



IZOLANTI IN DIELEKTRIKI



Osnovne naloge izolantov in dielektrikov

- Preprečujejo pot električnemu toku (čim večja ρ),
- Uspešno prenašajo močna električna polja (čim večja električna prebojna trdnost),
- Dielektriki s polarizacijo znižujejo električno polje (čim večja ϵ_r).

$$\downarrow E = \frac{Q}{\uparrow \epsilon \cdot S}$$

- So največkrat najodločilnejši faktor kvalitete in zanesljivosti električne naprave.



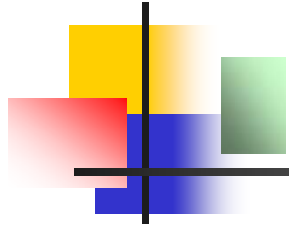
Zahtevane lastnosti izolantov in dielektrikov

5.
219

- Električne lastnosti:
 - valenčni elektroni čvrsto vezani na atomsko jedro,
 - velika energija prepovedanega pasu $E_g > 3 \text{ eV}$,
 - $\rho > 10^8 \Omega\text{m}$
- Dielektrične lastnosti: $\epsilon_r = 1$ do $\gg 1$,
- Toplotne lastnosti,
- Mehanske lastnosti,
- Tehnološke,
- Kemične in
- Klimatske lastnosti.

- Po namenu uporabe:
 - izolante:
 - galvansko ločujejo prevodne dele z različnimi električnimi potenciali,
 - imeti morajo veliko prebojno trdnost,
 - imeti morajo čim nižjo dielektričnost in dielektrične izgube.
 - dielektrike:
 - visoke relativne dielektričnosti,
 - visoke prebojne trdnosti in
 - čim nižje dielektrične izgube.

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



Fizikalne lastnosti izolantov in dielektrikov

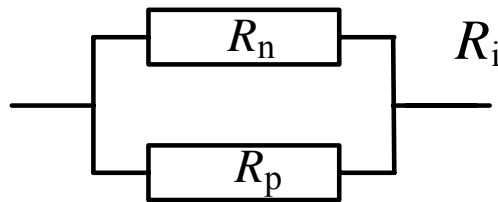
5.2
221

- **Električna upornost,**
- **Dielektričnost,**
- **Polarizacija,**
- **Dielektrične izgube,**
- **Električna prebojna trdnost,**
- **Mehanske lastnosti,**
- **Toplotne lastnosti,**
- **Vpliv vode in kemikalij**

Specifična električna prevodnost / upornost

5.2.1
221

- $\gamma \leq 10^{-8} \text{ S/m}$ $\rho \geq 10^8 \text{ }\Omega\text{m,}$
- ρ pada s temperaturo: imajo NTK
- Izolacijska upornost R_i je nadomestna upornost R_n in R_p .



$$R_i = \frac{R_n \cdot R_p}{R_n + R_p} = \frac{U}{I}$$

- vrednost R_i določa najmanjša izmed njiju,
- R_p je razen od materiala odvisna še od zunanjih vplivov (vlaga, pare, prah, idr.).



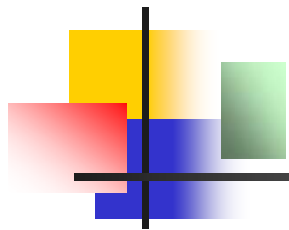
Dielektričnost

5.2.2
221

- Definirana je z:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = \frac{D}{E}$$

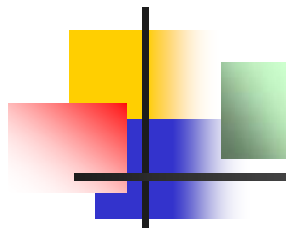
- Ponavadi jo obravnavamo kot konstantno vrednost,
- V resnici je odvisna od medsebojne lege polja in smeri kristala, frekvence, temperature, tlaka, vlage, E , ...,
- **Feroelektrični materiali:** $\varepsilon_r \gg 1$ (uporaba pri kondenzatorjih),
- Plini $\rightarrow \varepsilon_r \cong 1$, trdni izolanti $\rightarrow \varepsilon_r$ med 2 in 8, feroelektričnih materialih $\rightarrow \varepsilon_r$ do nekaj tisoč.



Električna polarizacija

5.2.2
222

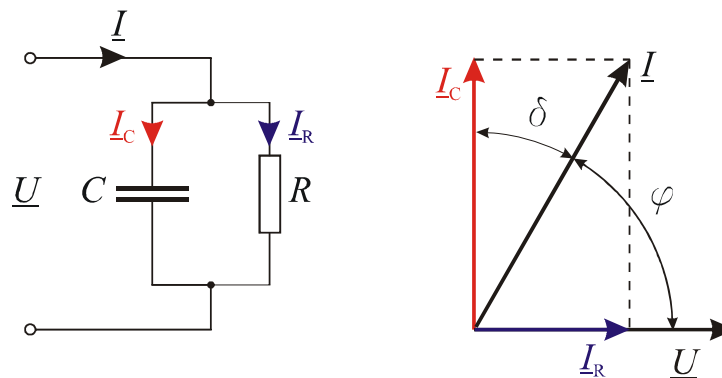
- Nastopi, če se material nahaja v električnem polju.
- Vrste polarizacij:
 - elektronska ali deformacijska polarizacija,
 - ionska ali atomska polarizacija,
 - orientacijska ali dipolna polarizacija in
 - strukturna polarizacija.



Dielektrične izgube

5.2.3
224

- Opisujemo jih z izgubnim kotom δ .
- Izgubni kot določimo na osnovi faznega premika kazalcev napetosti kondenzatorja v vakuumu in kondenzatorja z dielektrikom.



- $\text{tg}\delta$ je faktor izgub, vrednosti $\text{tg}\delta = (0.1 - 1000) \cdot 10^{-4}$, dobri materiali $\text{tg}\delta \leq 10^{-4}$,

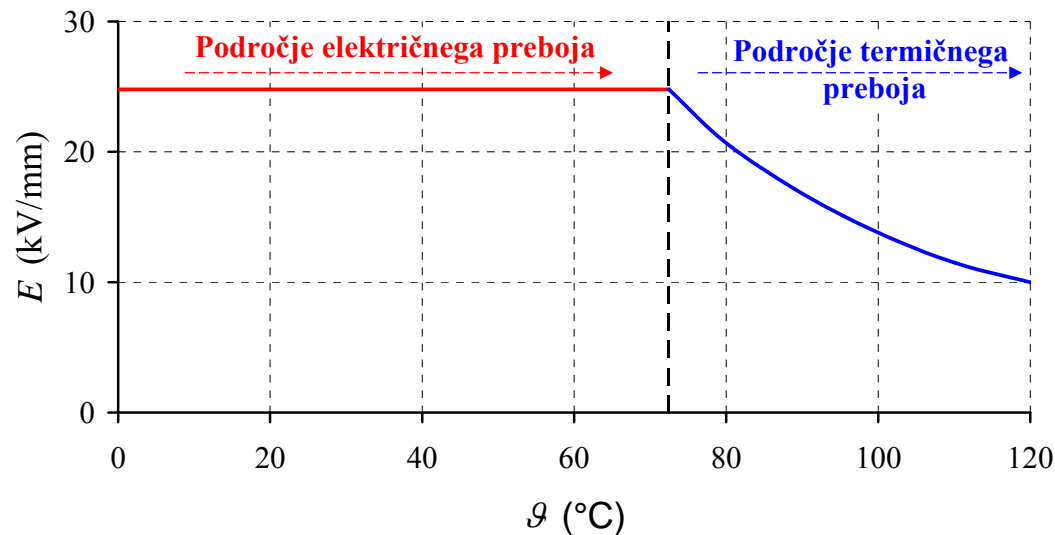
$$\text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

- $\text{tg}\delta$ je odvisen od temperature in frekvence (podajamo za 50, 800, 1000 Hz in 1 MHz).

