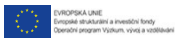


ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239




1



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

8.

**Elektrotechnické materiály
KET/ELTM**

Ing. Robert Vik, Ph.D.



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

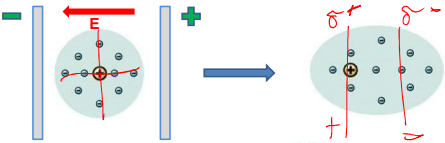
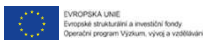
EK 410, rvik@ket.zcu.cz




2

Izolační materiály vs dielektrika

- jako izolační materiály se používají takové látky, které nevedou elektrický proud
- používají se k oddělování míst s různým elektrickým potenciálem
- ideální izolant** - nemá volné nosiče náboje → nevede elektrický proud → nekonečně velký elektrický odpor
- izolanty patří mezi **dielektrika** - látky, které mají schopnost polarizace ve vnějším elektrickém poli
- polarizace** - narušení symetrie rozdělení elektrického náboje v materiálu


3

Polární a nepolární dielektrika

- nesymetrie v rozložení náboje je **přítomna pouze při vložení do elektrického pole** → **nepolární dielektrika**
- nebo je **přítomna trvale** i bez přítomnosti vnějšího elektrického pole → **polární dielektrika**

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

4

Dipólový moment μ

- rozložení náboje** mezi kovalentně vázanými atomy je **dáno rozdílem elektronegativit**
- vektorová veličina **popisující nesymetrii** rozdělení elektrického **náboje** v molekule (vektorový součet, dipólový moment tedy může být nulový i v případě nenulových vazebných dipólů)

$$\vec{\mu}_D = \sum q_i \cdot \vec{r}_i$$

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

5

Dipólový moment μ

Cl₂ (chlor)

CO₂ (oxid uhličitý)
nepolární

NH₃ (amoniak)

H₂O (voda)
polární

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

6

Polární a nepolární dielektrika

- nepolární dielektrika**
 - symetrické částice bez vlastního elektrického náboje
 - náboj vzniká až ve vnějším poli → **indukovaný náboj**

7

Polární a nepolární dielektrika

- polární dielektrika**
 - částice mají nenulový elektrický moment (tzv. parciální náboje)
 - bez přítomnosti vnějšího pole ($E=0$) je orientace náhodná → výsledný moment je nulový
 - při nenulovém poli dochází k jejich orientaci za vzniku vnitřního pole → působí proti směru vnějšího

8

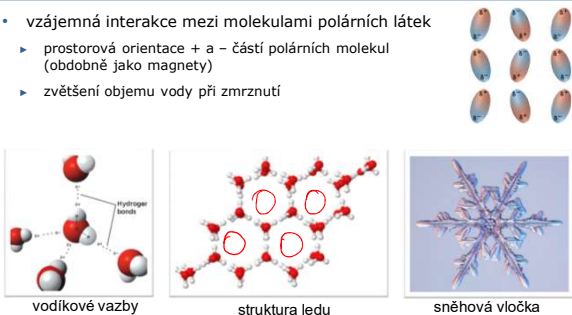
Interakce polárních molekul

- polární molekuly interagují s iontovými látkami
 - dobrá rozpustnost iontových látek ve vodě

9

Interakce polárních molekul

- vzájemná interakce mezi molekulami polárních látek
 - prostorová orientace + a - částí polárních molekul (obdobně jako magnety)
 - zvětšení objemu vody při zmrznutí



vodíkové vazby struktura ledu sněhová vločka

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická

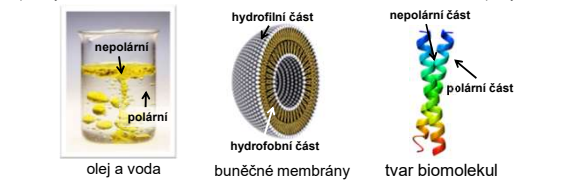
10

Interakce polárních molekul

- hydrofobnost vs hydrofilnost látek
 - polární molekuly a iontové látky vážou přitahují a vážou molekuly vody
 - nepolární látky vodu odpuzují

hydrofilní **hydrofobní**

"přitahují vodu" "odpuzují vodu"



olej a voda buněčné membrány tvar biomolekul

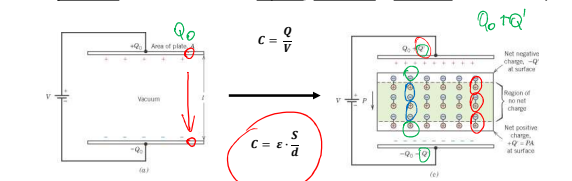
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická

