

Vezetőképesség, áramvezetési mechanizmusok különböző anyagokban

A molekuláris modellből a vezetőképességre kapott összefüggés

$$\gamma = qn\mu.$$

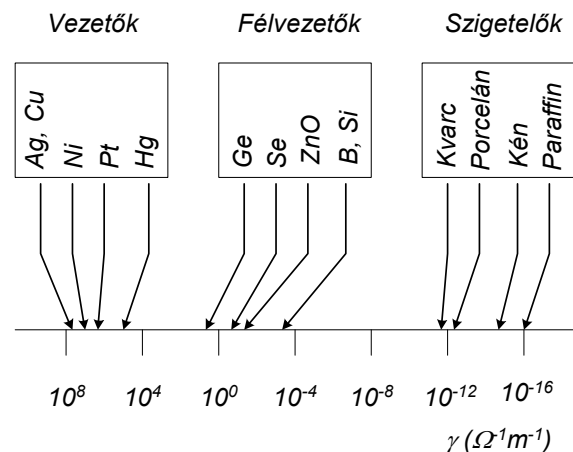
Eszerint egy anyagban a vezetőképességet a töltéshordozó részecskék töltése (q), térfogati darabsűrűsége (n) és mozgékonyasága (μ) szabja meg.

A különböző anyagokban különböző típusú töltéshordozók vannak, amelyek különböző mechanizmussal mozognak, és a töltéshordozók mennyisége is különböző, így a fenti töltéshordozó-jellemzők igen eltérőek lehetnek. Ez az oka annak, hogy az anyagok vezetőképességei egy kb. 25 nagyságrendet átfogó tartományba esnek (γ értéke nagyjából a 10^{-17} – $10^8 \text{ ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$ értékek között van).

Mivel a vezetési tulajdonságok szoros kapcsolatban vannak az anyag halmazállapotával, a vezetőképesség vizsgálatánál célszerű a halmazállapot szerinti felosztást alkalmazni.

Elektromos vezetés szilárd anyagokban

A vezetési tulajdonságok a szilárd anyagok esetén is nagyon eltérőek lehetnek. Erről ad áttekintést a mellékelt ábra, amelyen az anyagokat a szokásos csoportosítás szerint (vezetők, félvezetők, szigetelők) tüntettük fel. A vezetőképességek szobahőmérsékletre vonatkoznak.



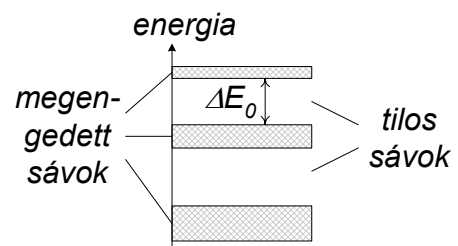
Vezetés kristályos szilárd anyagokban

A szilárd anyagok vezetési mechanizmusát alapvetően befolyásolja az, hogy kristályos szerkezetűek-e vagy nem. Először a kristályos anyagok esetét vizsgáljuk meg, amelyeknek vezetőképessége szintén igen különböző lehet (pl. *Ag* és *kvarc*).

A vezetőképességben fennálló ilyen eltéréseket a klasszikus fizika segítségével nem sikerült értelmezni, ehhez a mikrorészecskék (ebben az esetben az atomokban lévő elektronok) sajátos viselkedését leíró kvantumelméletet kell segítségül hívni.

A kvantumelméletnek azt a részterületét, amely az elektronoknak kristályos szilárd anyagokban való viselkedésével foglalkozik a szilárd anyagok *sávelméletének* nevezik. A sávelmélet elnevezés onnan származik, hogy az elmélet szerint az ilyen anyagokban az elektronok nem rendelkezhetnek akármilyen energiával, hanem energiájuk csak az anyagtól függő, megengedett energiatartományokba, más néven *energiasávokba* eshet. Ezeket a tartományokat *megengedett energiasávoknak* nevezik. Az elektronok a sávok közötti energiatartományba, az ún. *tilos energiasávba* eső energiát nem vehetnek fel (ábra). A *tilos sáv szélessége* a vezetés szempontjából fontos szerepet játszik, jelölésére a ΔE_0 szimbólumot szokták használni (egy tilos sáv szélességét az ábrán bejelöltük).

A sávelmélet szerint az egyes sávokban meghatározott számú energiahely van, vagyis egy energiasávba eső energiával csak



meghatározott számú elektron rendelkezhet. Az elektronok először a legalacsonyabb energiájú sávban lévő energiahelyekre kerülnek. Ha ebben a sávban már minden hely foglalt (betöltött sáv), és az atomokban további elektronok is vannak, azok már csak a következő, magasabb energiájú megengedett sávban foglalhatnak helyet.

A legmagasabb energiájú, betöltött energiahelyeket tartalmazó sáv lehet teljesen betöltött vagy részben betöltött. Az, hogy a megengedett sávok közül mennyi lesz betöltött, és a legmagasabb energiájú sáv is betöltött lesz vagy csak részben betöltött, attól függ, hogy az anyagot alkotó atomokban mennyi elektron van (azaz mennyi az alkotó atom rendszáma), vagyis a sávszerkezet a különböző anyagokban eltérő.

A fenti sztatikus képből még nem derül ki, hogy a sávok létezésének mi a szerepe a vezetésben, ezért most ezt vizsgáljuk meg.

Ha az anyagot elektromos erőterbe tesszük, akkor az elektronokra a térerősséggel ellentétes irányú erő hat, amely igyekszik az elektronokat mozgásba hozni. Ez azzal jár, hogy az elektronok energiája megnő, hiszen mozgási energiára tesznek szert. Ha az anyagban van egy olyan megengedett energiasáv, ahol betöltetlen energiahelyek vannak, akkor az elektron energiája a sávon belül nőni tud, ezért az erőter hatására valóban mozgásba jön: az anyagban elektromos áram jön létre, amelyet az elektronok mozgása okoz.