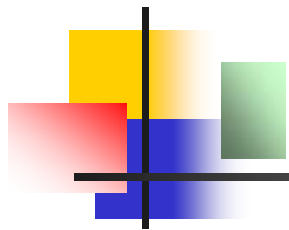
Električna prebojna trdnost

5.2.4
225

- je električna poljska jakost, pri kateri izolant popusti,
- Nastane zaradi vpliva električnega polja in temperature na ionizacijo,
 - **Območje električnega preboja:**
 - odvisno od lastnosti in geometrije materiala,
 - nastane zaradi premika valenčnih elektronov preko prepovedanega pasu.
 - **Območje termičnega preboja:** odvisno od temperature.



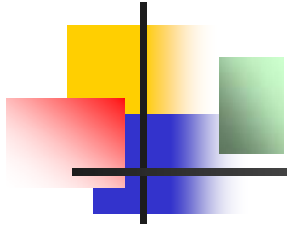
- Tanjši izolanti imajo višjo prebojno trdnost, (kV/mm), (boljše hlajenje),



Mehanske lastnosti

- Trdota,
- Lezenje,
- Elastičnost,
- ...

5.2.4
225



Toplotne lastnosti

5.2.5
226

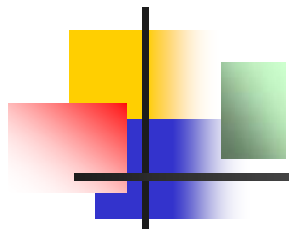
- Izolacijske sposobnosti materialom s temperaturo padajo.
- Nekaterne mejne temperature:
 - Talilna temperature,
 - Temperatura razpadanja (organski materiali),
 - Temperatura mehčanja,
 - Temperatura steklastega prehoda (material postane krhek kot steklo).

Toplotne lastnosti

- Razvrstitev materialov v temperaturne razrede.

5.2.5
226

Razred	Material	Najvišja trajna temp. °C
Y	bombaž, naravna in umetna svila, papir idr.; nadalje naravna guma, polietilen, polivinilklorid	90
A	proizvajalec	105
E	Typ tip stroja vrsta toka, stroja proizvodna številka	120
B	vrsta vezave, napetost nazivni tok nazivna moč vrsta obrat. $\cos \varphi$ (faktor moči)	130
F	smer vrtenja, nazivni vrtljaji /min frekvenca Vzbujanje: vezava, napetost vzbujalni tok	155
H	I.CL razred izolacije IP vrsta zaščite teža dodatne opombe, leto izdelave, pridobljeni atesti	180
C	sljuda, porcelan, steklo, kremen brez veziv ter umetni politetrafluoretilen (teflon)	> 180



Vpliv vode in kemikalij

- Vpojnost vode,
- Para propustnost,
- Kemična obstojnost,
- Občutljivost na staranje, insekte, plesni, sevanje, ...

5.2.6
229

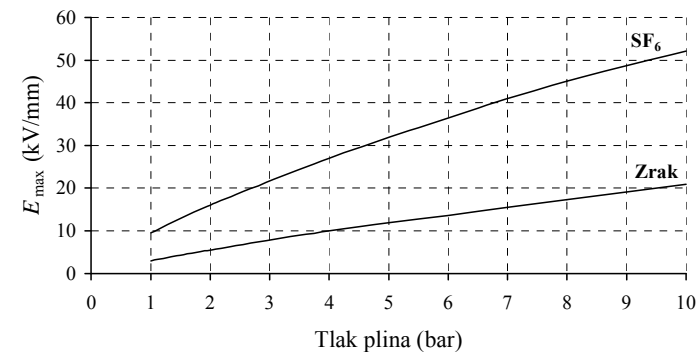
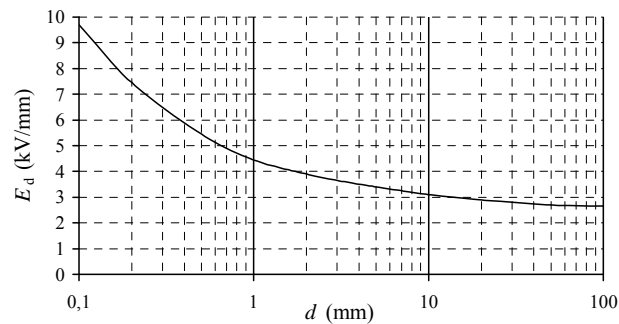


Plinasti izolanti

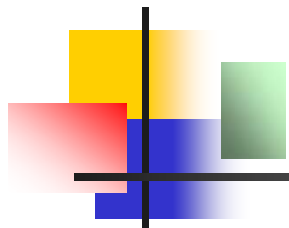
5.3
229

- Lastnosti plinov:
 - mala ϵ_r ,
 - mala prebojna trdnost (odvisna od vlage, pritiska),
 - velika izolacijska upornost,
 - brez izgub ($\text{tg } \delta = 0$),
 - prebojno mesto se regenerira.

- **Zrak:** je dober izolant,
 - Ima nizko dielektričnost: $\epsilon_r \cong 1$ (povzroča težave v kombinaciji z materiali z velikimi ϵ_r),
 - Električna prebojna trdnost: ~ 1 kV/mm (mного manj kot v trdnih dielektrikih $\rightarrow \sim 100$ kV/mm).



- **Drugi plini:** dušik, vodik, helij, argon, ogljikov dioksid.
- **Umetni plini:**
 - imajo višjo prebojno trdnost (žveplov heksafluorid SF₆, ogljikov fluorid C₃F₈, freon C Cl₂F₂ itd).
 - fluoride zamenjujejo ogljikovodiki (pentan).



Anorganski izolanti

- Naravni minerali
- Keramika,
- Steklo.