11

Permitivita dielektrika

- s polárností dielektrika souvisí jeho **permitivita ϵ**
- permitivita udává, **kolikrát je schopnost polarizace** daného materiálu **vyšší než** schopnost polarizace **vakua**
 - u nepolárních dielektrik je relativně malá a závisí pouze na teplotě
 - u polárních dielektrik závisí na teplotě, frekvenci a intenzitě elektrického pole



$C = \frac{Q}{V}$

$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická

12

Permitivita dielektrika

- polarizace vytváří vnitřní pole s intenzitou E_p , která míří proti vnějšímu poli E_0 , které polarizaci vyvolalo
- výsledná intenzita pole v dielektriku $E = E_0 - E_p$
- relativní permitivita** dielektrika dána vztahem

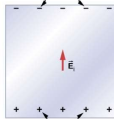
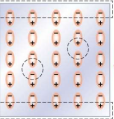
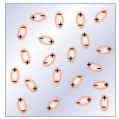
$$\epsilon_r = \frac{E_{ext}}{E_{in}}$$

$$\epsilon_r \geq 1$$

ϵ – absolutní permitivita dielektrika
 ϵ_0 – permitivita vakua ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$



EVROPSKÁ UNIE
 Evropské strukturální a investiční fondy
 Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



13

Permitivita dielektrika

Material	ϵ_r	Material	ϵ_r
Vacuum	1.0000	Dry air	1.0006
Methane	1.7	Chlorine	2.0
Gasoline	2.0	HDPE	2.3
PTFE	2.0	Olive Oil	3.0
PMMA	2.9	PVC	3.1
Quartz	4.7	fused SiO_2	3.8
Pyrex glass	5	Diamond	5.0
NaCl	5.9	MgO	9.6
Ethanol	24	Water	80
SrTiO_3	300	BaTiO_3	1500



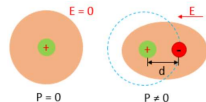
EVROPSKÁ UNIE
 Evropské strukturální a investiční fondy
 Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



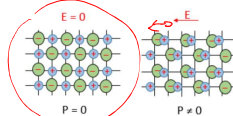
14

Polarizační mechanismy v dielektriku

- elektronová polarizace** – dochází k narušení symetrie atomů (molekul) vlivem vnějšího elektrického pole
 - velmi rychlý, bezetrátový děj, $10^{-16} - 10^{-13} \text{ s}$
 - frekvenční a teplotní nezávislost



- iontová polarizace** – elektrické pole způsobuje posuv kationtů a aniontů v krystalické mřížce opačným směrem
 - bezeztrátová, rychlost $10^{-13} - 10^{-12} \text{ s}$
 - frekvenční a teplotní nezávislost



EVROPSKÁ UNIE
 Evropské strukturální a investiční fondy
 Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

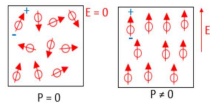


15

Polarizační mechanismy v dielektriku

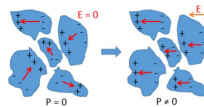
- orientační polarizace** - objevuje se u materiálů, které mají permanentní dipóly. Po jejich vložení do elektrického pole dochází k orientaci dipólů dle směru vnějšího pole

