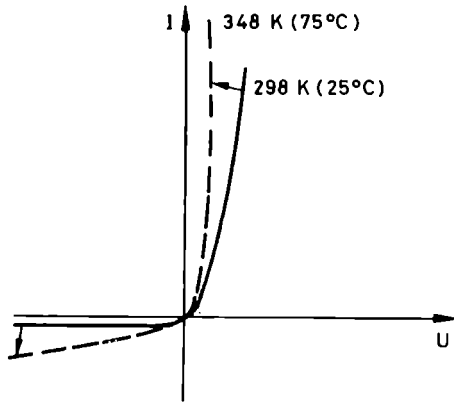
Az egyes anyagok fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggését jól mutatja a 10. ábra. Az ábrán az egyszerűbb ábrázolhatóság érdekében a fajlagos ellenállás logaritmusa és a hőmérséklet reciproka közötti kapcsolat látható. Az ábrában a két leggyakrabban használt félvezető anyagra vonatkozó adatok mellett feltüntettük egy tipikus fémes vezető (réz) fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggését is. Az ábra alapján látható, hogy szemben a fémekkel a félvezető anyagok fajlagos ellenállása a hőmérséklet növelésével ( $T^{-1}$  csökkenésével) csökken, és a változás sebessége (az ún. hőfoktényező) félvezetők esetén lényegesen nagyobb, mint a fémeknél.



11. ábra

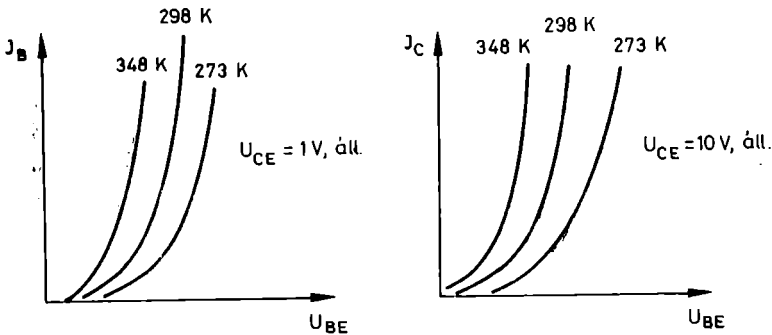
A félvezető anyagok széles (kb. 20 és 1200 K közötti) hőmérséklet-tartományban érvényes fajlagos vezetőképesség-hőmérséklet jelleggörbéjét a 11. ábra mutatja. A görbén három jellegzetes tartomány figyelhető meg. Alacsony hőmérsékleten a vezetést főleg az anyagban levő, termikusan könnyen gerjeszthető szennyezőatomoktól eredő töltéshordozók okozzák. Ez a vezetési folyamat egy ideig a hőmérséklettel arányosan növekvő vezetőképességet eredményez (mivel növekszik a töltéshordozók száma), de egy adott hőmérséklet fölött gyakorlatilag már minden könnyen gerjeszthető elektron gerjesztődött, így a hőmérséklet további növelésével új töltéshordozók már nem hozhatók létre. Ezt a tartományt ezért telítési szakasznak nevezik. A hőmérsékletet tovább növelve egyre jelentősebb lesz a sajátvezetést eredményező elektronok termikus gerjesztése, és az ebből eredő sajátvezetési folyamat.

A gyakorlatban használt félvezető eszközökben a vezetőképesség erős pozitív (a fémekével ellentétes) hőmérsékleti együtthatóju hőmérsékletfüggése számos nehézséget okozhat. A 12. ábra egy közönséges germánium rétegdíóda feszültség-áram jelleggörbéjének hőmérsékletfüggését mutatja. Látható, hogy a diódára adott feszültséget kapcsolva, a hőmérséklet növelésével növekszik a dióda nyitó- és záróirányú árama. Az áramnövekedés már kis hőmérsékletnövekedés esetén is jelentős lehet, és a nagyobb áram a dióda további felmelegedését (és így az ellenállás negatív hőmérsékleti együtthatója miatt az áram további növekedését) okozza. A folyamat végeredménye az esetek többségében a dióda tönkremenetele.



