

Korunkban az automatizálás egyre nagyobb szerepet játszik a tudományos kutató munka különböző területein, az ipari termelésben és mindennapi életünk kényelmesebbé tételében is. Gondoljunk csak egy hold-szonda működésére, a gyárak automata gépsoraira vagy a hőszabályozós villanyvasalóra. A felsorolt példákban – a külső körülmények mérlegelése alapján, illetve egy előre meghatározott programnak megfelelően – a gépek emberi beavatkozás nélkül végzik el a szükséges feladatokat. Ilyen esetekben, amikor az embert még a gépek irányításából is kikapcsoljuk, automatizálásról, illetve szaknyelven *irányítástechnikáról* beszélünk.

Az irányítástechnika fejlődését nagy mértékben segíti a félvezető elemek használata. Fontos követelmény ugyanis, hogy a gépek munkáját összehangoló berendezés kis méretű, hosszú életű és kis energiafogyasztású legyen. Ezen követelményeknek a különböző félvezető elemek jól megfelelnek.

Felépítésüket tekintve egyes félvezető csak bizonyos adott tulajdonságú, azonos módon kialakított kristályokat tartalmaznak, azaz csak  $n$ , illetve  $p$  típusú rétegből állanak.

Ezeket *egyszerű félvezető elemeknek* nevezzük (termisztor, fényellenállás, hallotron). Más félvezető elemekben viszont különböző módon kialakított, egymástól eltérő összetételű rétegeket találunk. Az ilyen típusúakat nevezzük *összetett félvezető elemeknek* (kristálydiódák, tranzisztor). A továbbiakban a gimnáziumi IV. osztályos tankönyv „*Elektromos áram félvezetőikben*” c. fejezetét ismertnek tételezzük fel. A germániumkristály vezetésére vonatkozó részt csak néhány számszerű adattal egészítjük ki.

A Ge-ban szobahőmérsékleten a felvett hőmennyiség  $\text{cm}^3$ -enként  $10^{13}$  nagyságrendű elektron részére biztosítja az atomok közvetlen erőteréből való kilépést és a rácspontok közötti térben történő hőmozgást. Elektromos vezetés szempontjából ennyi töltéshordozó a fémek  $\text{cm}^3$ -enként  $10^{22}$  nagyságrendű szabad elektronjához képest nagyon kevésnek mondható.

A tapasztalat azt mutatja, hogy ha a tiszta alapanyagba kis mennyiségű szennyezett atomot építünk be, akkor a vezetés több nagyságrenddel megnövekszik. Germánium alapanyag esetén, ha  $\text{cm}^3$ -enként az ott levő  $4,4 \cdot 10^{22}$  számú atomhoz pl.  $10^{15}$  arzén atomot adunk, akkor  $10^{15}$  szabad elektron jelenik meg a germánium minden  $\text{cm}^3$ -ében.

Ezt úgy értelmezhetjük, hogy a germánium kristályrácsába beépült arzén atomok a sajátos elrendezés folytán egy-egy olyan elektronnal rendelkeznek, melyek könnyen kikerülnek az atomok közvetlen erőteréből, azaz nagyon kicsi az *aktiválási energiájuk*. A tiszta germániummal ellentétben itt nem marad lyuk a kilépett elektron helyén. Az elektron helyén maradó pozitív töltés kötve marad az arzén atomhoz. Így az arzénnal szennyezett  $n$  típusú germániumban 4–5 nagyságrenddel több a szabad elektron, mint a lyuk.

Elvileg a szennyezés teljes mértékben megszüntethetné a lyukakat, hisz a szabad elektronok beléphetnek a meglevő lyukakba. A hőmozgás miatt azonban mindig marad bizonyos számú lyuk. Számukat nem összeadással, hanem a szorzat-törvény alapján határozhatjuk meg:

$$n_p \cdot n_n = n_i^2,$$

ahol  $n_i$  az intrinsic szám, a tiszta félvezetőben adott hőmérsékleten keletkezett töltéshordozó párok száma,  $n_n$  a szabad elektronok száma,  $n_p$  pedig a lyukak száma. Tiszta félvezető esetén

$$n_n = n_p = n_i.$$

A jelenleg tárgyalt esetben szobahőmérsékleten közelítőleg  $2,5 \cdot 10^{13}/\text{cm}^3$  az  $n_i$  értéke. Így  $n_n = 10^{15}/\text{cm}^3$  esetén  $n_p$ -re  $6 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$  értéket kapunk.