► teplotně a frekvenčně závislý děj



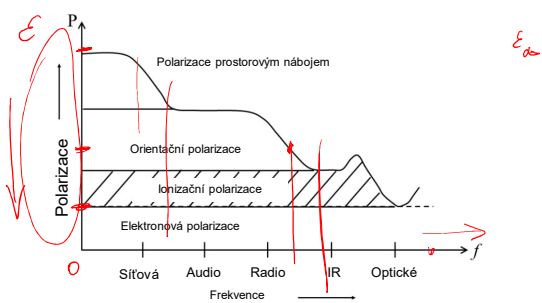
- polarizace prostorovým nábojem** - vyskytuje se v materiálech obsahujících volné nosiče náboje a nehomogenity ve struktuře. V jejich okolí vzniká permanentní polarizace, která se vnějším polem orientuje

► teplotně a frekvenčně závislý děj



16

Polarizační mechanismy v dielektriku



17

Elektrická vodivost izolantů

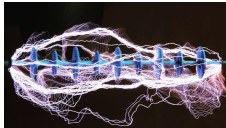
- reálné izolanty vedou elektrický proud
- dle pásové teorie vodivosti mají izolanty velkou šířku zakázaného pásu ($> 3 \text{ eV}$) → pro vznik nosičů nutná vysoká energie
- ve **slabých elektrických polích** se projevuje tzv. **nesamostatná elektrická vodivost** - způsobena hlavně vlivem příměsí a nečistot obsažených v základním izolačním materiálu
- v **silných elektrických polích** pak dochází k **vodivosti samostatné** - vede samotný izolační materiál, ve kterém dochází k ionizaci a uvolnění elektronů v důsledku srážek s neutrálními částicemi (tzv. **nárazová ionizace**)
- slabé vs. silné pole – pro plynné izolanty cca $E > 10^5 \text{ V.m}^{-1}$, kapalně a pevně cca o 1 až 2 řády vyšší

18

Elektrická pevnost izolantů

- volné elektrony se pak mohou pohybovat materiálem → dochází k tzv. **průrazu** dielektrika (dočasný nebo trvalý)
 - ▶ plyny, kapaliny – dočasný jev (**přeskok**)
 - ▶ pevné látky – trvalé poškození
- elektrická intenzita, při které nastane průraz - **elektrická pevnost** dielektrika

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (V \cdot m^{-1})$$



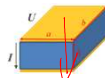
Materiál	E_p (kV·mm ⁻¹)
Kabelový papír	50 – 60
PVC	28 – 50
Polystyren	90 – 120
Polystyren	90 – 120
Porcelán	10 – 30
Kamenina	7 – 27
Transformátorový olej	4 – 30
Vzduch	1 – 3

19

Elektrická vodivost izolantů

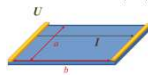
- měřítkem izolačních vlastností materiálu je jejich **rezistivita ρ**
 - ▶ **vnitřní (objemová) rezistivita ρ_v ($\Omega \cdot m$)** – určena proudem tekoucím uvnitř izolantu mezi dvě protilehlými elektrodami

$$\rho_v = \frac{U}{I} \cdot \frac{a \cdot b}{h}$$



- ▶ **povrchová rezistivita ρ_p (Ω)** – určena proudem tekoucím po povrchu izolantu

$$\rho_p = \frac{U}{I} \cdot \frac{a}{b}$$



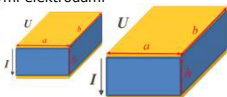
- hodnota ρ_v bývá u izolantů cca v rozmezí 10^6 až $10^{18} \Omega \cdot m$

20

Elektrická vodivost izolantů

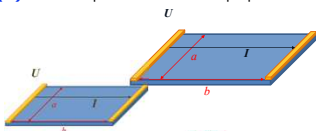
- měřítkem izolačních vlastností materiálu je jejich **rezistivita ρ**
 - ▶ **vnitřní (objemová) rezistivita ρ_v ($\Omega \cdot m$)** – určena proudem tekoucím uvnitř izolantu mezi dvě protilehlými elektrodami

$$\rho_s = \frac{U}{I} \cdot \frac{a \cdot b}{h}$$



- ▶ **povrchová rezistivita ρ_s (Ω)** – určena proudem tekoucím po povrchu izolantu

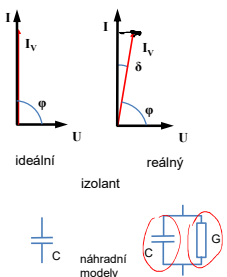
$$\rho_s = \frac{U}{I} \cdot \frac{a}{b}$$