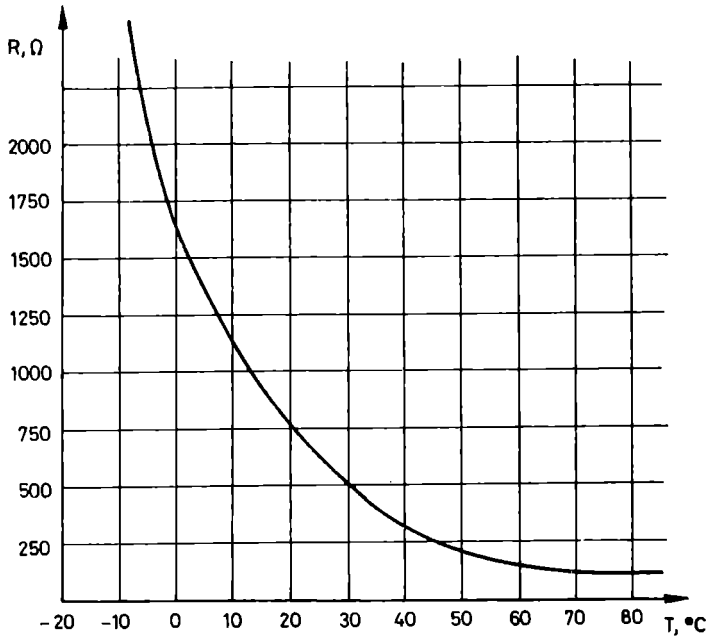
12. ábra

Ezt a félvezetőkre jellemző, az ellenállás negatív együtthatóju hőmérsékletfüggésétől eredő önromboló meghibásodási folyamatot a műszaki gyakorlatban termikus megfutás néven ismerik, és csak a félvezető eszköz megfelelő hűtésével kerülhető el.



13. ábra

Hasonló hőmérsékletfüggő áramnövekedés figyelhető meg a tranzisztoroknál, amelyet egy tranzisztor különböző hőmérsékletekhez tartozó bázisáram - bázis-emitter feszültség és kollektoráram - bázis-emitter feszültség jelleggörbéit tartalmazó 13. ábrán mutatunk be.

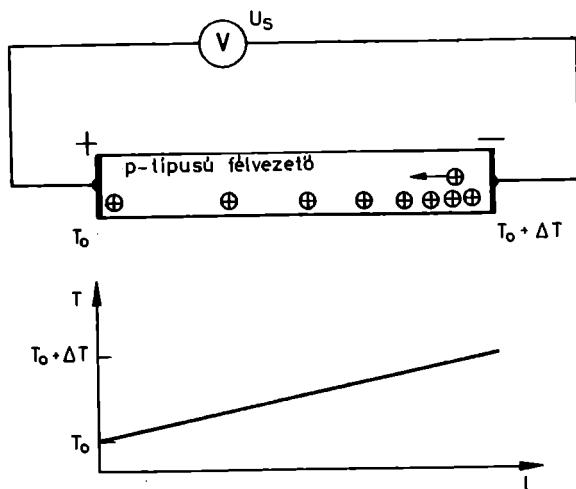


14. ábra

A félvezetők vezetőképességének hőmérséklet okozta növekedését számos hőmérséklet-érzékelő, ill. -szabályozó berendezésben a gyakorlatban is hasznosítják. Az egyszerűbb hőmérséklet-érzékelőkben a hőmérséklet érzékelésére közönséges rétegdiódákat vagy tranzisztorokat használnak. A speciális berendezésekben viszont érzékelőként az ún. termisztorokat alkalmazták. A termisztor lényegében félvezető alapanyagból készített, negatív hőmérsékleti együtthatóju hőmérsékletfüggő ellenállás, amelyet a mérési folyamat jellegének megfelelően alakítottak ki (pl. a gyors hőmérséklet-változásokat is követni képes kivitel, a vizsgált folyamatot hőelvonással csak minimálisan befolyásoló kivitel). A termisztorokat a felhasznált félvezető anyag és szennyező anyagának, ill. koncentrációjának megválasztásával széles ellenállás- és hőmérséklet-tartományra készítik. Egy gyakorlatban használt, lakások hőmérséklet-szabályozójában érzékelőelemként működő termisztor ellenállás-hőmérséklet jelleggörbáját a 14. ábra mutatja. A termisztor  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  alatti tartományban kialakuló nagy hőmérséklet-

-érzékenysége a gyártásból adódó nagy jelleggörbe-bizonytalanság miatt nem használható ki, viszont  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  fölött már tulki-csi az érzékenység.