5.4
239



Naravni minerali

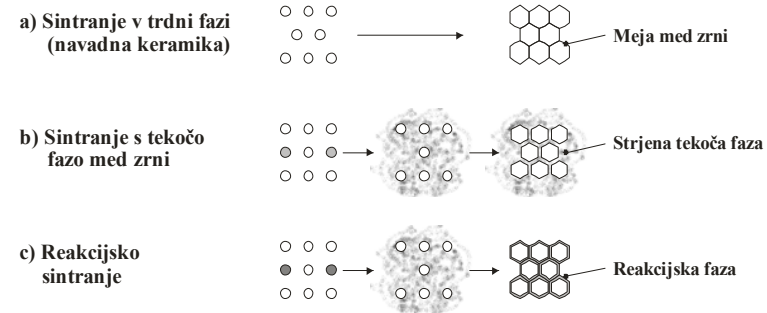
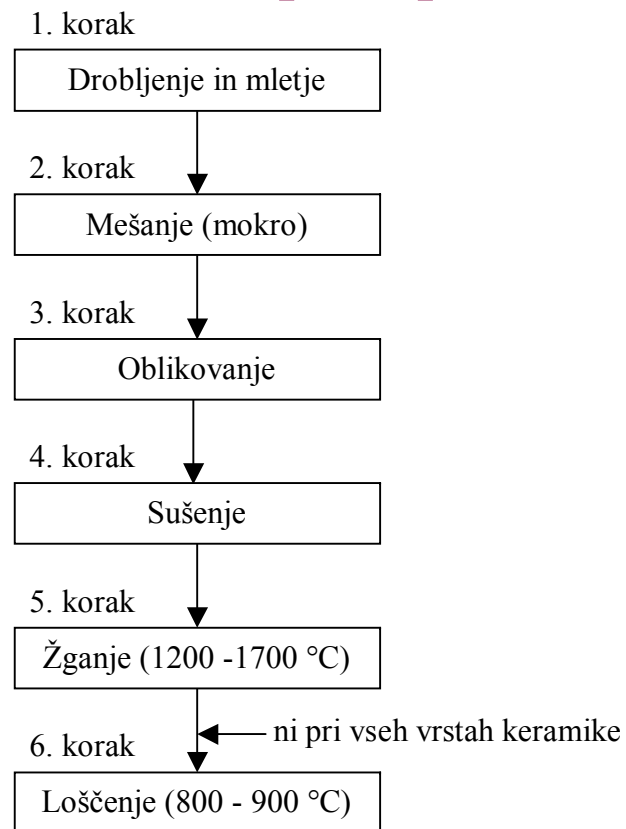
5.4.1
239

- Zaradi boljših umetnih materialov izgubljajo na pomenu
- **Sljuda:**
 - Najvažnejši anorganski material (ugodne dielektrične lastnosti, visoka toplotna obstojnost, kemična odpornost, mala higroskopnost)
 - Kristalizira v ravnih ploskvah, ki se dajo cepiti do debeline $5 \mu\text{m}$.
 - **Biotit:** razpade pri $900 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, uporaba v likalnikih, kolektorjih
 - **Muskovit:** se največ uporablja, visoka prebojna trdnost (70 kV/mm), nizke dielektrične izgube $\text{tg}\delta = 1,7 \cdot 10^{-4}$ pri 50 MHz , kalcinira pri $600 - 800 \text{ }^\circ\text{C}$, toplotna obstojnost do $400 \text{ }^\circ\text{C}$, uporaba v visokofrekvenčnih kondenzatorjih, $\epsilon_r \approx 7$.
- **Azbest:** tvori zelo dolge verige tetraedrov SiO_2 (vlakna debela $50 \mu\text{m}$).
- **Kremen:** (kvarc), je čisti SiO_2 v kristalni obliki, uporaba v kondenzatorjih in kvarčnih žarnicah ϵ_r do 37.

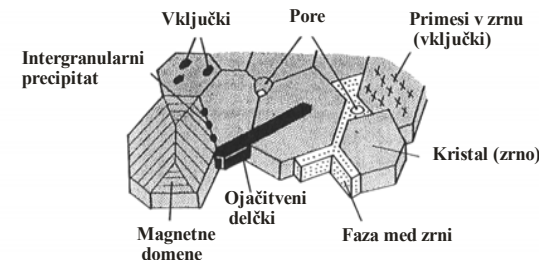
Izolacijska in dielektrična keramika

5.4.2
232

- Je umetni polikristalni oksidni anorganski material sestavljen iz gline in drugih rudnin.
- Tehnološki postopek izdelave keramike.



d) Shematični prikaz zgradbe keramičnega materiala



- a) Sintranje v trdni fazi (navadna keramika),
- b) Sintranje s tekočo fazo med zrnji,
- c) Reakcijsko sintranje.

- Posebne lastnosti keramike:
 - Visoka temperaturna obstojnost,
 - Obstojnost proti električnemu obloku,
 - Dobre izolacijske lastnosti:
 - visoka prebojna trdnost,
 - visoka notranja upornost,
 - velika odpornost proti plazilnim tokovom,
 - Ugodne dielektrične lastnosti $\varepsilon_r = 6 \dots 100.000$,
 - Velika odpornost na staranje,
 - Velika kemična obstojnost.
- Slabe lastnosti:
 - velika krhkost in občutljivost na udarce,
 - mala natezna trdnost,
 - velika razlika med natezno in tlačno trdnostjo,
 - točnost dimenzij zaradi sintranja ni zajamčena,
 - obdelava površine je izredno težavna zaradi velike trdote.

- Uporaba v elektrotehniki:
 - podnožja,
 - čvrsto izolacijsko podlago,
 - izolacijske elemente s dobro toplotno prevodnostjo,
 - senzorje,
 - superprevodnike, ...

- Vrste izolacijske in dielektrične keramike:
 - elektroporcelan,
 - steatit - material na osnovi magnezijevih spojin,
 - rutili - materiali na osnovi titanovih spojin (TiO_2),
 - materiali za posebne toplotne namene,
 - elektrostriksijski in piezoelektrični materiali,
 - feroelektrična keramika,
 - keramični senzorji.

Elektrostriksijski in piezoelektrični materiali

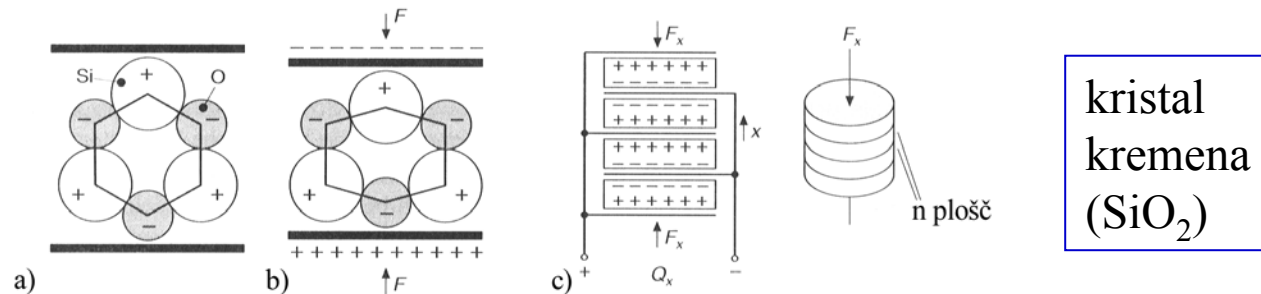
5.4.2.6
238

■ Elektrostrikcija:

- Polarizacija (elektronska, atomska ali orientacijska) povzroči premika nosilcev električnih nabojev,
- Med nosilci nabojev se pojavijo sile → deformacija materiala,
- Material se krči ali razteza.

■ Piezoelektrični efekt:

- Polarizacija nastopi zaradi mehanske obremenitve (tlaka, natega).