Ha azonban a sávszerkezet olyan, hogy csak betöltött energiasávok vannak, akkor az elektron a sávon belül nem képes az energiáját növelni (nincs magasabb betöltetlen energiahely), vagyis az elektromos erőter nem tudja mozgásba hozni. Ilyenkor az elektronok az anyagban nem tudnak elektromos áramot létrehozni. Ebben az esetben az elektronok gyorsítására csak az a lehetőség marad, hogy a tilos sáv szélességének megfelelő energiát kapnak az elektromos erőterből, amivel a következő (üres) megengedett sávba kerülve mozgásképesé válnak. Normális körülmények között azonban az elektromos erőter ilyen nagy energiát nem képes az elektronnak átadni.

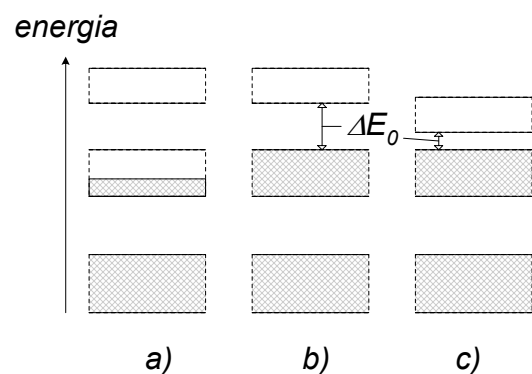
Összefoglalva: *az elektronokkal történő vezetés szempontjából alapvető jelentőségű, hogy legyen egy olyan megengedett energiasáv, amelyik csak részben van betöltve.*

Ezek után nézzük meg, hogy a különböző anyagokban milyen energiasávok jöhetnek létre.

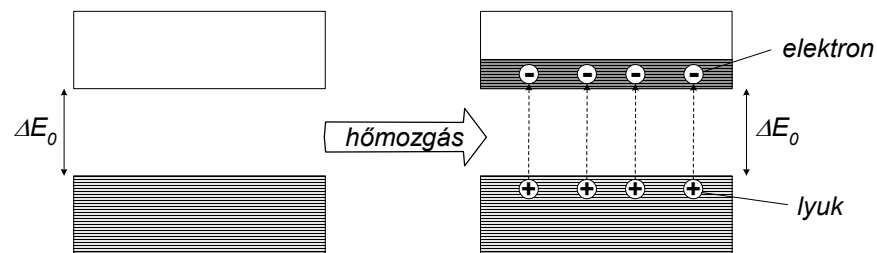
Az *a)* ábra azt az esetet mutatja, amikor a legfelső, elektronokat tartalmazó sáv csak részben van betöltve. Ekkor – amint azt már megtárgyaltuk – elektromos erőterben az elektronok mozogni tudnak, elektromos vezetés jön létre. Az ilyen sávszerkezettel rendelkező anyagok a *vezetők*. Ilyen sávszerkezete van a legtöbb fémnek, ezért a fémek általában jó vezetők.

A *b)* ábrán azt az esetet látjuk, amikor a legfelső, elektronokat tartalmazó sáv teljesen betöltött, a tilos sáv szélessége nagy, ezért az elektronok normális körülmények között nem tudnak áramot létrehozni. Az ilyen sávszerkezettel rendelkező anyagok a *szigetelők*. A kristályos szilárd anyagok közül ilyen pl. a gyémánt, a kvarc, a kősó (*NaCl*).

A *c)* ábrán is egy szigetelő sáv szerkezete látható, de ebben az esetben a tilos sáv ΔE_0 szélessége jóval kisebb, mint a *b)* ábrán. Ennek a ténynek nagy jelentősége lehet: ha a tilos sáv szélessége olyan kicsi, hogy a betöltött sávból az üres sávba az atomok termikus mozgása („hőmozgás”) jelentős számú elektront tud feljuttatni (vagyis a



termikus mozgás átlagos energiája közel akkora, mint az elektronok átmenetéhez szükséges ΔE_0 energia), akkor az eredetileg üres energiasáv részben betöltötté válik (ábra), ezért az anyagban elektromos áram jöhet létre. Az ilyen, szigetelő



sávszerkezetű, de a hőmozgás révén vezetésre képes anyagok a *félvezetők*. A legismertebb félvezető anyagok a szilícium (*Si*) és a germánium (*Ge*).

A félvezetőkben a töltéshordozók elektronok. A vezetésben azonban nem csak az eredetileg üres sávba jutott elektronok vesznek részt, hanem az eredetileg betöltött sávban lévők is. Ennek az az oka, hogy az innen eltávozó elektronok energiaállapotai felszabadulnak, így itt is lehetőség van az energia változására.

A megüresedett elektronállapotok segítségével mozgó elektronok árama úgy is felfogható, mint az elektronok hiánya által létrehozott pozitív töltések – az ún. *lyukak* – mozgása által létrehozott áram. A lyukak az elektronokkal ellentétes irányban mozognak, de töltésük is ellentétes az elektronokéval, így az áram iránya ugyanaz, mint az elektronok mozgása által okozott áramé. A töltésmozgás ilyen felfogása megkönnyíti a félvezetők vezetésének értelmezését. Eszerint a félvezetőkben az áramot elektronok és lyukak hozzák létre.

A szigetelőkben a tilos sáv szélessége olyan nagy, hogy – nagyon magas hőmérsékletektől eltekintve – a hőmozgás csak nagyon kevés elektront képes mozgásképes állapotba hozni. A nagyon kis vezetőképességű anyagokban – ezeket nevezzük szigetelőknek – a vezetést ez a kis számú mozgásképes elektron (pl. gyémánt), és az anyagban esetleg jelen lévő ionok (pl. ionkristályok) mozgása hozza létre.

Ahhoz, hogy a vezetőképességnek a különböző körülményektől való függését megértsük, a vezetőképességet megadó

$$\gamma = qn\mu$$

összefüggésben szereplő mennyiségeket (a töltéshordozó töltését (q), térfogati darabsűrűségét (n) és mozgékonyágát (μ)), illetve ezeknek a körülményektől való függését (pl. hőmérséklet) kell megvizsgáljunk. Most ennek alapján röviden áttekintjük, hogy a különböző típusú kristályos szilárd anyagok vezetőképessége hogyan alakul különböző körülmények között.

