

Elektronikai anyagtudomány

Szigetelő anyagok villamos tulajdonságai

Dr. Hurtony Tamás, egyetemi docens

hurtony.tamas@vik.bme.hu

Budapest, 2025.05.15.

Bevezetés

Szigetelő (vagy dielektrikumnak)

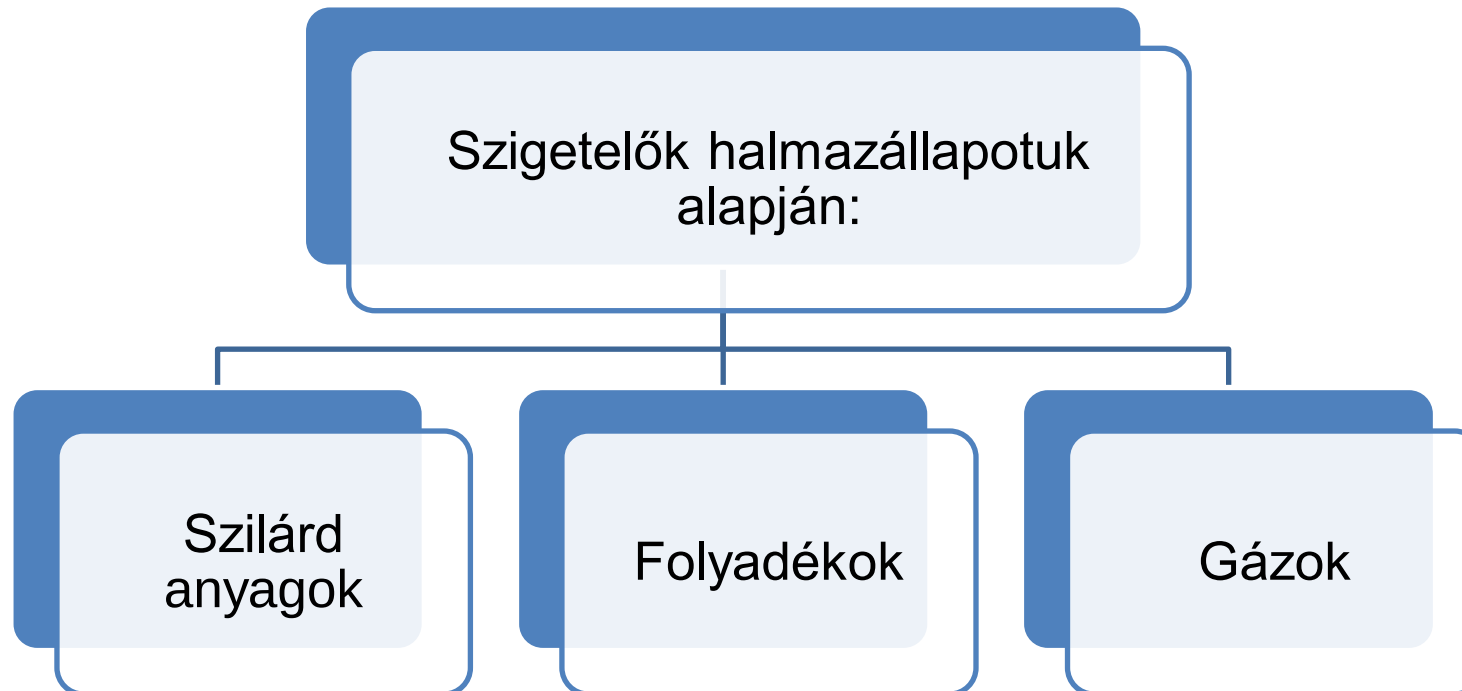
- elektromos áramot elhanyagolható mértékben vezetik.
- Az fajlagos ellenállásuk jellemzően $10^8 \Omega\text{m}$. felett van.
- A szigetelőkben a tiltott sáv szélessége nagyobb mint 3 eV $\rightarrow$ kevés szabad elektron van, az anyag vezetőképesége kicsi. (Ideális szigetelőben nincs szabad töltéshordozó).
- Az atomok hőmozgása miatt a gyakorlatban ilyen nem fordul elő, vagyis szigetelő anyagainkra inkább rossz vezető elnevezést kellene használni.