A félvezetők termoelektromos tulajdonságainak egy régóta ismert, de a gyakorlatban csak az utóbbi időben hasznosított területe a Seebeck- és a Peltier-hatásokon alapszik. A Seebeck-hatás lényege, hogy két különböző fémből álló fém-fém vagy fém-félvezető érintkezési helyek között potenciálkülönbség alakul ki, ha az érintkezési helyek hőmérséklete különböző. A potenciálkülönbség arányos a két kontaktus közötti hőmérsékletkülönbséggel és fordítottan arányos a kontaktusok közepes hőmérsékletével. A két fém-fém kontaktus között kialakuló feszültséget már régóta használják a hőmérsékletmérő eszközökben. A Seebeck-hatás (és így a kialakuló potenciálkülönbség is) fém-félvezető kontaktusok esetén lényegesen nagyobb, mint fém-fém kontaktusoknál, ezért a félvezetőgyártási technológia fejlődésével gyakorlati jelentősége növekedett.



15. ábra

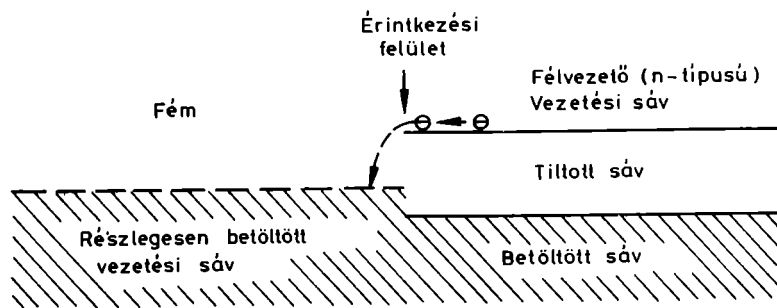
A jelenség fém-félvezető kontaktusok esetén a már megismert vezetési tulajdonságok alapján magyarázható. A Seebeck-feszültség kialakulásának folyamata a 15. ábra alapján követ-



hető. A félvezetőről feltételezzük, hogy erősen szennyezett, p-típusú (n-típusú félvezető esetén teljesen hasonló megfontolások érvényesek) és az egyszerűség kedvéért a két végén levő elektróda, ill. az elvezetőhuzal azonos fémből készül. A hőmérséklet a félvezető minta hossza mentén egyenletesen növekszik. Ha a félvezető minta két vége között hőmérséklet-különbség van, akkor az eltérő termikus gerjesztés miatt a többségi töltéshordozók (jelen esetben a lyukak) koncentrációjának is különbözni kell, mivel a minta melegebb végén több lyuk keletkezik, mint a hidegebb végén. A melegebb oldali nagylyukkonzentráció miatt a lyukak a hidegebb (kisebb lyukkonzentrációju) oldal felé fognak diffundálni, és ennek hatására a kezdetben elektromosan semleges minta melegebb oldali negatív töltésű (a termikus egyensúlyi állapothoz képest lyukhiányos), a hidegebb vége pedig pozitív töltésű (a termikus egyensúlyi állapothoz képest többletlyukakat tartalmazó) lesz (egy telephez hasonlóvá válik). (A megoszlás teljesen hasonló módon jön létre, mint a napelemeknél, csak ott a hőmérséklet állandó és a töltéshordozó-konzentráció változik a p- és n-típusnak megfelelően.) A töltések szétválását okozó diffúziós áramot a külső áramkörben folyó, a potenciálkülönbségtől eredő áram fogja kiegyenlíteni. Az így kialakított ún. termoelektromos generátor ennek megfelelően a hőenergiát közvetlenül villamos energiává képes alakítani. A termoelektromos generátor (fém-félvezető kontaktuspár) fűtésére tetszőleges hőforrás (napsugárzás, láng, radioaktív izotóp bomlásából adódó hő stb.) használható, így ezek az eszközök széles körben, karbantartást nem igényelve alkalmazhatók. Egy fém-félvezető kontaktuspárral viszonylag kis feszültség (tipikusan 50 mV) érhető el, ezért a gyakorlati alkalmazásoknál a nagyobb feszültséget több elem elektromos sorbakapcsolásával (amelyek a hőhatás szempontjából természetesen párhuzamosan kapcsolódnak) érik el, amíg a teljesítményt több elem párhuzamos kapcsolásával növelik. Jelenleg kb. 100 W maximális teljesítményű termoelektromos generátorokat készítenek, és a magas árak, ill. a kis hatásfokuk (eddig max 10%-os hatásfokot értek el a gyakorlatban) miatt csak speciális berendezésekben (műholdak, tengeralatti távközlési kábelek erősítői, automatikus működésű me-