Vezetők

A szilárd halmazállapotú vezetők gyakorlatilag a fémekkel azonosak. Ezekben az anyagokban az atomi elektronok egy – az atom elektronszerkezete által meghatározott – része az anyagban gyakorlatilag szabadon elmozdulhat. A vezetőkben a töltéshordozók negatív töltésű elektronok, töltésük nagysága a természeti állandónak számító elemi töltés (ez definíció szerint éppen az elektron töltése).

A vezetőképességet a $\gamma = qn\mu$ összefüggés adja meg. Mivel egy adott fémbe a töltéshordozók töltése (q) és a szabad elektronok darabsűrűsége (n) is adott, a

vezetőképesség a körülményektől gyakorlatilag csak a mozgékonyaságon (μ) keresztül függ.

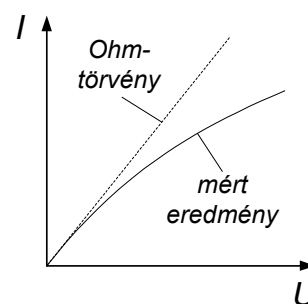
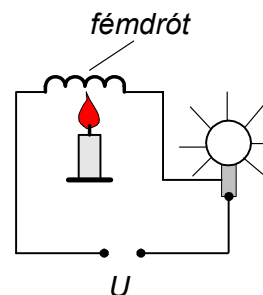
A mozgékonyaság meghatározásához az elektronok mozgásának ismerete szükséges, ami kristályos szilárd anyagokban a klasszikus fizikai modellek alapján nem érthető meg, ehhez a kvantumelméletet kell segítségül hívni. Erről annyit kell tudnunk, hogy az elektronok egy tökéletes kristályrácsban (ahol minden atom a tökéletes kristályrácsnak megfelelő helyén van) ellenállás nélkül tudnának mozogni: egy tökéletesen rendezett – mozgásképes elektronokat is tartalmazó – kristály ellenállása nulla lenne. Ha azonban a kristályrácsban rendellenességek vannak (pl. valahol hiányzik egy atom vagy egy atomot idegen atom helyettesít), akkor az elektron mozgása nehezebbé válik, mozgékonyasága lecsökken. Ugyanilyen hatást vált ki az is, hogy a mindig jelen lévő hőmozgás miatt az atomok rezegnek az egyensúlyi helyzetük körül, vagyis többnyire nincsenek a tökéletes rácsnak megfelelő helyükön. Röviden szólva: *a kristályrács minden rendezetlensége csökkenti az elektronok mozgékonyaságát és így növeli a vizsgált anyag elektromos ellenállását.*

A mozgékonyaságról mondottak alapján érthető meg az a tapasztalat, hogy egy idegen anyaggal szennyezett fém vezetőképessége kisebb (ellenállása nagyobb), mint a tiszta fémé: szennyezés=rendezetlenség $\Rightarrow \mu$ csökken $\Rightarrow \gamma$ csökken \Rightarrow ellenállás nő.

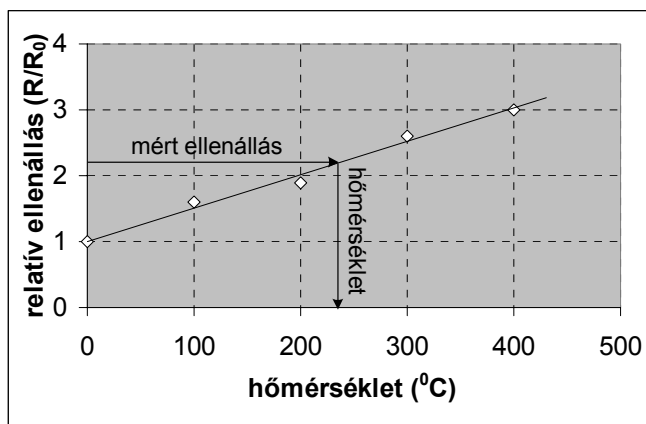
Egy másik kísérleti tapasztalat az, hogy a fémek vezetőképessége a hőmérséklet növekedésekor csökken (az ellenállás nő). Ennek értelmezése ugyancsak a fenti elmélet segítségével adható meg. A hőmérséklet emelkedésével ugyanis a hőmozgás egyre intenzívebbé válik, a kristályrácsban az egyes atomok pillanatnyi helyzete egyre távolabb van az ideális helyzettől, a rendezetlenség a rácsban nő: hőmérsékletemelkedés=növekvő rendezetlenség $\Rightarrow \mu$ csökken $\Rightarrow \gamma$ csökken \Rightarrow ellenállás nő.

KÍSÉRLETEK:

- ◆ Egy feszültségforrással sorba kapcsolunk egy izzólámpát és egy vezetőből készült drótspirált. A feszültséget úgy állítjuk be, hogy az izzólámpa világít, vagyis a rajta átfolyó áram elég nagy a felizzításához. Ezután a drótspirált gázlánggal melegíteni kezdjük. Az izzólámpa fénye fokozatosan csökken, majd teljesen kialszik. Ez azt mutatja, hogy az áramkörben az áram lecsökkent, ami csak úgy értelmezhető, hogy a hőmérséklet emelkedésekor a vezető ellenállása növekszik.
- ◆ Mérjük meg egy izzólámpa esetén az áramerősség (I) és a feszültség (U) összefüggését. Azt tapasztaljuk, hogy az Ohm-törvény nem teljesül, mert lineáris összefüggés helyett egy, a feszültség növekedésével csökkenő meredekségű görbét kapunk (a görbe jellegét az alábbi ábra mutatja). Az ok az, hogy a feszültség növekedésekor az izzószál melegszik, nő az ellenállása, ezért az áram kisebb, mint a kezdeti (hideg) ellenállás alapján várható érték (szaggatott vonal).