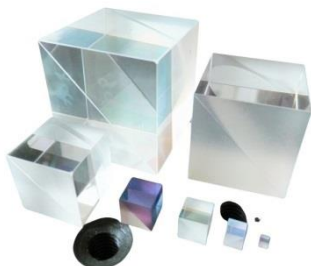
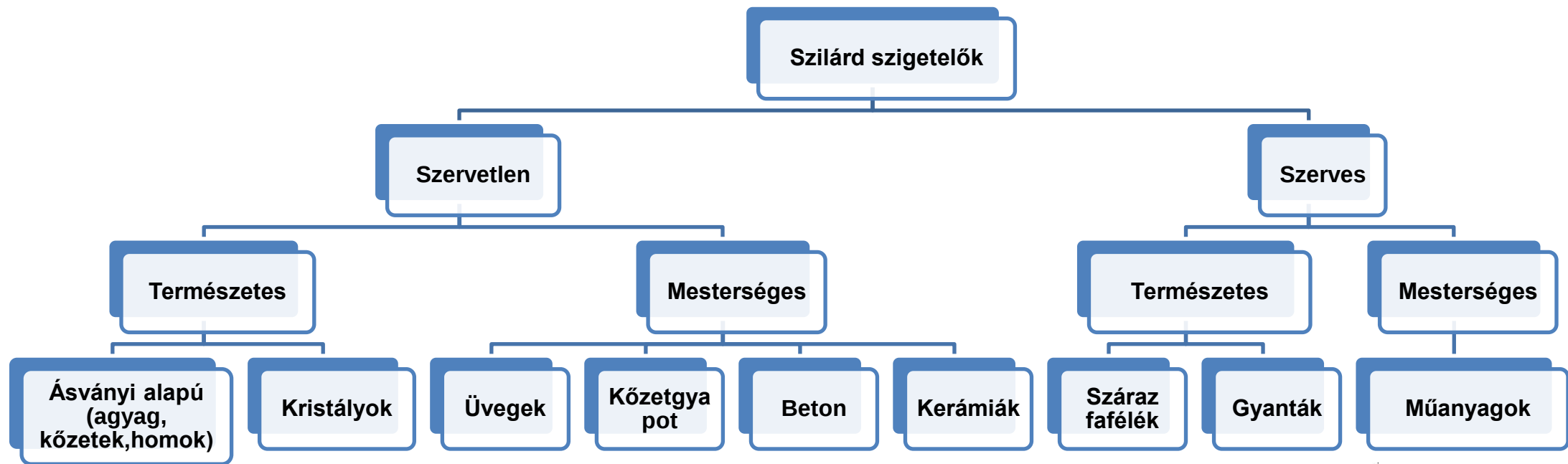
Bevezetés

Szigetelők jelentősége:

- biztosítják az elektromos áram biztonságos és hatékony elosztását és felhasználását
- Fontos szerepük van a villamosenergia-termelés és -átalakításban.

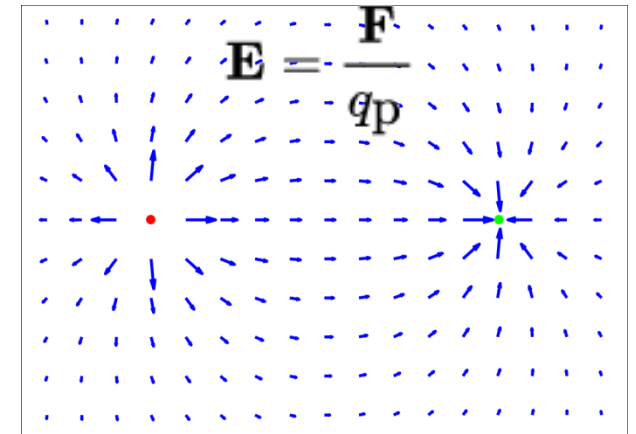


Bevezetés



Emlékeztető

- Az elektromos tér az elektromos töltések körül lévő közeg, ahol az elektromos erőhatások érvényesülnek.
- Az elektromos töltéseknek maguk hozzák létre az elektromos mezőt, amely befolyásolja más töltéseket
- Az elektromos tér egy elektromos töltés körül általában szimmetrikus, és a teret elektromos erővonalak segítségével lehet szemléltetni.
- Az elektromos erővonalak mutatják az elektromos mező irányát és erősségét, és mindig az elektromos töltések pozitív töltéséből negatív töltésébe mutatnak.
- Az elektromos tér erőssége a töltés nagyságától és a távolságtól függ, és matematikailag a Coulomb-törvény segítségével írható le.
- Az áram akkor folyhat egy vezetőben, ha az elektromos térben van egy elektromos potenciál-különbség (feszültség), amely az árammal szembeni ellenállást leküzdheti.