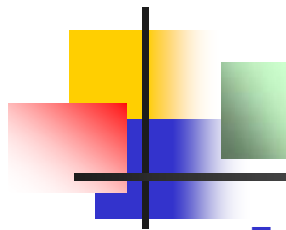
- Naboj se pojavi samo ob spremembi F .
- Piezoelektričnemu efektu vedno pripada inverzni pojav – elektrostrikcija, obratno pa ni nujno.

■ Materiali:

- barijev titanat - dobre piezoelektrične lastnosti, je zelo temperaturno odvisen,
- zmesni kristali svinčev cirkonat - svinčev titanat,
- kremen - slabše piezoelektrične lastnosti, manj temperaturno odvisen,
- poznamo tudi organske polivinil fluoridne (PVDF) folije.

■ Uporaba:

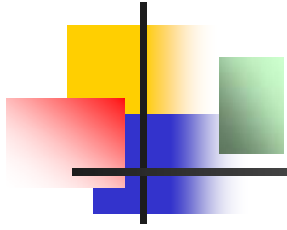
- elektroakustični pretvorniki in senzorji (kristalni mikrofoni, kristalne gramofonske glave, visokotonski zvočniki),
- ultrazvočni oddajniki ali sprejemniki (ultrazvočno čiščenje, ultrazvočna preiskava materiala, ultrazvočna terapija),
- piezoelektrični filtri,
- stabilizatorji frekvence in množilniki frekvence,
- modulatorji,
- aktuatorji (InkJet printerji).



Keramični senzorji

5.4.2.8
241

- **Keramika je mnogostransko uporabna zaradi:**
 - velike sposobnosti spreminjanja fizikalnih in kemičnih lastnosti.
 - prevajanja toka s pomočjo elektronov ali ionov (supraprevodniki)
 - dobrih izolacijskih lastnosti, dielektričnosti so v razponu več velikostnih redov,
 - različne občutljivosti na toploto, mehanske napetosti, na kemikalije in magnetna polja,
 - polikristalna struktura (sintranje), cenen postopek
 - možno dopiranje, podobno kot pri polprevodniški tehniki.
- **Senzorji z elektronsko prevodnostjo:** NTC in PTC polprevodniški elementi, metaloksidni senzorji plinov.
- **Senzorji z ionsko prevodnostjo:** (trdni elektroliti), senzorji plinov.
- **Piroelektrični senzorji:**
 - Piroelektrični efekt: spontana polarizacija je odvisna od temperature, pojav je podoben piezoelektričnemu,
 - So izredno občutljivi na temperaturne spremembe, zaznavajo do $0,001^{\circ}\text{C}$
→ javljalniki gibanja, senzorji alarmnih naprav, infrardeča tehnika,

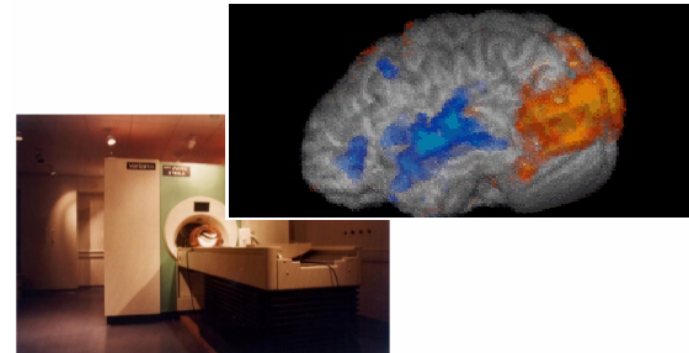
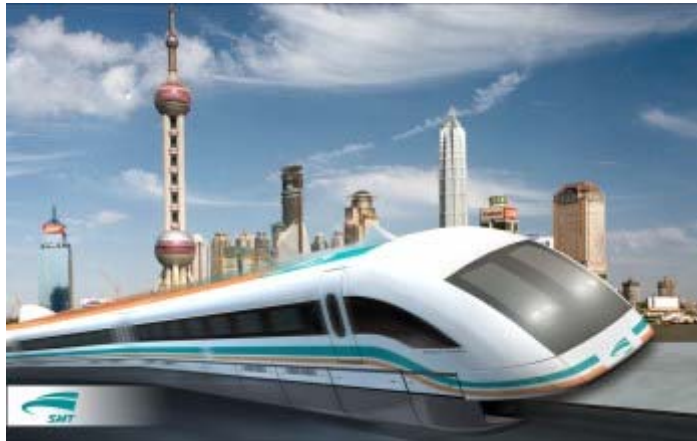


Superprevodna keramika

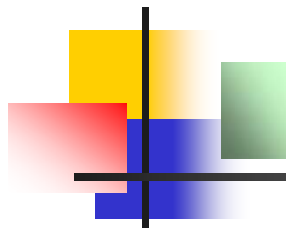
- Meissnerjev efekt (Walter Meissner)



- Magnetno lebdenje (transrapid, maglev, shikansen)