A fémek ellenállásának hőmérséklettől való függése felhasználható hőmérséklet-mérésre. Az erre szolgáló speciális, kisméretű fém-ellenállást ellenálláshőmérőnek nevezik. Ha az ellenálláshőmérő fém-ellenállásának hőmérsékletfüggését ismert hőmérsékleteken végzett ellenállásméréssel egyszer kimérjük (hitelesítés), akkor egy hely ismeretlen hőmérséklete az ellenálláshőmérő odahelyezése után az ellenállásának mérésével meghatározható (ábra). Az eljárást egyszerűsíti, hogy a fémek ellenállásának hőmérsékletfüggése elég széles hőmérséklet-tartományban jó közelítéssel lineáris. Ilyen hőmérsékletfüggést mutat a mellékelt ábra (R az aktuális hőmérsékleten R_0 a $0\text{ }^\circ\text{C}$ -on mért ellenállás).



Félvezetők

A félvezetők esetén a helyzet kicsit bonyolultabb. Itt ugyanis a mozgékonyosság (γ) mellett a töltéshordozók koncentrációja (n) sem eleve meghatározott.

A tiszta félvezetőkben a mozgásképes töltéshordozók úgy jönnek létre, hogy a teljesen betöltött sávból a hőmozgás segítségével elektronok kerülnek a magasabb energiájú, eredetileg üres energiasávba. Ez a folyamat annál több mozgásképes töltéshordozót eredményez, minél magasabb a hőmérséklet. Ez azt jelenti, hogy a mozgásképes töltéshordozók koncentrációja (n) a hőmérséklet emelkedésével nő. Ugyanakkor a töltéshordozók mozgékonyására ugyanaz érvényes, mint a vezetők esetén: a hőmérséklet emelkedésével a mozgékonyosság (μ) csökken. Itt tehát két ellentétes hatás alakítja ki a vezetőképességet:

hőmérsékletemelkedés
(növekvő rendezetlenség)



μ csökken



$\gamma = qn\mu$ csökken

hőmérsékletemelkedés
(intenzívebb hőmozgás)



n nő



$\gamma = qn\mu$ nő

A végeredmény attól függ, hogy melyik hatás az erősebb.

A tapasztalatok (és az elméleti számítások is) azt mutatják, hogy a töltéshordozó-koncentráció sokkal gyorsabban nő a hőmérséklettel (n erősen nő), mint ahogy a mozgékonyosság csökken (μ gyengén csökken), vagyis tiszta félvezetőkben: hőmérsékletemelkedés = növekvő töltéshordozó-koncentráció + növekvő rendezetlenség $\Rightarrow \gamma$ nő \Rightarrow ellenállás csökken.

A félvezető szennyezése az alaprács atomjának vegyértékétől eltérő vegyértékű szennyezéssel a töltéshordozók koncentrációjának igen erős növekedését okozhatja, miközben a mozgékonyágban okozott csökkenés itt sem túl jelentős. Vagyis adott hőmérsékleten az eltérő vegyértékű szennyezés növeli a vezetőképességet.

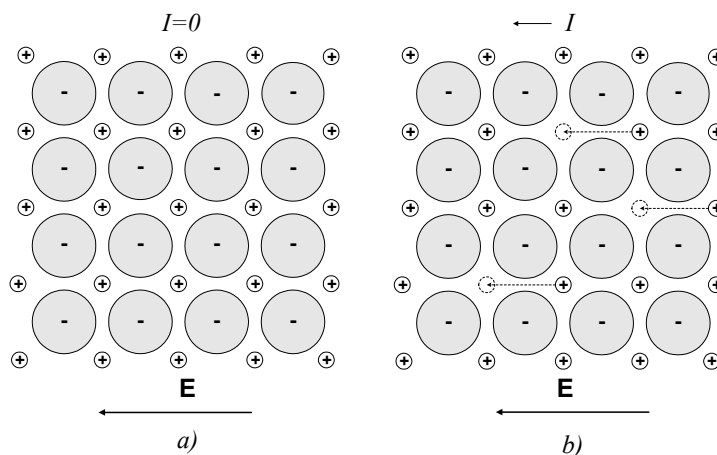
A félvezetők ellenállása erősebben függ a hőmérséklettől, mint a fémeké, ezért félvezetőből sokkal érzékenyebb ellenálláshőmérő készíthető.

Az ellenállás hőmérsékletfüggését áramkörökben a hőmérsékletváltozás hatásának csökkentésére, vagy ennek a hatásnak a hasznosítására is felhasználják, hőmérsékletfüggő félvezető ellenállások – az ún. termisztorok – alkalmazásával.

Szigetelők

A kristályos szerkezetű szigetelőkben a tilos sáv szélessége olyan nagy, hogy – nagyon magas hőmérsékletektől eltekintve – a hőmozgás csak nagyon kevés elektront képes mozgásképes állapotba hozni. Ennek ellenére ezeknek az anyagoknak egy részében – ahol más vezetési mechanizmus nincsen – a vezetést a kis számú mozgásképes elektron hozza létre (pl. gyémánt).

Az anyagok egy másik részében, amelyekben a kristályt ionok alkotják, egy másik vezetési mechanizmus is szerepet kaphat: a kristályrácsban ionok mozognak. Ha egy ionkristály rácsa tökéletes lenne, akkor az ionok nem tudnának benne mozogni (a) ábra). Az ionmozgást az teszi lehetővé, hogy a kristályokban mindig vannak betöltetlen rácshelyek, és az ionok ezek között az üres helyek között ugrálva tudnak az

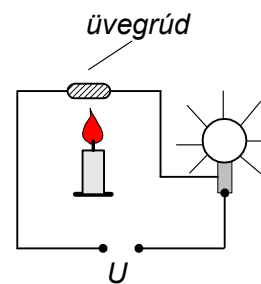


elektromos erőtér hatására mozogni (b) ábra).