Ennek alapján egy szennyezett rétegben megkülönböztethetünk *többségi* és *kisebbségi* töltéshordozókat. Az  $n$  típusú germánium rétegben az elektronok a többségi töltéshordozók.

### Egyszerű félvezető elemek. A termisztor

Tapasztalati törvény, hogy a félvezetőikben a hőmérséklet növelésével a szabad töltéshordozók száma rohamosan növekszik, ami az elektromos áram exponenciális növekedését eredményezi.

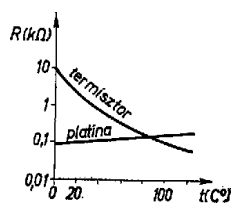
Magasabb hőmérsékleten az egyes atomok, illetve ionok is elmozdulnak a rácspontokból, és ezáltal irreverzibilis folyamatok indulnak meg. A félvezetők gyakorlati felhasználásának fő korlátja tehát a környezet hőmérséklete.  $-200$  °C hőmérsékleten nagyon kevés töltéshordozó áll rendelkezésre,  $+150$  °C körül pedig alapvetően megváltoznak a vezetési tulajdonságok. (Természetesen a hőmérsékleti határok alapanyagonként változnak.) Ezen túlmenően az adott határokon belüli hőmérsékletváltozás is komoly hátrányt jelent, hisz egy elektromos berendezés valamely áramköri elrendezésénél a vezetőképesség megváltozása károsan befolyásolja a berendezés működését. Ugyanakkor nagyon sok esetben szükség van a hőmérséklet megváltozásának észlelésére, illetve a változás mértékének pontos meghatározására (fizikai mérések, szárító kemencék, az emberi test hőmérsékletének megváltozása). A félvezetőknél tapasztalt hőmérsékleti hatás – ha biztosítani tudjuk, hogy mindig azonos módon következzen be – új hőmérséklet-mérési eljárást ad a kezünkbe. Az irányítástechnikai alkalmazás előtt is tág lehetőség nyílik. Egy adott rendszer hőmérsékletének konstans értéken tartásakor pl. nem kell egy munkásnak állandóan a hőmérőt figyelnie, hisz egy alkalmasan kialakított félvezető, a termisztor fáradhatatlanul és az embernél sokkal pontosabban elvégzi az észlelés feladatát.

Az automatizálás egyik ága a *szabályozástechnika*. Azok a feladatok tartoznak ide, ahol bizonyos fizikai mennyiségeket meghatározott, állandó értéken kell tartani. Ehhez elsősorban – az adott folyamat teljes gépesítése mellett – szükség van egy *érzékelő elemre*, mely méri a kérdéses fizikai mennyiség nagyságát, illetve alkalmas módon jelzi az előírt értéktől való eltérést. Hőmérséklet-szabályozási feladatok megoldásánál a termisztor azért is előnyös, mert egyben betölti a szabályozási rendszer következő láncszemének szerepét is, azaz *jelátalakítóként* is működik. A hőmérséklet

változását ugyanis elektromos áram-, illetve feszültség-változássá alakítja, hisz a töltéshordozók számának megváltozása – ha a termisztort áramkörbe iktatjuk – áramerősség-változást idéz elő. A keletkező áramerősség-változást, ha szükséges, még felerősíthetjük, s így már alkalmas lesz egy tetszőleges kapcsolásokat elvégző jelfogó működtetésére.