- Magnetna resonančna tomografija



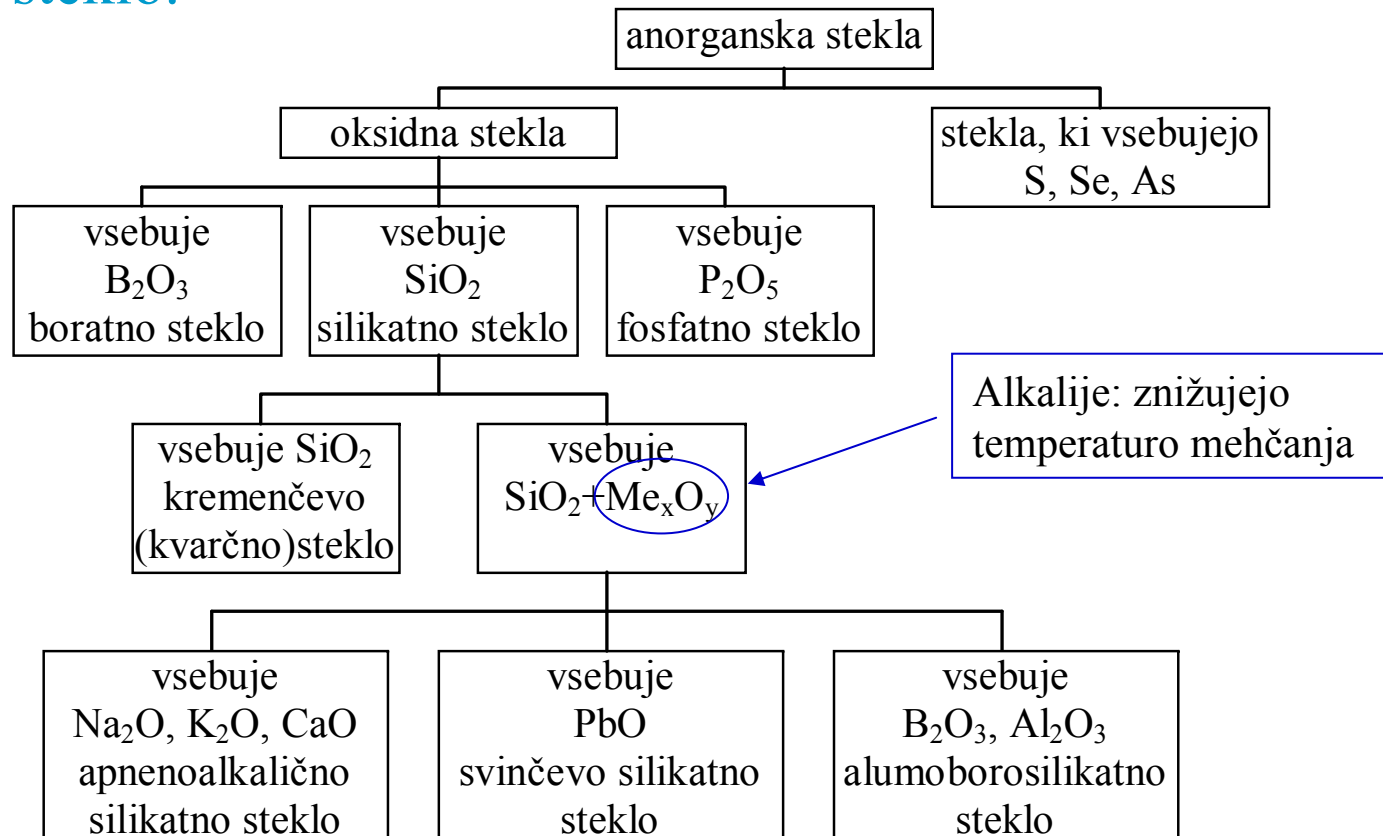
Steklo in stekleni vlaknasti izdelki

5.4.3
243

- Keramične materiale, ki pri strjevanju ohranijo amorfno strukturo imenujemo steklo.
- Amorfna stekla imajo velik razteznostni koeficient ($3 - 9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) → pri lokalnih pregrevanjih počijo.
- Pod posebnimi pogoji lahko izdelamo **stekla s kristalno strukturo**:
 - Zelo mali razteznostni koeficient (npr. kremenovo steklo $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) → mnogo odpornejša na temperaturne spremembe.
 - Takšna stekla so posebna vrsta keramike, čeprav so iz istih komponent kot običajna stekla → **vitrokeramika, steklokeramik, ...**
 - Kristalno steklo ima dobre lastnosti le, če ima fine kristale ($1 \mu\text{m}$).
 - Vrednosti ρ , ε , E_p , $\text{tg}\delta$, presegajo keramiko.
 - Ni porozno, kot so keramike.
 - Uporaba: v izolacijski tehniki, tiskanih vezjih, kondenzatorjih, elektronskih elementih itd. kjer so velike temperaturne in mehanske obremenitve.

Steklo in stekleni vlaknasti izdelki

- Surovine so steklotvorni oksidi (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 ali GeO_2): kremenčevo, boratno, fosfatno ali germanatno-steklo.

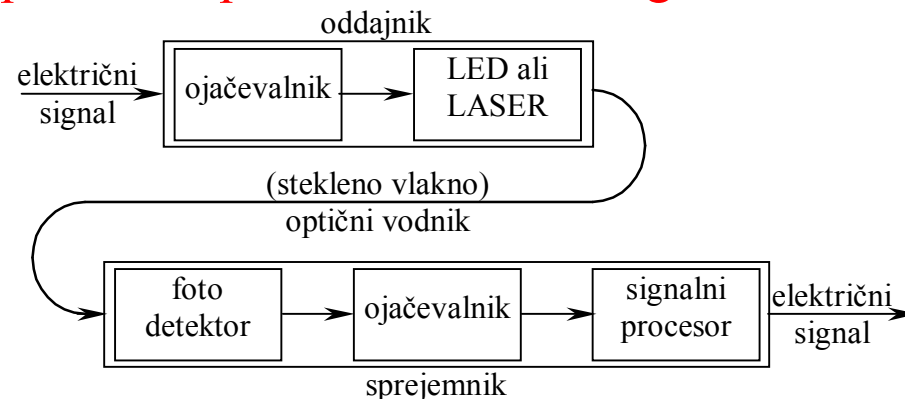


- V elektrotehniki uporabljamo: **boratno-silikatno steklo** brez alkalij, (surovine kremenčev pesek SiO_2 in kalcijev oksid CaO z dodatki boraksa B_2O_3 in aluminijevega oksida Al_2O_3).
- Lastnosti: $\epsilon_r =$ do 6, $\text{tg}\delta =$ do $50 \cdot 10^{-4}$ pri $20\text{ }^\circ\text{C}$ in 1 MHz, $E_p =$ do 50 kV/mm. Temperaturno območje uporabnosti do $250\text{ }^\circ\text{C}$.
- Uporaba: za izdelavo izolatorjev, za kemijske namene, za izdelavo vlaken (debeline od 4 do $13\text{ }\mu\text{m}$) \rightarrow vrvi, trakovi, tkanine, optična vlakna, itd.

- Lastnosti tkanin iz steklenih vlaken
 - fleksibilnost,
 - izredna obstojnost v vlagi,
 - izredna temperaturna obstojnost (razred C) do 250 °C,
 - dobra koherentnost (skladanje) na izolacijske lake.

- Uporaba tkanin iz steklenih vlaken:
 - Izolacija električnih strojev in naprav,
 - Kjer se zahteva visoke temperature in mehanske lastnosti.

- Optični vodniki (vlakna)
 - Imajo izjemno sposobnost vodenja svetlobe → male izgube,
 - Najboljši rezultati: svetloba valovne dolžine okrog μm in premeri vlakna 5 – 50 μm .
 - Uporaba: za vodenje svetlobe v tehniki, medicini, informatiki.
 - Sodobni materiali imajo slabljenje $A \leq 0.2 \text{ dB/km}$ → množična uporaba za prenos svetlobnih signalov.