teorológiai állomások stb.) alkalmazzák őket. A termoelektromos generátorokban a működési hőmérséklettől függően különböző félvezető anyagokat alkalmaznak. A 300...500 K tartományban a legjobb eredményt a félvezető tulajdonságú BiTeSe ötvözet adja, amíg magas hőmérsékleten a Ge és Si használható a legelőnyösebben.

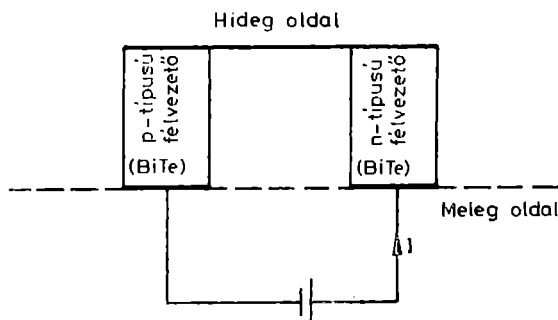
A Peltier-hatás lényegében a Seebeck-hatás fordítottja, és akkor lép fel, ha egy fém-fém vagy fém-félvezető kontaktuson áramot vezetünk keresztül. Ilyen esetben az áram irányától függően azt tapasztaljuk, hogy a kontaktus kismértékben felmelegszik (a kontaktus ellenállásától eredő Joule-hőnél nagyobb mértékben) vagy lehül.



16. ábra

A jelenség pontos fizikai leírása bonyolult, így csak egy szemléletes képet kívánunk adni a Peltier-hatás kialakulására. Ehhez vizsgáljunk egy fém-n-típusú félvezető kontaktust, amelyre olyan polaritású feszültséget kapcsolunk, hogy a félvezetőben levő többségi töltéshordozók (elektronok) a fém felé áramoljanak. A fém, ill. félvezető energia-sávszerkezetét a 16. ábra mutatja. Látható, hogy ha a félvezető vezetési sávjában levő elektronjainak nagyobb az energiája, mint a fémbe levő vezetési elektronoknak, akkor a fémbe átlépve az energiafeleslegüket a kristályrácsnak adják át, aminek hatására az felmelegszik. A jelenség fordított áramirány esetén elvileg hasonló módon megy végbe, de ilyenkor a fémbe csak az átlagosnál nagyobb energiájú elektronok képesek a félvezetőbe átlépni, ami a kontaktus környezetéből hőt (energi-

át) von el (hasonlóan a párolgási folyamathoz). Az energiaelvonás következtében a kontaktus lehül (ezt természetesen bizonyos mértékig kiegyenlíti a Joule-hő). A p-típusú félvezető esetén a lyukak árama hasonló hőenergia-nyereséget vagy -vesztést eredményez.



