FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ústav elektrotechnologie

Elektrotechnické materiály a výrobní procesy I

Neoficiální sbírka příkladů částí dielektrických materiálů a polovodičů

Verze: 0.7 Datum: 12. listopadu 2024

Poznámka: Nejedná sa o oficiálny výukový materiál, iba pomôcku na učenie zostavenú na základe zápiskov z cvičení. Preto neberiem žiadnu zodpovednosť za chyby v tomto dokumente. Oficiálne riešené príklady sú dostupné v skriptách **Elektrotechnické materiály a výrobní procesy 1** z roku **2019**. Príklady sa vzťahujú ku zadaniam z rokov 2023/2024 a 2024/2025, pričom zadania vyzerali byť identické. Všetky práva patria pôvodným autorom výukových materiálov.

Autor: cinanko, Šťur

Vybrané konstanty

c	$2{,}998 \cdot 10^{8}$	$\mathrm{m\,s^{-1}}$	Rychlost světla
h	$6{,}626 \cdot 10^{-34}$	$\mathrm{J\,s}$	Planckova konstanta
k	$1{,}38 \cdot 10^{-23}$	$\mathrm{J\,K^{-1}}$	Boltzmannova konstanta
m_a	$9{,}109 \cdot 10^{-31}$	kg	Hmotnost elektronu
m_p	$1{,}672 \cdot 10^{-27}$	kg	Hmotnost protonu
N_A	$6{,}023 \cdot 10^{-23}$	$\mathrm{mol^{-1}}$	Avogadrova konstanta
n_L	$2{,}688 \cdot 10^{25}$	$\mathrm{m^{-3}}$	Loschmidtovo číslo
q	$-1{,}602 \cdot 10^{-19}$	C	Náboj elektronu
ε_0	$8{,}854 \cdot 10^{-12}$	$\mathrm{F\,m^{-1}}$	Permitivita vakua
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\mathrm{H\,m^{-1}}$	Permeabilita vakua
k	$8{,}617 \cdot 10^{-5}$	$\mathrm{eV\,K^{-1}}$	Redukovaná Boltzmannova konstanta

Vybrané vlastnosti polovodičových materiálů

Platné při teplotě $T = 300\,\mathrm{K}$

Značka	Křemík	Germánium	Vlastnost
n_i	$1{,}45 \cdot 10^{16}\,\mathrm{m^{-3}}$	$2{,}29 \cdot 10^{19}\,\mathrm{m^{-3}}$	Koncentrace nosičů proudu (elektronů a děr) ve vlastním polovodiči
W_g	$1{,}11\,\mathrm{eV}$	$0{,}67\,\mathrm{eV}$	Šířka zakázaného pásu
μ_n	$0{,}135\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$	$0{,}39\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$	Pohyblivost elektronů
μ_p	$0{,}048\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$	$0{,}19\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$	Pohyblivost děr
N_c	$2{,}8 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m^{-3}}$	$1{,}04 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m^{-3}}$	Efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu
N_v	$1{,}04 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m^{-3}}$	$6{,}0 \cdot 10^{24}\,\mathrm{m^{-3}}$	Efektivní hustota stavů ve valenčním pásu

1 Oblast dielektrických materiálů a izolantů

1)

Elektronová polarizovatelnost α_e atomu argonu je $1{,}43 \cdot 10^{-40}$ F m^2. Určete relativní permitivitu argonu při normálních fyzikálních podmínkách.

$\alpha_E = 1{,}43 \cdot 10^{-40}$ F m^2
$\varepsilon_r =?$

Claussius - Mossotiho rovnice (C-M):

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n \cdot \alpha}{3 \cdot \varepsilon_0}$$

Argon = inertní plyn $\Rightarrow \varepsilon_r \approx 1$

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{1 + 2} = \frac{n \cdot \alpha}{3 \cdot \varepsilon_0}$$

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\cancel{3}} = \frac{n \cdot \alpha}{\cancel{3} \cdot \varepsilon_0}$$

$$\varepsilon_r = \frac{n \cdot \alpha}{\varepsilon_0} + 1$$

n = n_L = Loshnidtovo číslo = počet atomů v 1 m^3 **plynu** (pro pevné látky jde o hodnotu o 2 až 3 řády větší)

$$\varepsilon_r = \frac{n_L \cdot \alpha}{\varepsilon_0} + 1 = \frac{2{,}688 \cdot 10^{25} \cdot 1{,}43 \cdot 10^{-40}}{8{,}854 \cdot 10^{-12}} + 1 = 1{,}000434\ [-]$$

Vysvětlivky:

α	=	polarizovatelnost
ε_0	=	permitivita vakua (konstanta)
n	=	počet atomů v 1 m^3 látky

2)