Minél több ilyen üres hely van, annál több ion mozgására nyílik lehetőség, vagyis annál nagyobb a mozgásképes töltéshordozók koncentrációja. Mivel tiszta anyagban az üres helyeket a hőmozgás hozza létre, a töltéshordozók koncentrációja a hőmérséklet emelkedésével nő. Az ionok azonban a rácshelyek között nem teljesen szabadon mozognak, mert az ionoknak az egyik rácshelyről a másikra való átmenetnél egy „energiahegyet” kell átugraniuk. Az ehhez szükséges energiát a hőmozgás biztosítja, így a hőmérséklet emelkedésével az ugrások gyakorisága nő. Ez azt jelenti, hogy a hőmérséklet emelése növeli az ionok mozgékonyaságát is. Az ionvezetés esetén tehát a töltéshordozók ionok, a vezetőképesség hőmérsékletfüggésére pedig érvényes, hogy: növekvő hőmérséklet=intenzívebb hőmozgás $\Rightarrow n$ nő, μ nő $\Rightarrow \gamma$ nő \Rightarrow ellenállás csökken.

KÍSÉRLET:

Egy feszültségforrással sorba kapcsolunk egy izzólámpát és egy üvegrudat. A feszültséget úgy állítjuk be, hogy az izzólámpa nem világít, az üvegrúd nem melegszik, mert az üveg nagy ellenállása miatt nem folyik át rajta elég nagy áram. Ezután az üvegrudat gázlánggal melegíteni kezdjük. Az izzólámpa világítani kezd, és fénye fokozatosan erősödik, vagyis a körben folyó áram megnő. Ez csak úgy lehetséges, hogy a szigetelő üveg ellenállása a hőmérséklet emelkedésekor csökken.



Az alaprács ionjaitól eltérő vegyértékű szennyezés rendszerint ezekben az anyagokban is növeli a töltéshordozók koncentrációját, így a vezetőképesség növekedését eredményezi.

Tipikus ionvezetők az ionkristályok (pl. $NaCl$).

A szigetelők közé számos olyan anyag is tartozik, amelyek nem kristályos szerkezetűek. Ezekben az anyagokban a kristályos anyagokéhoz hasonló sáv szerkezet nem jön létre, az elektronok itt a vezetésben többnyire nem játszanak jelentős szerepet. Az ilyen anyagokban létrehozható – rendszerint kis – elektromos áram a csekély elektronvezetés vagy ionvezetés következménye. Ilyen anyagok pl. az üvegek, számos kerámia és a műanyagok többsége.

A szigetelők klasszikus alkalmazása az elektromos áram kiküszöbölése, az elektromos szigetelés. Egyes ionkristályokat újabban a folyékony elektrolitokhoz hasonló feladatok megoldására is felhasználnak, így pl. áramforrásokat készítenek belőlük (az ionkristályok tulajdonképpen szilárd elektrolitok, amelyekben a vezetést ionok mozgása teszi lehetővé).

Elektromos vezetés folyadékokban

Folyadékokban elektromos vezetés gyakorlatilag csak akkor jön létre, ha a folyadékban ionok vannak jelen (jól ismert kivétel a folyékony fémek esete, amelyekben elektronvezetés van). Az ilyen ionos folyadékok az *elektrolitok*. Ezeknek leggyakrabban előforduló változata az elektrolitoldat, amelyet úgy állíthatunk elő, hogy egy nem ionos folyadékban ionos anyagot oldunk fel. Az oldódás során az ionos anyag ionjaira esik szét (disszociál), és az így létrejött ionok a mozgásképes töltéshordozók. Az oldott anyag töltéshordozó-keltő szerepét jól mutatja az alábbi kísérlet.

KÍSÉRLET:

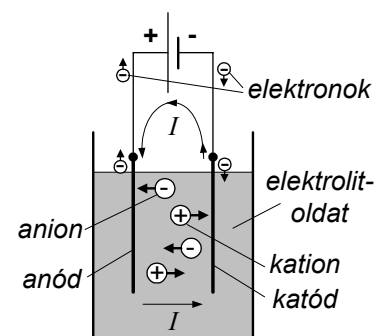
- ◆ Tiszta (desztillált) vízbe két – nem érintkező – fémlemez teszünk. Ha egy izzólámpán és a fémlemekkel a vízen át egy teleppel áramot hozunk létre, akkor az izzó nem világít. A vízbe sót szórva a lámpa kigyullad: a sós víz ellenállása sokkal kisebb, mint a tiszta vízé.
- ◆ A kísérletben desztillált víz helyett csapvizet alkalmazva, az izzó akkor is kigyullad, ha a vízbe semmit nem teszünk. Ebből látható, hogy a csapvízben oldott ionos anyagok találhatók.

Az elektrolitoldatban az elektromos áram az elektrolitba merülő vezető rudak – az ún. *elektródok* – között jön létre, amelyek közül az egyik – az ún. *anód* – egy telep pozitív sarkához, a másik – az ún. *katód* – pedig a telep negatív sarkához (ábra) csatlakozik. Az oldatban a negatív ionok az anódhoz, a pozitív ionok a katódhoz vándorolnak, emiatt a negatív ionokat gyakran *anionoknak*-, a pozitív ionokat *kationoknak* nevezik.

Az elektrolitoldatban tehát az elektromos áramot a pozitív és negatív ionok-, az áramkör vezető részeiben viszont elektronok mozgása okozza. A zárt áramkör úgy jön létre, hogy a negatív ionok az anódra érkezve elektronokat adnak le, amelyek a vezetőkben a telep pozitív sarka felé mozognak.

A telep által „átemelt” elektronok a telep negatív sarkától az oldat felé mozognak, a katódon a pozitív ionok felveszik ezeket az elektronokat, és ezzel az áramkör záródik.

A folyamat fontos mozzanata az, hogy az elektródokhoz érkező ionok elektronleadással illetve elektronfelvétellel elvesztik a töltésüket, és semleges részecskéként *az oldatból kiválnak*. A kivált anyag további sorsa a konkrét elektrolit összetételétől függően kémiai reakciókban vehet részt, ami különböző végtermékeket eredményezhet. Ezekkel a



folyamatokkal itt részletesebben nem foglalkozunk, csupán egy fontos folyamatot említünk meg. Az oldott ionos anyag kationjai rendszerint fémionok, amelyek semleges fématomok formájában válnak ki a katódon, és azon bevonatot képeznek. Ezen a jelenségen alapul a fémbevonatok készítésére használt egyik eljárás, az ún. *galvánózás*.