21

Dielektrické ztráty izolantů

- elektrická energie přeměněná na teplo za jednotku času v jednotce objemu
- v ideálním izolantu $\varphi = 90^\circ$
- v reálném izolantu $\varphi < 90^\circ$
- δ – ztrátový úhel
- $\tan \delta$ – **ztrátový činitel**
- způsobeny elektrickou vodivostí izolantu a polarizačními mechanismy
- závislé na frekvenci, intenzitě el. pole, teplotě



22

Tepelné vlastnosti izolantů

- při provozu jsou izolační materiály vystaveny působení teploty
- tepelné namáhání zhoršuje elektrické a mechanické vlastnosti, může narušit strukturu látky, urychluje stárnutí
- většina izolačních materiálů je obecně špatnými tepelnými vodiči
- rychlost šíření tepla z jedné části látky do jiné určena její **tepelnou vodivostí**
- součinitel tepelné vodivosti λ** ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

$$\lambda = \frac{d}{t \Delta T} Q$$

Q je množství tepla, které projde za čas t mezi dvěma plochami S kolmými ke směru tepelného toku ve vzdálenosti d , je-li mezi nimi rozdíl teplot ΔT

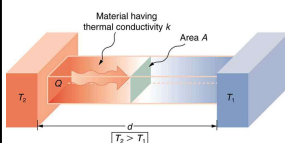
23

Tepelné vlastnosti izolantů

součinitel tepelné vodivosti λ

$$\lambda = \frac{d}{t \Delta T} Q$$

Q je množství tepla, které projde za čas t mezi dvěma plochami S kolmými ke směru tepelného toku ve vzdálenosti d , je-li mezi nimi rozdíl teplot ΔT

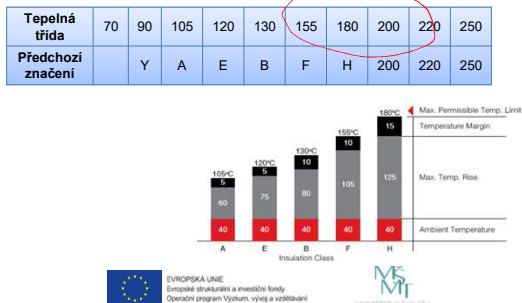


Látka	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	
	při 25 °C	při 20 °C
železo	80,2	73
zlat	317	
vzduch (normální tlak)	0,0262	0,026
voda	0,6062	0,6
stříbro	429	418
sklo	1,35	0,60 – 1,0
polystyren		0,16
olej	0,13	
mosaz	120	
měď	386	395
křemen	7–12	
hliník	237	229
diamant	895–2300	
akrylátový polymer (Plexiglas)		0,17 – 0,20
teflon		0,25

24

Tepelné vlastnosti izolantů

- izolační materiály děleny do **teplotních tříd** – definují maximální teplotu při provozu



25

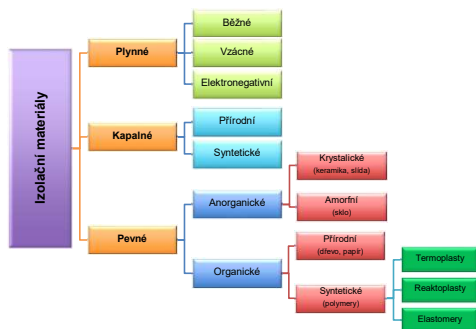
Požadované hodnoty elektrických vlastností izolantů

- rezistivita → co nejvyšší
- relativní permitivita → dle aplikace
elektrická izolace (co nejnižší)
kondenzátorové dielektrikum (co nejvyšší)
- ztrátový činitel → co nejnižší
- elektrická pevnost → co nejvyšší

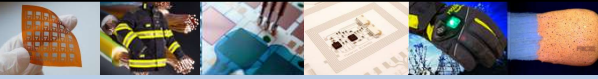


26

Rozdělení elektroizolačních materiálů



27



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI



FAKULTA
STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

28