<https://www.cgtrader.com/3d-print-models/miniatures/figurines/grogu-using-the-force>

Szigetelési ellenállás

- Mennyire hatékonyan képes egy szigetelő anyag megakadályozni az áram áramlását a szigetelésen keresztül.
- Ohmban kifejezett érték
- A feszültségmentesített áramkör két pontja közé feszültséget kapcsolnak és mérik az ellenállást.
 - Általában nagy feszültségek mellett kis áramokat kell mérni.
 - Értéke változik a hőmérséklettől és apáratartalomtól.
- A szigetelő anyagok vastagságával arányos a mért ellenállás mértéke.
- Szabványokban rögzített módon érdemes levégezni (pl. MSZ 13207-1 7.3)
- Nem tévesztendő össze a szigetelés villamos szilárdságának vizsgálatával (átütési vizsgálat)



Átütési szilárdság

- Milyen elektromos terhelést képes elviselni az anyag átütés veszélye nélkül.
- Az átütés drámaian csökkenti az anyagok szigetelési tulajdonságát.
- Az átütési szilárdság az anyagok belső tulajdonsága V/m-ben mérik
- Az átütés pillanatában az anyag töltött részecskéi (pl külső valencia elektronjai) a nagy térerősség hatására áramlani kezdenek.
- Az átütési szilárdság függ pl:
 - Anyagvastagságtól
 - Hőmérséklettől
 - AC-n frekvenciától
 - Páratartalomtól
 - Nyomástól (elsősorban gázoknál)



<https://www.holepop.com/breaking-dielectric-breakdown/>

Relatív permittivitás

- Külső térerősség hatására megindul elektromos dipólusok átrendeződése
- A permittivitás összefügg az elektromos szuszceptibilitással, ami megmutatja, hogy milyen könnyen polarizálja a dielektrikumot az elektromos tér.

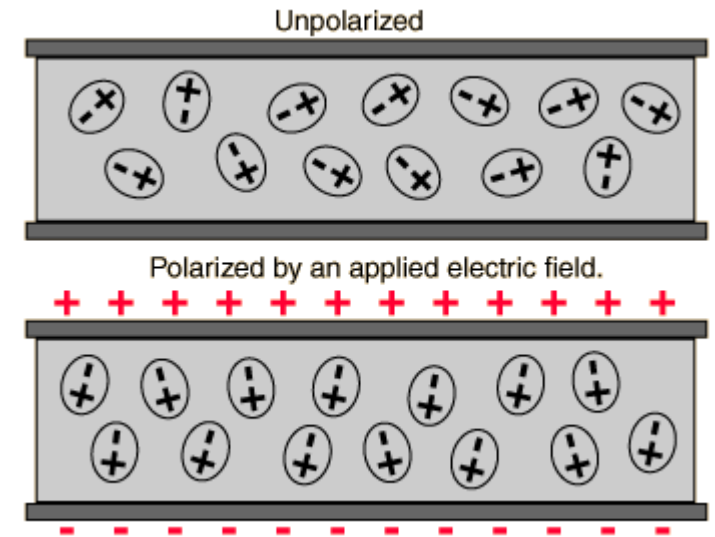
$$\varepsilon = (1 + \chi)\varepsilon_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

- A közegben az elektromos tér indukálta töltésmegosztás, a polarizáció jellemzésére a $\mathbf{P}$ indukált dielektromos polarizációs sűrűség szolgál, ennek nagyságát a térerősség és a közeg tulajdonságai, azaz a szuszceptibilitás határozzák meg:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E},$$

- A közeg megváltozott töltéseloszlása a $\mathbf{D}$ elektromos eltolásvektorral jellemezhető.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E}.$$



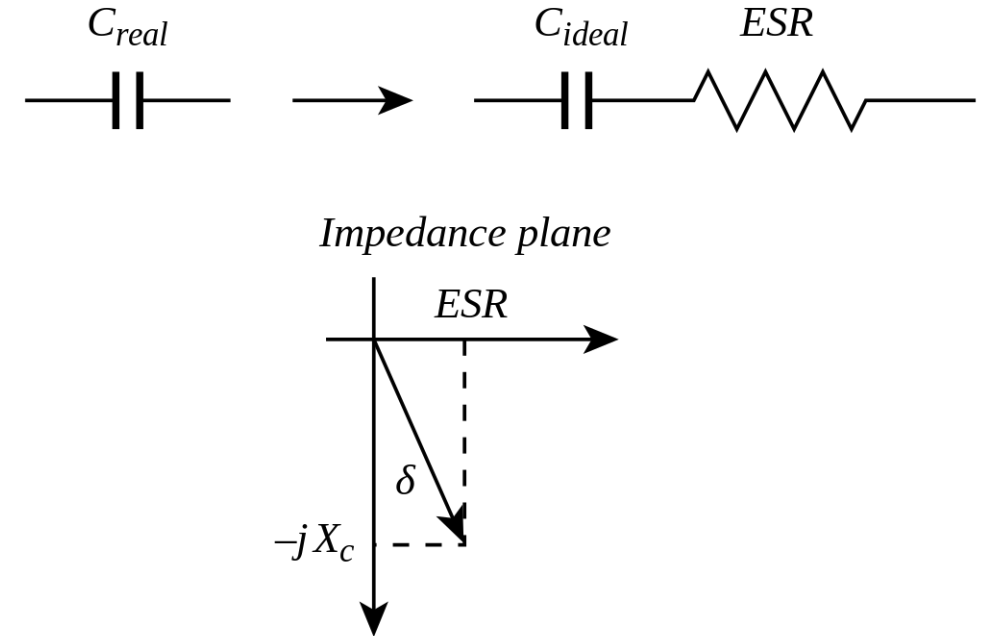
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric>