17. ábra

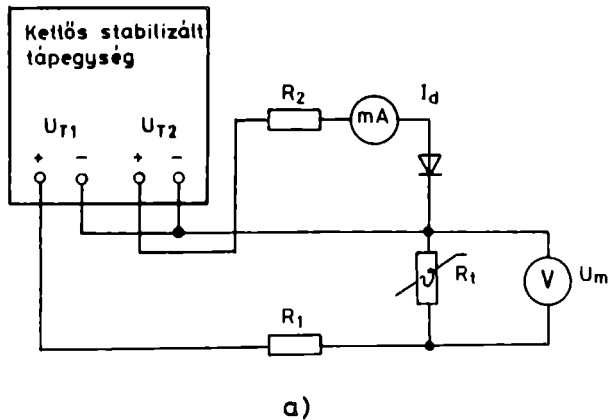
A jelenséget felhasználó Peltier-elem az alkalmas irányú áram hatására hőenergiát von el a hozzá kapcsolódó térrészből (azaz hűti azt). A gyakorlatban használt Peltier-elemek kialakítását a 17. ábra mutatja, és ezen jól látható, hogy egy n- és egy p-típusú félvezető mintát elektromosan sorbakapcsolva (de termikusan párhuzamosan) megkettőzhető a hűtőhatás. A Peltier-elemek kis feszültségről működtethető, karbantartást nem igénylő, zajmentes hűtőgépek készítésére használhatók. A jelenleg gyártott Peltier-elemekkel elérhető kis hűtőteljesítmény miatt ezeket a "félvezetős" hűtőgépeket egyelőre csak speciális célra készítik, pl. gépkocsikba beépítve.

A Seebeck- és a Peltier-hatás elméletileg teljesen tisztázott, és szélesebb körű alkalmazásukat jelenleg csak a gyártástechnológiai problémák, ill. gazdaságossági megfontolások korlátozzák.

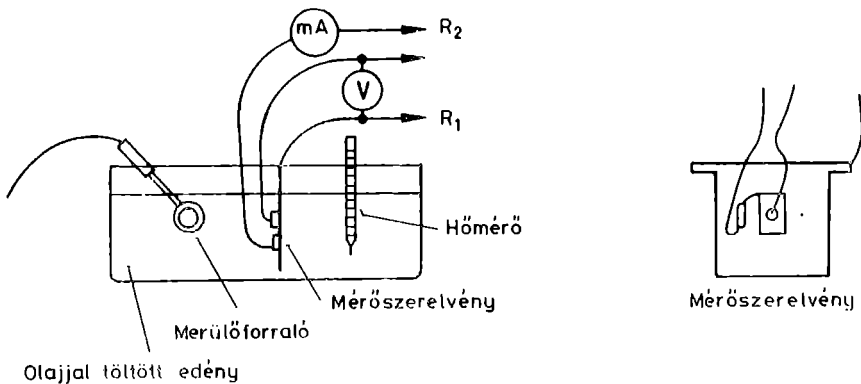
### 3. kísérlet: A félvezetők hőmérsékletfüggésének vizsgálata

Vizsgáljuk meg a félvezetők vezetőképességének hőmérsékletfüggését! A kísérlethez a Kőbányai Porcelángyár 1T11 típusjelű termisztorát és az OA 1072 (Tungram) típusjelű rétegdi-

ódát használjuk. A termisztor fémlapra csavarozható kivitelű (más, hasonló kivitelű termisztor is használható, a típuszám-ból az LTT a kivitelre, az utána álló szám pedig a termisztor  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on,  $\text{k}\Omega$ -ban mért ellenállására utal), félvezető tulajdonsága fém-oxidból készül és  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on  $1\text{ k}\Omega$  ellenállású. A dióda Ge alapanyagból készült, és azért választottuk, mivel a Ge vezetőképessége erősebben függ a hőmérséklettől, mint a Si vezetőképessége.



a)



b)

18. ábra

A kísérlethez használt mérési elrendezés elvi rajzát a 18a ábra mutatja. A mérés célja a termisztor ellenállásának és a nyitóirányba kapcsolt dióda munkaponti áramának néhány hő-

mérsékletértéken való meghatározása. A méréshez fémlemez szerelvényt (Al vagy Cu lemezből) készítünk, amelyre felcsavarozzuk a termisztort és két lyukon átfűzött huzaldarabbal (az üvegtok közepén megfogva) rögzítjük a diódát (jó hővezetőképességű ragasztót is használhatunk a dióda rögzítésére). A dióda katódkivezetését (csikkal jelölve) a termisztor egyik rögzítőcsavarja alá fogjuk, és a lemezre csavarral egy elvezetőhuzalt rögzítünk. A teljes szerelvényt egy alkalmas méretű, olajjal feltöltött (ugy, hogy a lemezt ellepje az olaj) edénybe helyezük (az edény hőálló legyen és a lemez szélén hagyott fülekkel lógathatjuk a lemezt az olajba). Az olaj hőmérsékletét egyszerű mérülőkörrel növeljük és az aktuális hőmérsékletet hőmérővel mérjük. A mérés gyakorlati kialakítását a 18b ábra mutatja. (A kísérlet egyszerűsíthető, ha a lemez felületét - a diódával és a termisztorral ellentétes oldalról - hajszáritó meleg levegőjével melegítjük. Ilyenkor a hőmérőt szorosan a lemezhez érintve, "szélárnyékban" kell rögzíteni. Ez egyszerűbb, de pontatlanabb hőmérsékletmérést eredményező kísérleti elrendezés.)