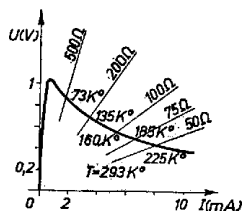
A termisztorok fő alapanyagául szolgáló fémoxidok sokféle vezetési mechanizmusa közül a szabályozott vegyértékű anyagok vezetését vizsgáljuk meg részletesebben. A kémiai kötés, a vegyérték pontos értelmezését az atomfizika elmélete, a kvantummechanika írja le. Mi a vezetés értelmezésében a szokásos kémiai fogalmakat alkalmazzuk. A fémoxidok az illető anyagra jellemző, a térben adott elrendezésű pozitív fémionokból és negatív oxigénionokból állnak. A tiszta fémoxidok saját vezetése nem elegendő az áramköri alkalmazásokhoz. A vezetést csak szennyező ionok bevitelével fokozhatjuk nagy mértékben. Például ha NiO-hoz kis mennyiségű Li<sub>2</sub>O-t adunk, akkor ennek hatására annyi Ni<sup>3+</sup>-ion keletkezik, amennyi Li<sup>+</sup>-iont beépítettünk. Az ionrács kifelé továbbra is semleges, azonban a Ni<sup>3+</sup>-ionok megjelenése nagy mértékben megnöveli a nikkelloxid vezetését. Minden egyes Ni<sup>3+</sup>-ion egy-egy lyukat képvisel, és a kristállyal közölt hőmennyiség hatására a két vegyértékű nikkell-ionokról az elektronok könnyen átjuthatnak ezekbe a lyukakba. Ez az elektron-átjutás akkor következhet be, ha a fémionok könnyen tudják változtatni a vegyértéküket. Ilyen tulajdonságúak az ún. átmeneti fémek, melyek a Mengyelejev-féle periódusos rendszerben a 21-től a 30. rendszámig helyezkednek el. A kristállyal közölt aktiválási energia a fémoxidoknál arra szolgál, hogy biztosítsa az elektron részére a különböző vegyértékű ionok energiaszintjei közt fennálló különbség leküzdését. A Li<sub>2</sub>O szennyezés alkalmazása azért célravezető, mert a Li<sup>+</sup>-ion vegyértéke állandó és a Ni<sup>2+</sup>-ion vegyértékénél alacsonyabb. Így a beépült Li<sup>+</sup>-ion nem képes a szomszédos O<sup>2-</sup>-ionok vegyértékének lekötésére, tehát lehetőség nyílik a Ni<sup>3+</sup>-ionok kialakulására. Könnyen belátható, hogy a Li<sub>2</sub>O molekulák beépítése – a rácsszerkezet megbontása nélkül – csak oxidáló atmoszférában lehetséges.

A fizikai alapok áttekintése után foglalkozzunk a termisztor tulajdonságaival. Mint említettük, a termisztor működésének lényege, hogy hőmérsékletének változásával együtt változik elektromos ellenállása is. A fémek hasonló jellegű viselkedésével ellentétben azonban ez a változás éppen ellentétes értelmű és általában egy nagyságrenddel nagyobb értékű (1. ábra).



1. ábra

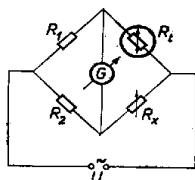
A termisztor ellenállásának értelmezésekor megkülönböztetünk *sztatikus és dinamikus ellenállást*. Ha felvesszük egy termisztor feszültség – áram karakterisztikáját, akkor a 2. ábrán látható görbét kapjuk.



2. ábra

Itt az egyes pontokhoz tartozó feszültség-és áramértékek hányadosa megadja a sztatikus ellenállást. A görbe minden pontjához más-más termisztor-hőmérséklet tartozik. Az átfolyó áram ugyanis felmelegíti a termisztort, mert az a felszabadult hőmennyiséget nem tudja környezetének átadni. A 2. ábrán feltüntetett hőmérséklet-értékek az állandónak vett környezeti hőmérséklettől való eltérést mutatják. A görbe jellegzetes menetét az ellenállás megváltozásával tudjuk magyarázni. A termisztorban keletkezett hőmennyiség ugyanis olyan nagy értékű ellenálláscsökkenést idéz elő, hogy még a növekvő áramerősség ellenére is csökken a termisztoron eső feszültség.

Ha a környezet hőmérséklete változik, akkor a termisztor az őt körülvevő közegből felvett hőmennyiség hatására változtatja meg ellenállását. Így a hőmérsékletmérést ellenállásmérésre vezethetjük vissza. A pontosság fokozására általában hídkapcsolást alkalmazunk (3. ábra).

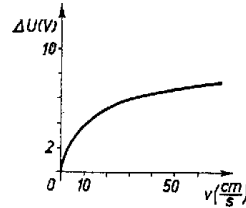


3. ábra

Ha a mérőhíd egyensúlya megbomlik, azt az  $R_x$  ellenállással állítjuk vissza. Az  $R_x$  változtatható ellenállást azonnal hőmérsékletre kalibrálhatjuk. Az ilyen jellegű kapcsolásokban olyan kis teljesítményt alkalmaznak, hogy a mérőáram melegítő hatásától általában eltekinthetünk.