Síkkondenzátor kapacitása
(töltéstárolási képessége)

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$$

Dielektromos veszteség

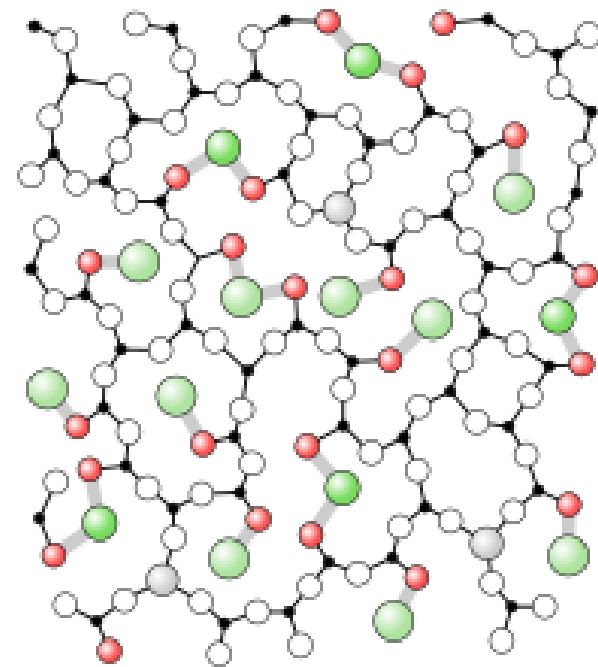
- a magas dielektromos állandó $\rightarrow$ jobb szigetelőképességgel
- Dielektromos anyagokban keletkező energiaveszteség.
- Ez a veszteség a dielektromos anyagban tárolt energiából származik, és az anyag specifikus dielektromos veszteségi tényezőjével jellemezhető (loss angle δ vagy $\tan(\delta)$), amely az anyag elektromos tulajdonságaihoz tartozik.
- A dielektromos veszteség hatása általában hőtermelés formájában jelentkezik, ezzel az anyag károsodhat.



https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_loss

Üveg szigetelők

- A kémiai kötések olyanok benne, mint a kristályos kvarcban, de molekulái nem rendeződtek kristálysírkba.
- A kötéstávolság és a kötések szöge is változó. Az elemi cellák szintjén még látszanak benne a SiO₄ tetraéderek, de nagyobb méretekben már nem.
- Amikor az üveg lehűl, akkor lényegében nem alakul át a halmazállapota, hanem egy bizonyos hőmérséklet-tartományban megnő a viszkozitása és megkeményedik 10⁴⁰ Pa·s.
- A kristályos anyagoktól eltérően az üvegnek, mint amorf anyagnak nincs fagyáspontja.
- 90%-ban nátron üvegekkel dolgozunk: Kvarchomok + Nátrium-karbonát (Na₂CO₃) + Kálium-karbonát, (K₂CO₃) + Földpát (alumínium-oxid) + Mészke + Dolomit (magnézium-oxid és kalcium-oxid) + Törtüveg