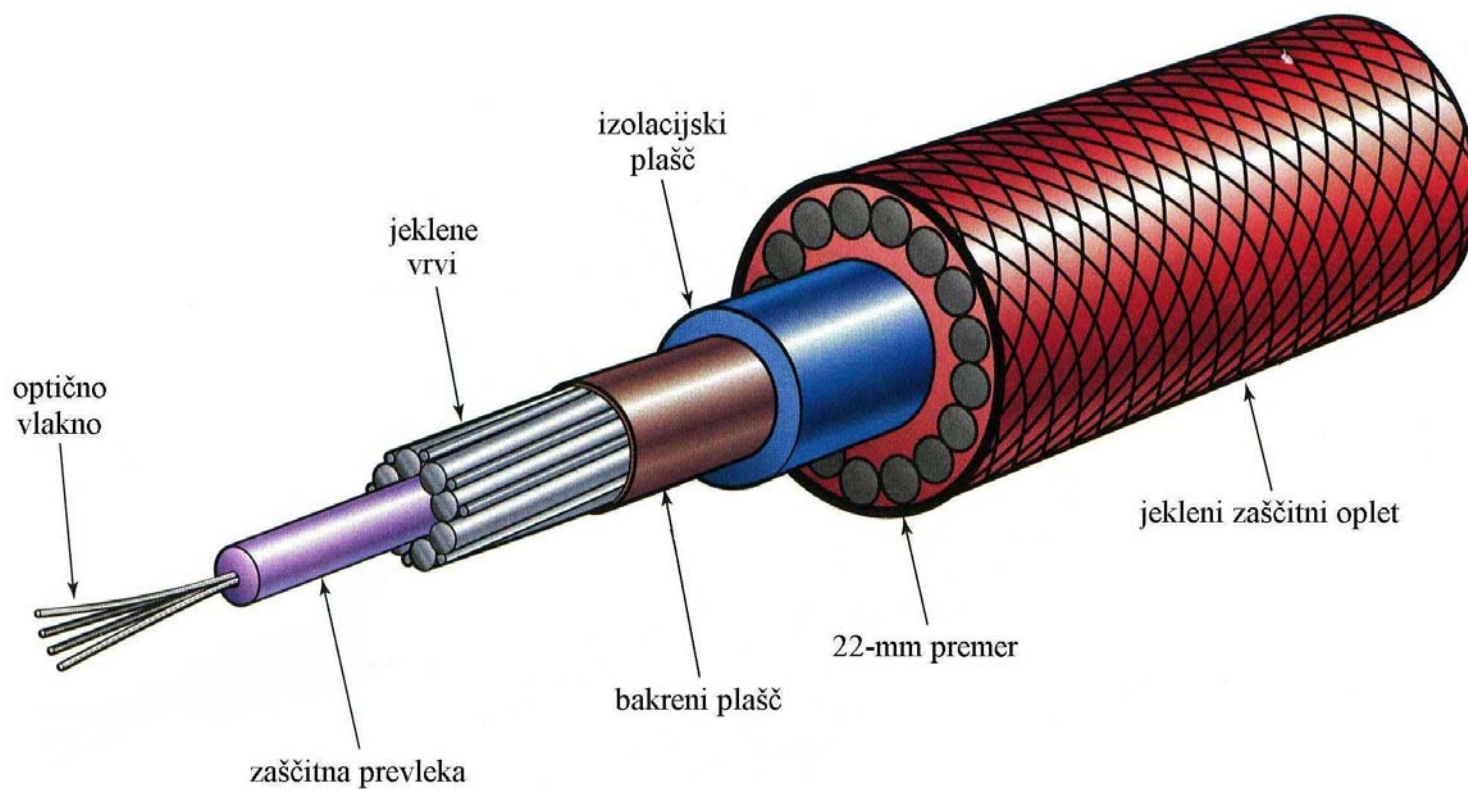


- Optični vodniki (vlakna)
 - Prednosti optičnega prenosa signala pred električnim:
 - mnogo manjše izgube pri prenosu,
 - omogočen prenos na večje razdalje,
 - mnogo večja prenosna zmogljivost,
 - za prenos signala v eno smer potrebno le eno vlakno,
 - preseki vodnikov mnogo tanjši.

 - Vgraditve optičnih vodnikov:
 - podvodni kabli,
 - zemeljski kabli,
 - v daljnovodne vrvi.

 - Pogoste trase polaganja optičnih kablov
 - avtoceste,
 - železniške proge,
 - daljnovodni sistemi.