A hőmérséklet mérésére kialakított termisztorok  $\text{mm}^3$  nagyságrendűek, így nagyon kicsi a hőtehetetlenségük, tehát a hőmérséklet-változásokat azonnal követni tudják. A fémhőmérőkkel szemben további előny még a nagyobb érzékenység és a több  $\text{k}\Omega$ -os ellenállás, ami hosszú csatlakozó vezetékek alkalmazását teszi lehetővé. Így a hőmérséklet-változást az adott helytől nagy távolságról is figyelhetik.

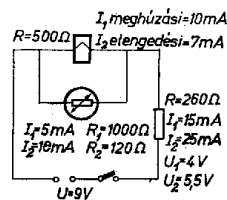
Amikor a termisztor és környezete között hőegyensúlyi állapot van, akkor a termisztoron átfolyó áram hatására keletkező teljesítmény állandó. Ezt az egyensúlyi állapotot nemcsak a környezet hőmérsékletének a megváltozása bonthatja meg. Ha megváltozik pl. a termisztor körülvevő gáz nyomása vagy áramlási sebessége, akkor változni fog a leadott teljesítmény is, tehát megváltoznak a termisztor sztatikus jellemzői. Így a gáz nyomásának, illetve áramlási sebességének mérését visszavezethetjük elektromos mennyiségek mérésére. A 4. ábra a mérő termisztoron fellépő feszültségváltozást mutatja a közeg áramlási sebességének függvényében, állandó telepfeszültség esetén.



4. ábra

Kis hőkapacitású és nagy felületű termisztorok alkalmazása esetén a termisztor szinte tehetetlenségmentesen követi a közeg változásait. A térfogat megnövelése és a felület minimálisra csökkentése esetén viszont a termisztor hőtehetetlensége jelentős mértékben megnő. Ekkor a környezet változásait csak bizonyos idő eltelte után képes érzékelni. A *vezérléstechnikában* – az automatizálás másik ágában – sok esetben szükség van olyan kapcsolásokra, amelyeknél egy folyamatot egy megelőző folyamathoz képest bizonyos időtartammal késleltetni kell. Az ilyen kapcsolásokat időreléknek nevezzük. A legismertebb időrelé a lépcsőházi világítást vezérlő kapcsolás.

Azt a hatást, hogy a jelfogó a bekapcsolás után egy bizonyos idő eltelte után elengedjen, egy – a jelfogóval párhuzamosan kapcsolt – termisztorral is elérhetjük (5. ábra).



5. ábra

Bizonyos idő elteltével az átfolyó áram hatására annyira lecsökken a termisztor ellenállása, hogy söntöli a jelfogót, azaz gyakorlatilag a kör árama a termisztoron folyik át, tehát a jelfogó elenged.

A fokozatos felmelegedést, illetve az ennek a hatására bekövetkező nagy ellenállás csökkenést különböző túláramvédelmi berendezéseknél is hasznosíthatják (elektroncsövek fűtőszálát, villamos motorok tekercseit védik a bekapcsoláskor fellépő túláram ellen):

A 2. ábra karakterisztikájában egy adott pont körüli kicsiny feszültség változás és a hozzá tartozó áramváltozás hányadosa (pontosabban a függvény differenciáhányadosa) megadja a termisztor egy adott  $I_0$   $U_0$  értéke melletti dinamikus ellenállásának értékét:

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

A görbe legnagyobb részén a dinamikus ellenállásra negatív értéket kapunk. Ez lehetővé teszi a termisztorok rezgéskeltőkben történő alkalmazását. A negatív ellenállás és a rezgéskeltés lehetősége közti kapcsolat megértésének alátámasztására mechanikai analógiára hivatkozunk. Ha egy rugó rezgése esetén fellépő rúgóerőt a kitérés függvényében ábrázoljuk, ugyancsak negatív iránytangensű „görbét” kapunk, hisz pozitív értelmű elmozduláshoz csökkenő abszolút értékű pozitív előjelű erő, illetve növekvő abszolút értékű, negatív értelmű erő tartozik (6. ábra A és B pont).