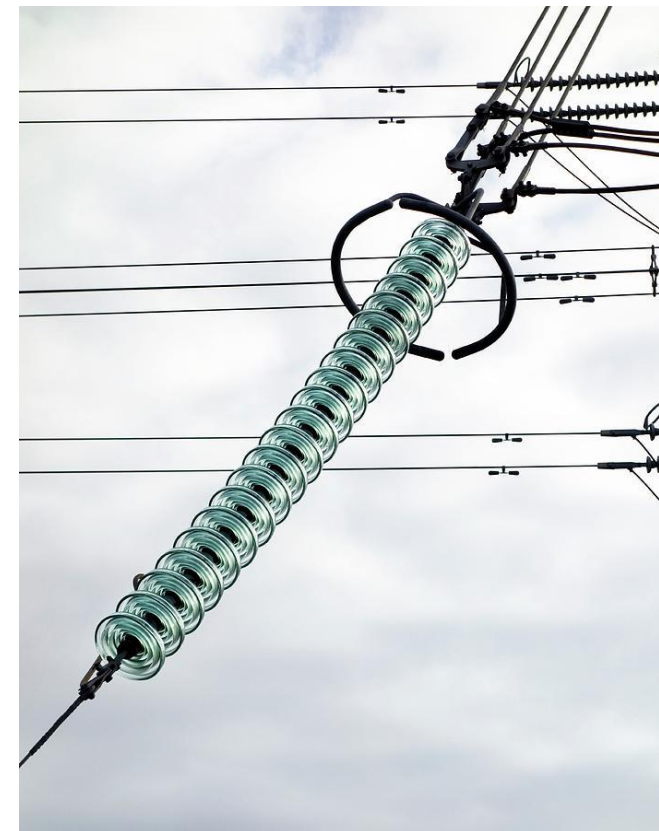
• Si • Al • O • O⁻ • Na⁺ • Ca²⁺

wikipedia



Üveg szigetelők

- Általában az elektromos átviteli és elosztó rendszerekben használnak, de mikroelektronikában is használatos.
1. Nagy dielektromos szilárdság: Az üveg szigetelőknek nagy a dielektromos szilárdságuk, amely hatékony szigetelővé teszi őket a nagy feszültségekkel szemben
 2. Jó mechanikai szilárdság: ellenállnak a külső erőhatásoknak és deformációknak.
 3. Kémiai ellenálló képesség: megakadályozza, hogy a szigetelő anyagok korrodálódjanak vagy károsodjanak olyan vegyi anyagoktól, amelyekkel érintkeznek.
 4. Magas hőmérséklet-tűrés: magas hőmérsékletek és nagy terhelések között használják anélkül, hogy a szigetelő anyagok károsodnának vagy meghibásodnának.



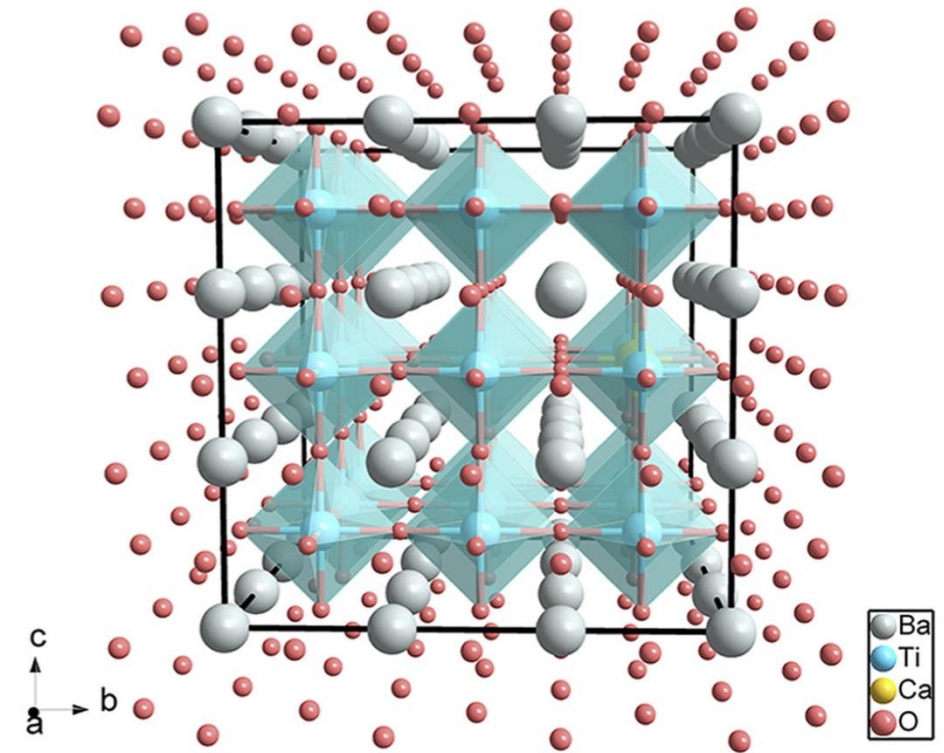
<https://www.sciencephoto.com/media/647968/view/cap-and-pin-glass-insulator-string>