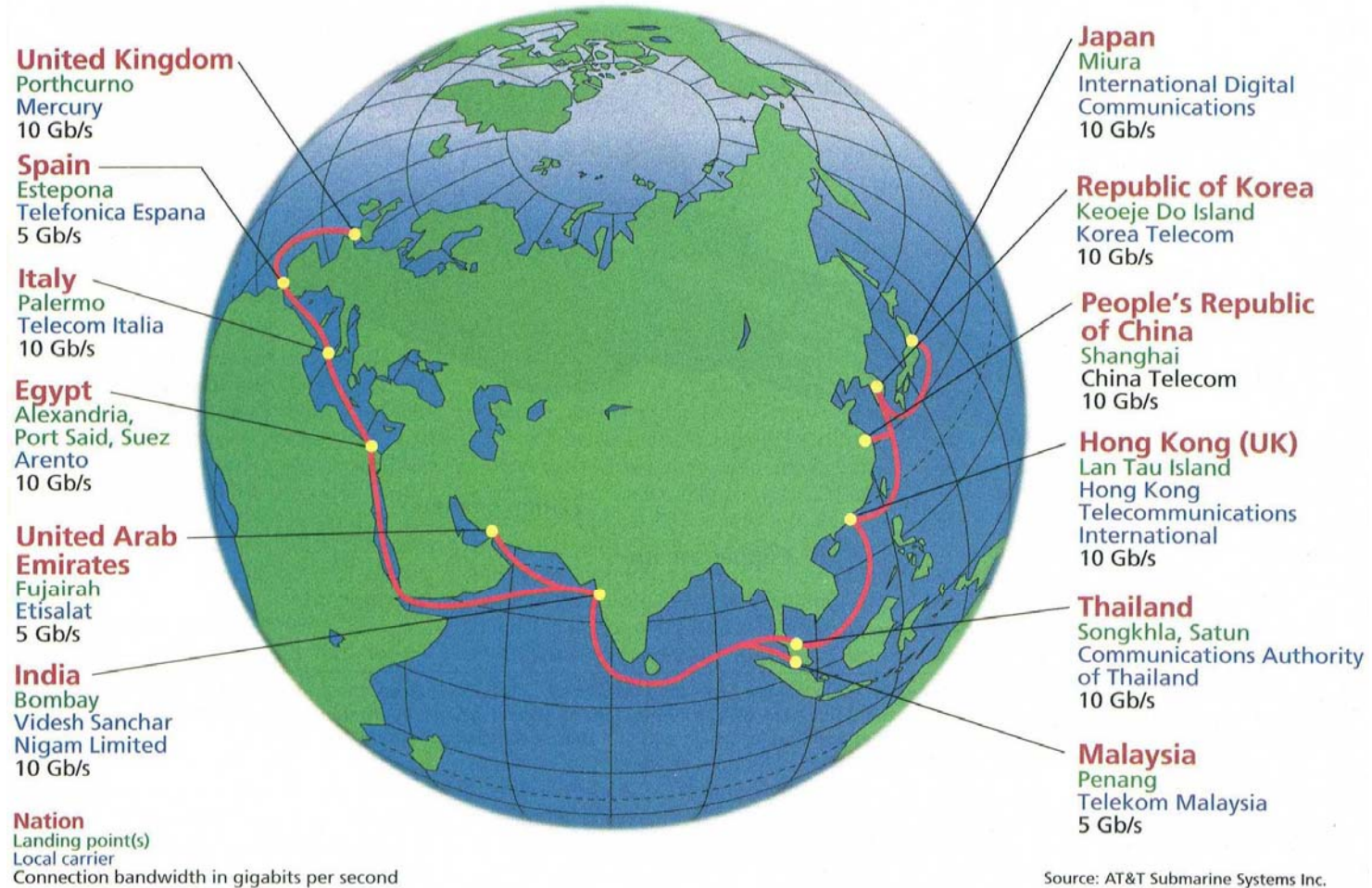
■ Zgradba FLAG kabla



Steklo in stekleni vlaknasti izdelki

- 27.300 km dolga optična povezava Anglije in Japonske

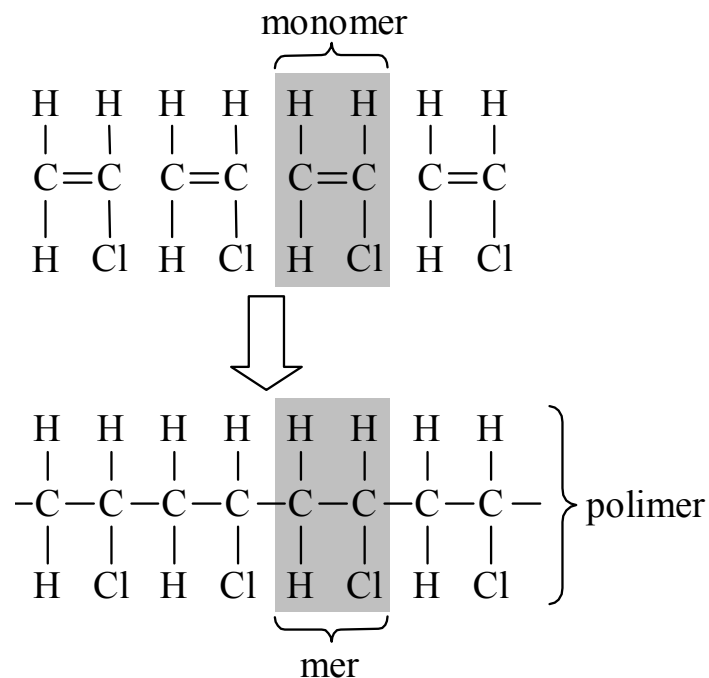
5.4.3
246



Organski izolanti


5.5
247

- Iz skupine organskih izolantov se najpogosteje uporabljajo polimerni materiali.
- **Polimer** je snov zgrajena iz velikih molekul, ki so sestavljene iz ponavljajočih se strukturnih enot - **merov**.



- Meri so v polimerih povezani s kovalentnimi vezmi.
- Osnova pri izdelavi polimera so naravne male samostojne molekule - **monomeri**.
- Materialie s polimernimi molekulami imenujemo **polimerni materiali**.
- Polimerom pogosto dodajamo dodatke (aditive) za izboljšanje lastnosti: trdnost, trdota, barva, negorljivost, obstojnost, ...

- Polimerni materiali so lahko:
 - **Naravni:** makromolekula že obstaja v rastlini:
 - les, bombaž → celuloza (1300 do 5000 molekul glukoze),
 - kavčuk (50 000 do 150 000 molekul izoprena),
 - naravne smole, ...
 - **Naravni modificirani:** modificiramo naravno makromolekulo → boljše fizikalne in tehnološke lastnosti,

Osnovna surovina	Način predelave	Končni proizvod
celuloza	učinkovanje v dušikovi, žvepleni ali očetni kislini 	- vulkan fiber - pergamentni papir - celuloid - nitrocelulozni film - triacetatna folija

- **Sintetični:** makromolekulo naredimo umetno iz
 - nafte
 - zemeljskega plina
 - premoga
 - vegetabilnih surovin
- karbokemična proizvodnja
 → petrokemična proizvodnja
 → biokemična proizvodnja



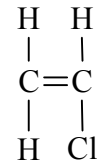
Reakcije za nastanek polimerov

5.5.2
250

- S pomočjo kemijskih reakcij pod določenimi pogoji (temperature, tlak, katalizator, ...) povežemo posamezne molekule.

- Vrste reakcij:

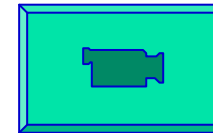
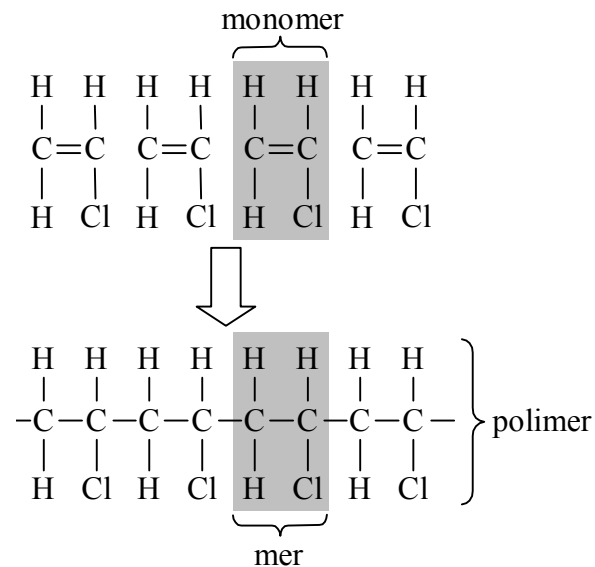
- **verižna polimerizacija** nenasičenih monomerov → **plastomeri** ali **termoplasti**.



- **stopenjska polimerizacija** monomerov, ki vsebujejo funkcionalne skupine → **plastomeri** najpogosteje pa **duromeri**.

Reakcije za nastanek polimerov

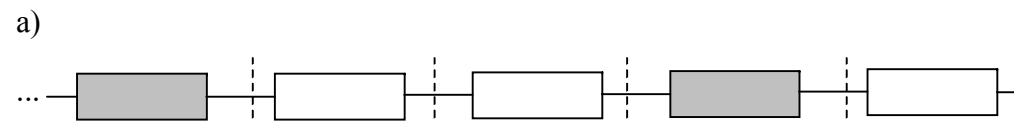
- Verižna polimerizacija:
 - Reakcija kemično aktiviranih monomerov,
 - Poteka hitro,
 - Spajanje z razpadom monomerove dvojne vezi v merovo enojno.
 - Primer verižne polimerizacije vinilklorida v polivinilklorid.



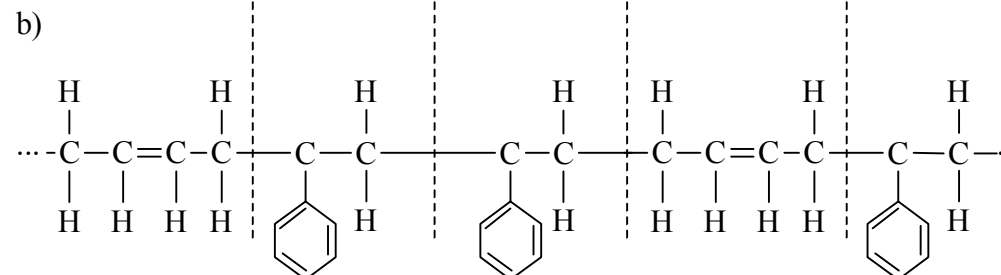
- Drugi primeri verižne polimerizacije:
 - Eten → polietilen
 - Stiren → polistiren

Reakcije za nastanek polimerov

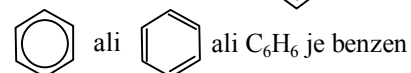
- Polimerizacijo lahko izvedemo z dvema ali več različnimi monomeri,
- Pri tem je cilj izboljšati lastnosti,
- Tako dobljeni material imenujemo **kopolimer in terpolimer**.
- Primeri:
 - etilen-propilen kopolimer,
 - stiren-butadien kopolimer