Az elektrolitok vezetésével kapcsolatos folyamatokat (vezetés, anyagkiválás, a kivált anyag kémiai reakciói) összefoglaló néven *elektrolízisnek* nevezik.

Az oldott anyagot nem túl nagy koncentrációban tartalmazó elektrolitoldatokban (az ún. gyenge elektrolitokban) a kellő gondossággal¹ végrehajtott kísérletek szerint érvényes az Ohm-törvény, így egy adott ion által létrehozott vezetőképességet a $\gamma = qn\mu$ összefüggésből kaphatjuk meg, ha ismerjük az ionok töltését, térfogati darab-koncentrációját és mozgékonyágát. Az elektrolitoldatokban azonban legalább kétféle ion van jelen, de többféle oldott anyag esetén akár többféle pozitív- és negatív ion is létrejöhet, amelyeknek különböző lehet a töltése (q_i), koncentrációja (n_i) és mozgékonyága (μ_i). Ilyenkor egyszerű esetben a vezetőképességet az egyes ionok vezetőképességének ($\gamma_i = q_i n_i \mu_i$) összege adja meg:

$$\gamma = \sum \gamma_i = \sum_i q_i n_i \mu_i .$$

Egy elektrolitoldat *vezetőképessége* alapvetően függ az oldott ionos anyag koncentrációjától, ami meghatározza a mozgásképes ionok koncentrációját. Az oldott anyag koncentrációjának növelésekor a mozgásképes töltéshordozók koncentrációja (és így a vezetőképesség) kis koncentráció esetén általában növekszik, de az oldatban lévő ionoknak egymással és az oldószerrel való bonyolult kölcsönhatásai miatt, egy bizonyos koncentráció felett a vezetőképesség csökkenhet az oldott anyag mennyiségének növelésekor.

A töltéshordozók *mozgékonyága* több tényezőtől függ. Az egyik ilyen tényező a folyadék viszkozitása. Az elektrolitban az ionok – elektromos töltésük miatt – általában egy ionokból vagy dipólusokból álló burkot alakítanak ki maguk körül, és ezzel a burokkal együtt mozognak az elektromos erőtér hatására. Ez – az ion méreténél rendszerint sokkal nagyobb – képződmény a folyadékban sűrűlő mozog, és ezt a sűrűlőást lényegesen befolyásolja a folyadék viszkozitása. Mivel a viszkozitás magasabb hőmérsékleten általában kisebb, a mozgékonyág a hőmérséklet emelkedésével nő. Ez az oka, annak, hogy az elektrolitok vezetőképessége a hőmérséklet emelkedésével általában nő.

Elektromos vezetés gázokban

A gázok normális körülmények között rossz vezetők. Vezetővé csak töltéshordozók keltésével tehetők. A töltéshordozó-keltésnek két alapesete van:

- ◆ A gáz maga nem tudja "megtermelni" a töltéshordozókat, azokat külső hatás hozza létre, ez a *nem önálló vezetés*.
- ◆ A gázban maga az elektromos áram hozza létre a szükséges töltéshordozókat, ez az *önálló vezetés*.

Nem önálló vezetés

Töltéshordozót létrehozhat hő, sugárzás vagy bármilyen külső energiaforrás, ami ionizálni képes a gázmolekulákat. Ekkor ugyanis pozitív töltésű ionok és negatív töltésű elektronok keletkeznek, amelyek külső erőtér hatására mozognak: áram jön létre.

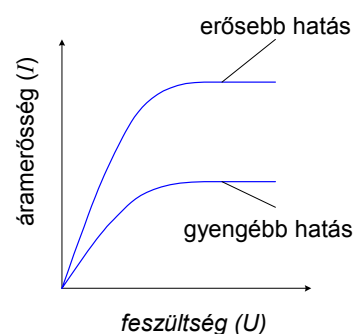
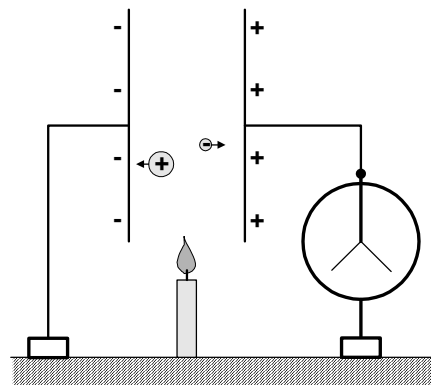
¹ Állandó feszültségű teleppel végrehajtott mérések során az U telepfeszültség és az I áramerősség között az $U \sim I$ összefüggés helyett $U - U_p \sim I$ alakú összefüggést kapunk, ahol U_p az elektródoktól és az elektrolittól függő állandó feszültség, az ún. *polarizációs feszültség*. Ez az ellenfeszültség az elektródokon végbemenő folyamatok következménye (erről a kontaktusjelenségek tárgyalásánál még szó lesz). Ez úgy küszöbölhető ki, hogy a mérést kis frekvenciájú váltakozó feszültséggel végezzük el. Ekkor az elektródokon nem tud létrejönni az állandó ellenfeszültséget okozó anyagkiválás.

KÍSÉRLET:

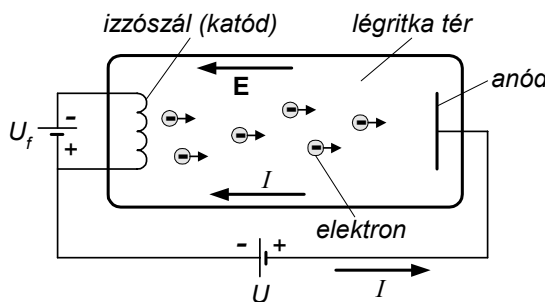
Elektrométerhez kapcsolt, feltöltött kondenzátor (ábra) töltése eltűnik, ha a lemezei közé lángot (pl. égő gyertyát) tartunk, mert a láng által keltett elektromos töltések semlegesítik a lemezek töltését.