MELF
dióda
alkatrész

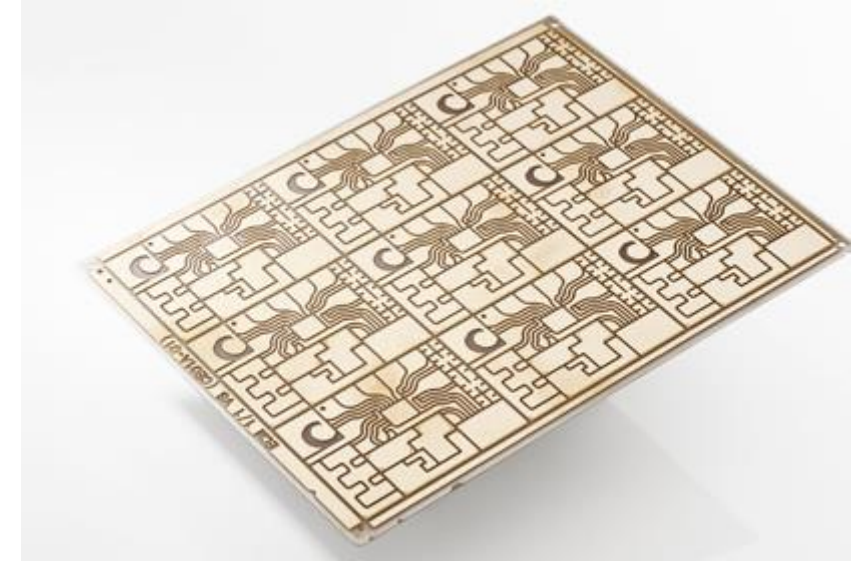
Kerámia szigetelők

- olyan szervetlen, nemfémes, szilárd anyagot, amit nagy hőmérsékleten állítanak elő. (oxid-, foszfát-, fluorit-, karbid-, de akár szulfidtartalmú)
- oxidok - alumínium-oxid, berillium-oxid, cérium(IV)-oxid
- nem-oxidok - karbidok, boridok, szilicidek, nitridek
- kompozit-anyagok - kerámia-mátrix kompozitok
- A kerámiákban kovalens és ionos kötések is megtalálhatók.
 - Az ionos kötések a fémes és nem fémes alkotók között
 - A kovalens kötések a nemfémes alkotók között
- Szerkezetük polikristályos, ezért jellemzően izotróp tulajdonságokkal rendelkeznek.
- A kerámiát alkotó szemcsék átlagos mérete nagy hatással van különböző fizikai tulajdonságokra.



Kerámia szigetelők

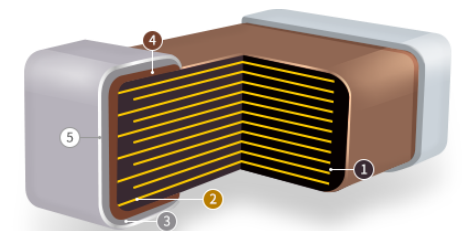
- A kerámia szigetelők kiválóan ellenállnak a hőnek és a korróziónak, valamint rendkívül kemények és merevek (nagyon törékenyek).
- A kerámia szigetelők általában magasabb dielektromos szilárdsággal rendelkeznek, mint a hagyományos szigetelő anyagok.
- Általában nagyobb a hőellenálló képességük, amely lehetővé teszi számukra, hogy számos magas hőmérsékletű alkalmazásban használják őket.
- Alacsony a hőtágulási együtthatójuk, termikusan stabilak.
- Savaknak lúgoknak ellenállnak



<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/curamik-ceramic-substrates/curamik-thermal>



<https://ele.kyocera.com/en/product/capacitor/mlcc/>



- ① Ceramic body
- ② Electrode(Ni/Cu*)
- ③ Plating(Ni)
- ④ Termination(Cu or Cu+Metal Epoxy)
- ⑤ Plating(Sn)

* Internal Cu electrode is only applied to limited products.

<https://www.samsungsem.com/global/product/passive-component/mlcc.do>

Porcelán szigetelők

- A porcelán egy nagyon szilárd és kemény kerámia anyag, amelyet hővel és nyomással gyártanak.
- Legfőbb összetevői a természetben előforduló lágy, porózus agyagkaolin, amely gyakran kvarcot is tartalmaz. Ezen kívül még földpátokat és meszet is adnak hozzá, hogy a technológiai hőmérsékletet alacsonyabban tudják tartani. és a kvarc, amelyeket vízzel és egyéb anyagokkal kevernek össze.
- Gipszből készült, nedvszívó falú formában öntik megfelelő alakúra
- Ezután a keveréket forró kemencében (900°C) égetik ki, hogy a különböző anyagok szilárd és porózus állapotból egy szilárd, sűrű és homogén anyaggá álljanak össze.