Shematski prikaz molekule



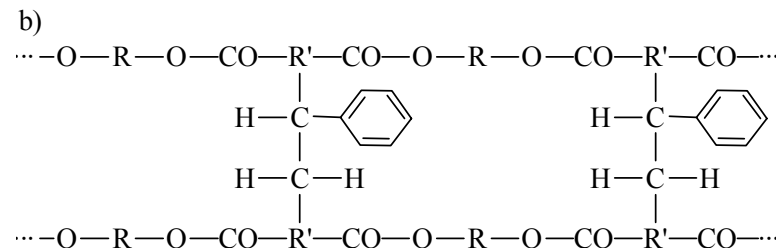
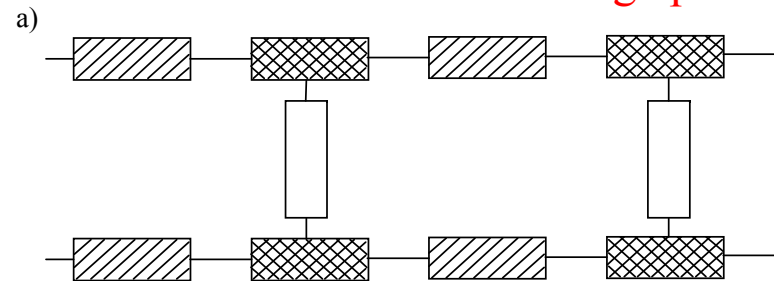
Kemijski zapis molekule

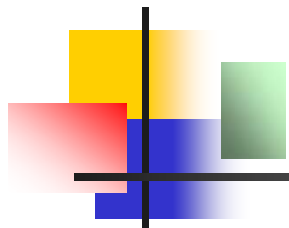


- akrilonitril-butadien-stiren terpolimer.

Reakcije za nastanek polimerov

- Stopenjska polimerizacija:
 - Reakcija funkcionalnih skupin ob izstopanju manjših molekul ali reakcija z odpiranjem obroča ali adicijska reakcija.
 - Do spajanja pride zaradi reaktivne funkcionalne skupine
 - Poteka počasi, pogosto v dveh stopnjah:
 1. izdelava verižnih molekul,
 2. zamrežitev verižnih molekul (izdelava prečnih povezav).
 - Zamrežena molekula nenasičenega poliestra





Lastnosti polimerov

5.5.4
254

- Lastnosti so odvisne od:
 - Kemijske zgradbe monomerov,
 - Načina povezave monomera v makromolekulo,
 - Molske mase in porazdelitve molske mase,
 - Interakcije makromolekul,
 - ...

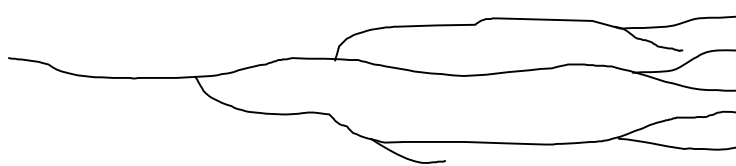
- Stopnja polimerizacije:
 - Minimalna: okoli sto,
 - Maksimalna: od tisoč do sto tisoč

- Delitev polimerov glede na obliko polimernih molekul:
 - linearne,
 - razvejane in
 - zamrežene:
- so taljivi in topni → **plastomeri ali termoplasti**

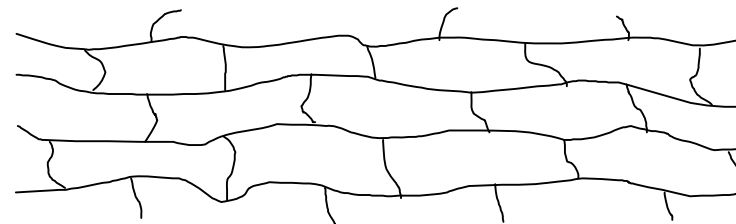
Linearne



Razvejane



Zamrežene



- Zamrežene polimerne molekule:
 - dobimo s prvim segrevanjem:
 - material najprej postane plastičen (stanje A),
 - prostorska zamrežitev makromolekul → ireverzibilna strditev → material je netaljiv in netopen → trajna oblika (stanje B).
 - nadaljnjo segrevanje material razgrajuje (stanje C).
 - imenujemo jih **duromeri** ali **duroplasti** ali **termoreaktivni polimeri**.
 - duromeri so trdi materiali.

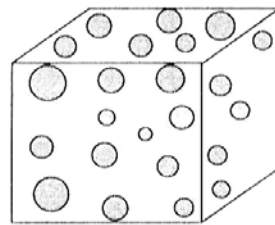
- Delno zamrežene polimerne molekule :
 - deli molekule so klobčičasto zaviti,
 - material je trajno elastičen → **elastomer** ali **elast**,
 - pridobivamo jih z **vulkanizacijo**: žveplo vežemo na dvojne vezi kavčuka.

- Prednosti polimerov:
 - nizka gostota,
 - dobra električne in toplotne izolacijske lastnosti,
 - dobra korozijska obstojnost,
 - dobre tehnološke lastnosti, pomembno za serijsko proizvodnjo,
 - možnost izdelave materialov s posebnimi lastnostmi (električno prevodni, občutljivi na vplive okolja → za senzorje,
 - v večini primerov možnost reciklaže,
 - možnost pestrih dekorativnih učinkov.
- Pomanjkljivosti polimerov:
 - toplotna nestabilnost in v mnogih primerih tudi gorljivost,
 - pogosto slabše mehanske lastnosti od drugih materialov,
 - različna obstojnost proti agresivnim medijem in topilom,
 - oteženo popraviljanje poškodovanih mest in
 - nagnjenje k staranju.

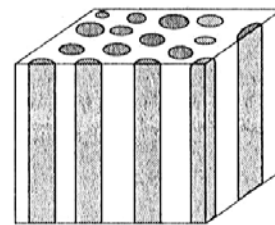
Sestavljeni materiali (kompoziti)

5.7
290

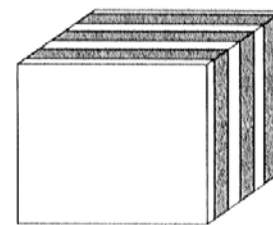
- Sestavljeni materiali ali kompoziti so sestavljeni iz vsaj dveh različnih faz, ki ne ali šibko reagirajo med seboj.
- Sestava:
 - Matica: zvezna po vsem volumnu,
 - Elementi utrjevanja (armatura): prekinjena in razdeljena sestavina (krogle, vlakna, plošče,..)
- Primeri različne razporeditve in oblike druge faze



a)



b)



c)

- Namen izdelave kompozitov:
 - izboljšanje mehanskih lastnosti (posebej kadar gre za veliko razliko med natezno in tlačno trdnostjo),
 - povečanje električne ali toplotne prevodnosti v določeni smeri,
 - zmanjšanje nastankov razpok,
 - povečanje ali zmanjšanje anizotropnih lastnosti,
 - povečanje toplotne obstojnosti,
 - zmanjšanje gorljivosti,
 - znižanje cene in podobno.



KONEC

IZOLANTI IN DIELEKTRIKI