A termisztor vizsgálatakor a termisztoron létrejövő feszültséget mérjük. Az  $R_1$  és  $R_t$  ellenállásokból álló körben folyó áram:

$$I = \frac{U_{T1}}{R_1 + R_t},$$

ahol  $U_{T1}$  a tápfeszültség, és ennek hatására a termisztoron kialakuló feszültség:

$$U_m = IR_t = \frac{U_{T1} R_t}{R_1 + R_t}.$$

Az összefüggésből  $R_t$  értékét kifejezve kapjuk, hogy:

$$R_t = \frac{U_m R_1}{U_{T1} - U_m}.$$

A méréshez  $U_{T1} = 10$  V tápfeszültséget,  $R_1 = 1000 \Omega$ -os ellenállást és  $20^\circ\text{C}$ -on  $1000 \Omega$  ellenállású termisztort használva

20 °C-on 5 V körüli  $U_m$  feszültséget mérhetünk, amely a hőmérséklet növelésével csökken (mivel a termisztor ellenállása csökken).

A diódás mérőkörben  $R_2 = 150 \Omega$ -os ellenállást és 3 V-os tápfeszültséget választottunk. Ehhez a katalógusból vett munkaponti áram kb. 10 mA, és a hőmérséklet növelésével ez növekedni fog. (A dióda védelme érdekében nem célszerű 60...70 °C-nál magasabb hőmérsékletet alkalmazni. A termisztor hőmérséklete elérheti a 120 °C-ot is.) A méréshez célszerű kettős stabilizált tápegységet használni, az ellenállások 0,5...1 W terhelhetőségűek lehetnek. Az egyes feszültség-, ill. áramértékek leolvasása előtt a fűtést kapcsoljuk ki, majd 1-2 min-ig várjunk, hogy a szerelvény hőmérséklete állandósuljon. (Melegítés közben keverjük az olajat az egyenletes melegedés érdekében!)

A dióda munkaponti áramának hőmérsékletfüggése sokkal jellegzetesebb, ha záróirányba kapcsoljuk. A záróirányú áram méréséhez érzékeny (kb. 100  $\mu A$  méréshatáru) árammérő szükséges. A méréshez célszerű nagyobb (pl. 20 V-os) tápfeszültséget használni. Záróirányú kapcsolást legegyszerűbben a tápfeszültség polaritásának megfordításával érhetjük el. A dióda védelme érdekében lehetőleg 100  $\mu A$ -nél nagyobb záróirányú áramot ne alkalmazunk.  $U_{T2} = 20 V$  esetén kezdetben (20 °C-on) 15...20  $\mu A$  áramot mérhetünk. A kísérlet során vigyázzunk, nehogy a felmelegített olaj égési sérülést okozzon!

#### Feladatok:

1. A mért  $U_m$  értékek alapján számoljuk ki a termisztor adott hőmérséklethez tartozó ellenállását, és ábrázoljuk az  $R_T(T)$ -T függvényt!
2. A dióda áramát ábrázoljuk a hőmérséklet függvényében és határozzuk meg a munkaponti áram hőmérsékleti együtthatóját (1 °C hőmérséklet-változáshoz tartozó megváltozását)!

### Kérdések:

1. Azt állítottuk, hogy a germánium vezetőképessége érzékenyebben függ a hőmérséklettől, mint a szilíciumé. Magyarázzuk meg ennek az okát, és vonjunk le következtetést a tiltott sáv szélessége és a hőmérséklettel szembeni érzékenység kapcsolatára!
2. Próbáljuk megmagyarázni, hogy a dióda záróirányu árama miért függ jobban a hőmérséklettől, mint a nyitóirányu áram!











Ára: 3,50 Ft

**28 974/II-7a**