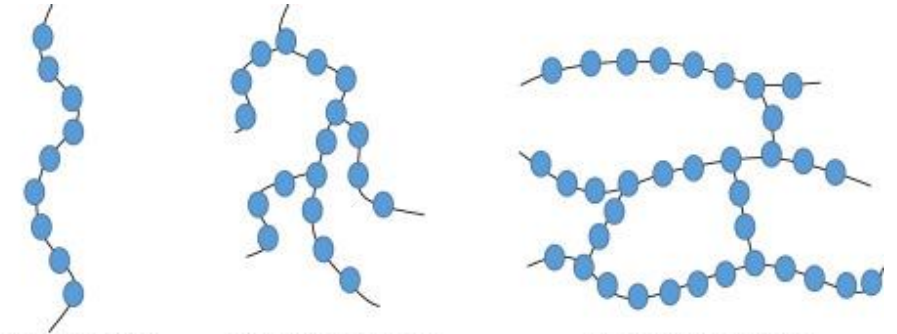
Porcelán szigetelők

- Magas mechanikai szilárdság: nagyon kemény és ellenálló anyag, amely ellenáll az időjárás hatásainak, a korróziónak és a mechanikai igénybevételeknek.
- Nagy szigetelőkéesség: nagyon magas feszültség alkalmazható rajta anélkül, hogy átütne a szigetelő anyagon 10-12 kV/mm.
- Alacsony dielektromos veszteség: nagyon kevés elektromos energiát bocsát ki hő formájában <1%.
- Jó hőállóság: Kaolin (1700-1800°C) földpátok (1100-1500°C) → a keveréktől függ, de jellemzően 1200-1400°C között van az olvadáspontja.
- Korrózióállóság: ellenáll a kémiai behatásoknak. Erős savak és lúgok kárt tehetnek benne, valamint hosszú idejű pára vagy víz hatására repedések keletkezhetnek benne
- Könnyen tisztítható és karbantartható.



Műanyag szigetelők

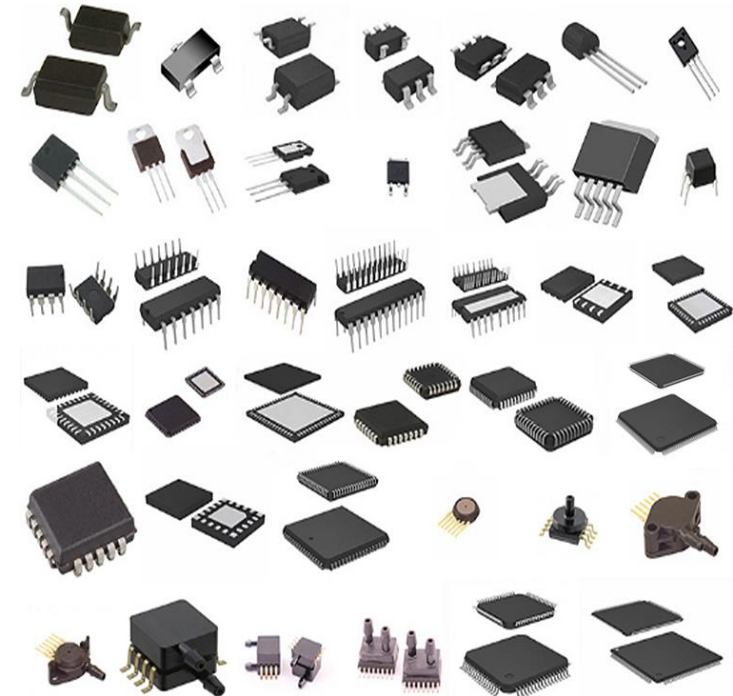
- A hőre lágyuló műanyagok amorf (amorphous) vagy részben kristályos (semi-crystalline) szerkezetűek,
- lineáris vagy elágazó, hosszú, fonal alakú molekulaláncokból állnak, melyek fizikai erővel (nem elsőrendű kémiai kötéssel) kapcsolódnak.
- Pl. Monomerjeikből polimerizációval állíthatók elő.
- Léteznek hőre lágyuló vagy keményedő változatok
- Gyakran kompozit anyagok mátrix anyagaként használják.
- Fröccssajtolással formára alakítható anyag.
- Az integrált áramkörök tökanyagának leggyakoribb összetevője.



Lineáris

Elágazó

Hálózatos



Műanyag szigetelők

- A polimer szigetelő anyagoknak magas a szigetelési ellenállása
- jó a dielektromos szilárdsága, és képesek ellenállni a vegyi anyagok és az időjárási hatások okozta korróciónak.
- Gyakran rugalmasak és hajlékonyak, ami lehetővé teszi a könnyű telepítést és a helyszíni módosításokat.
- jó mechanikai szilárdsággal rendelkeznek, ami fontos a szélsőséges időjárási feltételek és a mechanikai stressz miatt.
- Könnyűek, ami könnyű szállítást és telepítést tesz lehetővé.
- A polimer szigetelő anyagok hőállósága és tűzvédelme változó lehet, de adalékokkal széles tartományban változtatható.
- Színezőanyagokkal rendelkezhetnek, amelyek lehetővé teszik az esztétikus megjelenést és a könnyű azonosítást.