A töltéshordozó-keltéssel egy időben a véletlenszerűen összetalálkozó ionok és elektronok újraegyesülése – az ún. *rekombináció* – is végbemegy. A töltéshordozók mindenkori koncentrációját a keltés és rekombináció intenzitása szabja meg, és kialakul egy egyensúlyi töltéshordozó-koncentráció (n).

Ha egy gázban elhelyezett két elektród közé feszültséget (U) kapcsolunk, akkor a létrehozott elektronok és ionok a gázban elektromos áramot (I) hoznak létre. Kis feszültségeknél kicsi az áram, ezért az elektródokon eltűnő töltéshordozók nem módosítják lényegesen a töltéshordozó-koncentrációt. Ilyenkor $n \approx \text{állandó}$, és teljesül az Ohm-törvény (az ábrán a lineáris szakasz). A feszültség további növelésével egyre több töltéshordozó jut el rekombináció nélkül az elektródokra, és a töltéshordozók számát – és így az áramot is – a töltéshordozó-keltés sebessége szabja meg: állandó ionizáló hatás esetén az áram nem tud tovább nőni, hanem egy állandósult értéket vesz fel, ez a *telítési áram*. A telítési áram az ionizáló hatás (pl. radioaktív sugárzás) erősségétől függ, ezért az ionizáló hatás erősségének mérésére használható (ionizációs kamra).



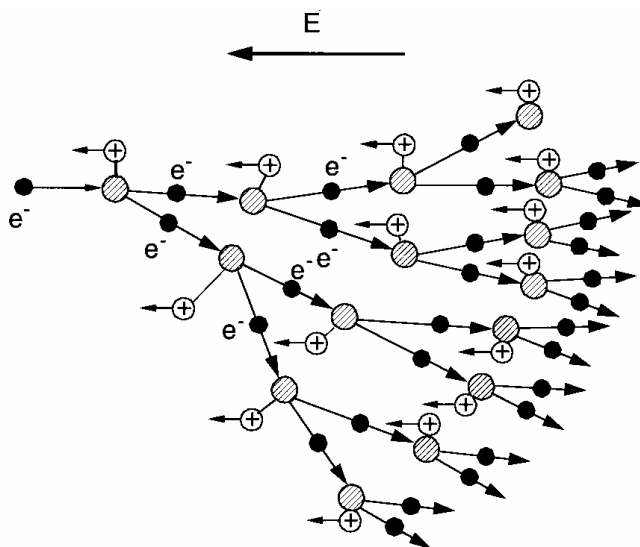
A nem önálló vezetés speciális esete, amikor a töltéshordozókat egy fémzárral izzításával állítják elő. Az izzó fémről ugyanis a hőmozgás hatására elektronok lépnek ki (*termikus elektronemisszió*). Ha az izzószálat légritka térbe tesszük, akkor az elektronok szabadon elmozdulhatnak (nagyobb nyomáson a gázmolekulákkal történő gyakori ütközések miatt a mozgás korlátozott), ezért ha az edényben (ábra) elektromos erőteret (\mathbf{E}) hozunk létre, akkor az elektronok a térerősséggel szemben mozogva elektromos áramot hoznak létre. (Figyeljük meg, hogy az elektronok – negatív töltésük miatt – a térerősséggel szemben mozognak, de az áram iránya – a korábban tárgyalt definíció miatt – a térerősség irányával egyezik meg.) Ezt a töltéshordozó-keltési mechanizmust használják ki a különféle elektroncsövekben, az oszcilloszkópok legfontosabb alkotórészét képező katódsugárcsőben és az elektronmikroszkópban is.

**Önálló vezetés**

Egy gázban különféle külső behatások (pl. a kozmikus sugárzás) miatt mindig keletkezik kis számú töltéshordozó (elektron-ion párok). Ezért, ha *ritkított gázban* elhelyezett elektródok között feszültséget hozunk létre, és a feszültséget növeljük, akkor az elektromos erőter hatására ezek a töltéshordozók annyira felgyorsulnak, hogy képesek a semleges gázmolekulákat a velük való ütközéskor ionizálni. Ez a folyamat az *ütközési ionizáció*. Az ütközési ionizációban elsősorban az elektronok vesznek részt, mert tömegük az ionizálásnál kiütendő elektronéval megegyezik, és ilyenkor a leghatékonyabb az energiaátadás.

Az ütközési ionizáció során új töltéshordozók (elektron-ion párok) jönnek létre, a keletkezett elektronok felgyorsulnak, és tovább ionizálnak (ábra). Az áram nagyon gyorsan nőni kezd (minden elektron két másikat kelt, így a töltéshordozók száma 2 hatványai szerint, lavinaszerűen nő). Ilyenkor a gáz már maga termeli meg a vezetéshez szükséges töltéshordozókat, az ilyen vezetést nevezzük *önálló vezetésnek*.

Az ütközési ionizáció csak alacsony nyomáson hatékony, mert ekkor a töltött részecskék szabad úthossza nagyobb, és így nagyobb energiára gyorsíthatók, ami megnöveli a töltések ionizáló képességét. Az ütközések során nem csak ionizáció lehetséges, hanem az elektronok gerjesztése is, ami – az elektronoknak az alapállapotba való visszatérésekor – *fényjelenségeket* is létrehozhat. Innen kapta a gázokban létrehozott elektromos áram a *gázkisülés* elnevezést.



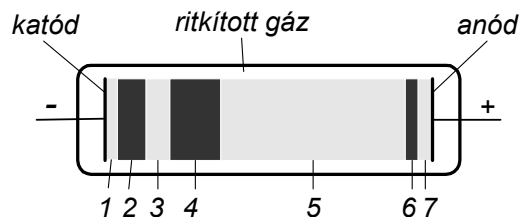
KÍSÉRLET:

Nem túl ritka (5 kPa és 0.001 kPa közötti nyomású) gázban jön létre a ködfénykisülés, amelyben a töltéshordozók ütközési ionizáció útján jönnek létre, és benne – eléggé bonyolult folyamatok következtében – sötét- és világító tartományok váltják egymást (az ábrán 1 – katódfény, 2 – sötét katódtér, 3 – negatív ködfény, 4 – Faraday-féle sötét tér, 5 – plazma, 6 – sötét anódtér, 7 – anódfény). Az egyes tartományok hossza a nyomástól illetve a csőre kapcsolt feszültségtől függően változhat, egyesek el is tűnhetnek.