<https://www.raypcb.com/kapton-pcb/>



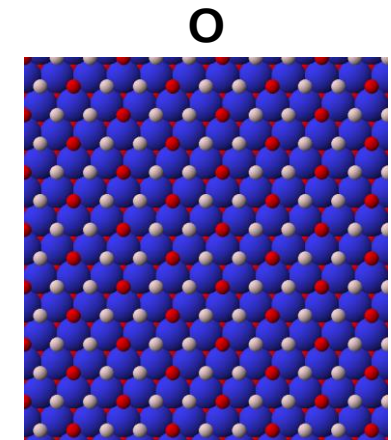
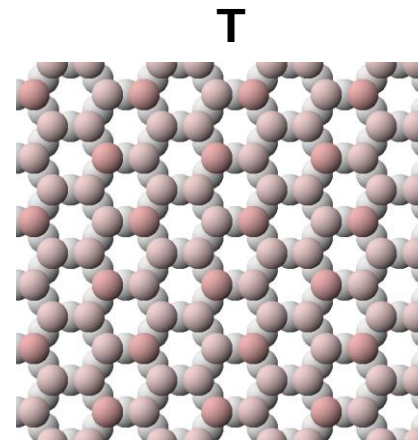
<https://croylek.com/knowledge-base/what-is/kapton-tape>

Mica szigetelők

- A Mica egy olyan természetben előforduló szilikát ásvány, melynek speciális tulajdonsága, hogy az egyes rétegek könnyen szétválnak rugalmas lemezekre.
- Gyakori az üledékes kőzetekben
- TOT-c szerkezetűek:
 - párhuzamos TOT rétegekből áll, amelyeket gyengén kötnek össze azokban található kationok
 - A TOT rétegek két tetraéderes lemezből (T) állnak, amelyek erősen kapcsolódnak egyetlen oktaéderes lemez (O) két oldalához.
 - A mica tökéletes bazális hasadását a TOT rétegek viszonylag gyenge ionos kötése eredményezi.
- A jó szigetelő tulajdonságuk ellenére a műanyagoktól jobb hővezetők (0.6 to 2.8 W/mK)



wikipedia



Mica szigetelők

- Magas dielektromos állandó: jó szigetelő anyag.
- Magas átütési szilárdság: nagyon nehéz áttörni a szigetelést, még nagyobb elektromos terhelés esetén is.
- Jó hőállóság: képesek ellenállni a magas hőmérsékletnek anélkül, hogy megsérülnének vagy lebomlanának.
- Magas mechanikai szilárdság: ellenállnak az ütéseknek és a deformációnak.
- Korrozíóállóság: a nedvesség vagy a savak hatásának jól ellenáll.
- Jó biológiai és kémiai stabilitás: A mica biológiai és kémiai stabilitással rendelkezik, ami azt jelenti, hogy nem bomtható le biológiai vagy kémiai folyamatok által.
- Könnyű súly: megkönnyíti a telepítést és a karbantartást.



<https://www.greentechee.com>



wikipedia

Összehasonlítás

Szigetelő Anyag	Átütési Szilárdság (kV/mm)	Dielektromos Állandó	Dielektromos Vesztés Tangens	Olvadáspont (°C)	Hővezetés (W/mK)
Üveg	15-100	3-10	<0,01	1400-1600	0,8-1,2
Műanyag	10-25	2-8	0,0002-0,02	100-200	0,1-0,5
Kerámia	10-50	6-80	0,001-0,02	1000-2000	3-50
Porcelán	10-25	5-7	0,001-0,005	1300-1400	1-5
Mica	100-400	5-8	0,0001-0,01	1100-1300	1,5-4,5

Példa kérdések

1. Szigetelési ellenállás...

- A ... Megmutatja, hogy egy anyag milyen jól vezeti a hőt.(H)
- B ... mértékegysége Siemens (H).
- C ... Általában kis feszültségek mellett kis nagy áramokat kell mérni (H)
- D ... A szigetelő anyagok vastagságával arányos a mért ellenállás mértéke. (I)

2. Az üveg szigetelőkre általában jellemző, hogy...

- A ... Atomi szerkezetük kristályos (H)
- B ... a látható hullámhossz számára átlátszóak (I).
- C ... kalcium alapúak (H)
- D ... Kémiai ellenállóképességük alacsony (H)

3. A műanyag szigetelők általában ...

- A ... szervesen eredetűek (H)
- B ... gyakran rugalmasak és hajlékonya (I)
- C ... Alacsony a szigetelési ellenállásuk (H)
- D ... nehéz anyagok (H)