A ködfénykisülés egyes szakaszairól általánosságban azt lehet mondani, hogy a sötét tartományokban a töltéshordozók gyorsulnak, energiát gyűjtenek (az energiaelnyelő ütközések hiányát mutatja az, hogy nincs fénykibocsátás), a világító részeken pedig az ütközéseknél bekövetkező ionizáció és gerjesztés következtében energiát veszítenek (ezt mutatja a fénykibocsátás).

Gyakorlati fontossága miatt érdemes külön megemlíteni a negatív ködfényt (3), amelynek fényét a ködfénylámpákban (más néven glimmlámpa) láthatjuk. Ez a tartomány úgy jön létre, hogy a katódba ütköző ionok a katód anyagából elektronokat löknek ki, és ezek az elektronok, a sötét katódtérben az anód felé gyorsulva, itt érik el azt az energiát, amellyel a gázmolekulákat ionizálni illetve gerjesztetni képesek (a gerjesztés következménye a fénykibocsátás).

Fontos tartomány a plazma (5), ami a régebben készült reklámcsővek fényét adja, és amelynek színe függ az alkalmazott gáztól. A negatív ködfényben az elektronok energiát veszítenek, a plazma előtti sötét térben (4) pedig újra energiát gyűjtenek, és a plazma tartományában ionizálnak és fénykibocsátást okoznak. A plazma sajátos képződmény: benne azonos mennyiségű pozitív- és negatív töltés van, elektronok és ionok semleges keveréke, vagyis ionizált, kifelé semleges gázhalmazállapotú anyag. Tulajdonságai az ionok jelenléte miatt lényegesen eltérnek a közönséges gázokétól, gyakran az anyagnak egy új (negyedik) halmazállapotként emlegetik. A plazma állapotú anyagok jelentős szerepet játszanak a



csillagok működésében, a termonukleáris reakció létrehozásában és számos technológiai eljárásban.

Nagyobb légritkításnál ($0,001\text{ kPa}$ nyomás alatt) fényjelenségek már nincsenek a gázban, viszont a negatív elektródba (katód) becsapódó ionok elektronokat ütnek ki a katódból, és ezek az elektronok a pozitív elektród (anód) felé mozogva egy erős elektronáramot hoznak létre. Ez a katódsugárzás, amelynek észlelése közben fedezték fel az elektront.

KÍSÉRLET:

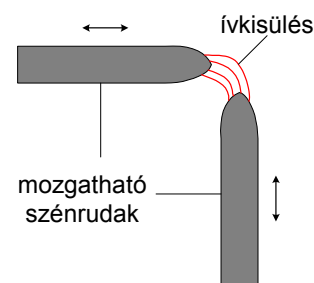
A katódsugarak tulajdonságai vákuumesőben tanulmányozhatók: fluoreszkálást okoznak, egyenes vonalban terjednek (árnyékjelenség), mágneses erőterrel eltéríthetők. A kísérletet váltakozó erőterrel (szikrainduktor) hajtjuk végre, ami úgy lehetséges, hogy a cső elektródjai közül az egyik nagy felületű, a másik kicsi. A nagy felületen sokkal több a kiütött elektron, ezért mindig az a negatív elektród (vagyis egyenirányítás van).

Nagyobb (atmoszférikus) nyomáson az ütközési ionizáció csak nagyon nagy feszültség hatására jön létre, de megvalósítható. Ilyen nagyfeszültségű kisülés a szikrakisülés, amelynél a töltéshordozók sokszorozódása egy keskeny csatornában következik be, és a molekulák gerjesztése miatt a csatorna mentén fénykibocsátás is történik („szikra”). Ilyen szikra figyelhető meg pl. kapcsolók kikapcsolásánál, de ilyen jelenség a légkörben bekövetkező villámlás is. Hasonló lavinaszerű töltéshordozó-keltés előfordul szilárd halmazállapotú szigetelőkben is, ott ezt *átütésnek* nevezik. Az átütés során a szigetelő az átütés csatornája mentén tönkremegy, szigetelőképességét jórészt elveszíti, ezért a szigetelő anyagok fontos jellemzője, hogy milyen térerősséget bírnak ki átütés nélkül („átütési szilárdság”).

Speciális kisülés az ívkisülés, amely két összeérintett szén- vagy fémrúd között a rudak széthúzásakor jön létre.

KÍSÉRLET:

Két mozgatható szénrúd közé feszültséget kapcsolva ívkisülést hozunk létre, és fényét ernyőre kivetítjük.



Az ívkisülésben a töltéshordozók keltésében jelentős szerepet kapnak az izzó katódból kilépő elektronok (termikus elektronemisszió), amelyek ionizálják a rudak közötti gázt. A jelentős áram fenntartja az izzást (Joule-hő), és így a kisülést is.

Az ívkisülés az áramkörben sajátosan viselkedik: minél nagyobb az áram, annál kisebb az elrendezés ellenállása (megnő a töltéshordozók koncentrációja), vagyis annál kisebb a rajta eső feszültség is. Az Ohm-törvény itt tehát nem érvényes: növekvő árammal csökkenő feszültség jár együtt. Az ilyen áramköri elemet negatív ellenállású elemnek nevezik. Ahhoz, hogy a kisülést fenntartsuk, meg kell akadályozni a feszültség lecsökkenését (az áram növekedését), amit úgy érhetünk el, hogy a kisüléssel sorba kapcsolunk egy állandó ellenállást (ez az ún. elötétellenállás), ami korlátozza a kisülésen átfolyó áramot.

Az ívkisülésben jelentős hő és fény szabadul fel, amit régebben fényforrásként használtak, ma az ívkisülést különböző, nagy hő igénylő technológiai folyamatokban (pl. fémek vágása, hegesztése) hasznosítják.