Relativní permitivita ε_{rs} složeného ze dvou vzájemně nereagujících látek o permitivitách ε_{r1} a ε_{r2} se často určuje Lichteneckerovým mocninovým vztahem

$$\varepsilon_{rs}{}^{k} = V_1 \varepsilon_{r1}{}^{k} + V_2 \varepsilon_{r2}{}^{k} \tag{1.1}$$

v němž V_1 a V_2 jsou poměrné objemové podíly obou látek a k je empirická konstanta. Hodnota konstanty k se mění v rozsahu $< -1; +1 >$ podle tvaru a rozložení částic obou látek; při chaotickém uspořádání částic $k \to 0$. Ukažte, že v tomto případě přechází mocninový vztah ve vztah logaritmický:

$$\log \varepsilon_{rs} = V_1 \log \varepsilon_{r1} + V_2 \log \varepsilon_{r2} \tag{1.2}$$

$$\varepsilon_{rs}^{k} = V_1 \cdot \varepsilon_{r1}^{k} + V_2 \cdot \varepsilon_{r2}^{k}$$

$$\alpha^{x} = 1 + \underbrace{\frac{x \cdot \ln a}{1!}}_{\text{malý příspěvek, když } x \to 0} + \overbrace{\frac{x^2 \cdot \ln a^2}{2!}}^{\text{řádově ještě menší}} + \ldots$$

Pokud $x \to 0$:

$$a^{x} \doteq 1 + \frac{x \cdot \ln a}{1}$$

Na základě toho:

$$1 + \frac{k \cdot \ln \varepsilon_{rs}}{1} = V_1 \cdot \left(1 + \frac{k \cdot \ln \varepsilon_{r1}}{1}\right) + V_2 \cdot \left(1 + \frac{k \cdot \ln \varepsilon_{r2}}{1}\right)$$

V_1 a V_2 jsou objemové podíly, dohromady tedy dají 1

$$\cancel{1} + k \cdot \ln \varepsilon_{rs} = \cancel{V_1} + V_1 \cdot k \cdot \ln \varepsilon_{r1} + \cancel{V_2} + V_2 \cdot k \cdot \ln \varepsilon_{r2}$$

k je v každém členu, možno vykrátit

$$\cancel{k} \cdot \ln \varepsilon_{rs} = V_1 \cdot \cancel{k} \cdot \ln \varepsilon_{r1} + V_2 \cdot \cancel{k} \cdot \varepsilon_{r2}$$

$$\ln \varepsilon_{rs} = V_1 \cdot \ln \varepsilon_{r1} + V_2 \cdot \ln \varepsilon_{r2}$$

A jelikož $\ln x = 2{,}3 \cdot \log x$:

$$\cancel{2{,}3} \cdot \log \varepsilon_{rs} = V_1 \cdot \cancel{2{,}3} \cdot \log \varepsilon_{r1} + V_2 \cdot \cancel{2{,}3} \cdot \log \varepsilon_{r2}$$

$$\log \varepsilon_{rs} = V_1 \cdot \log \varepsilon_{r1} + V_2 \cdot \log \varepsilon_{r2}$$

Vysvětlivky:

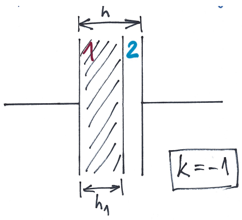
k = empirická konstanta

3)

Mezi elektrodami deskového kondenzátoru o rozměrech 7x12 cm a vzdálenosti elektrod 5 mm je vložena destička z polystyrenu o tloušťce 3 mm. Zbytek prostoru mezi elekrodami je vyplněn vzduchem za normálních atmosférických podmínek. Vypočtěte kapacitu tohoto kondenzátoru, je-li relativní permitivita polystyrenu při teplotě 20 °C rovna 2,3. Jak se změní kapacita kondenzátoru, je-li celý prostor mezi elektrodami vyplněn pěnovým polystyrenem, v němž je objemový podíl polystyrenu a vzduchu stejný jako v prvém případě?

$S = 7 \times 12$ cm = rozměry elektrod kondenzátoru
$h = 5$ mm = vzdálenost elektrod kondenzátoru
$h_1 = 3$ mm = tloušťka polystyrenové destičky
$\varepsilon_{r1} = 2{,}3$ (polystyren)
$\varepsilon_{r2} = 1$ (vzduch)

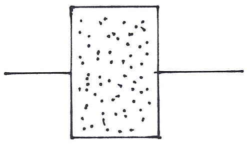
Sériově zapojené kondenzátory (k = -1):



$$\varepsilon_{rs}^{-1} = V_1 \cdot \varepsilon_{r1}^{-1} + V_2 \cdot \varepsilon_{r2}^{-1}$$
$$\frac{1}{\varepsilon_{rs}} = V_1 \cdot \frac{1}{\varepsilon_{r1}} + V_2 \cdot \frac{1}{\varepsilon_{r2}}$$
$$\frac{1}{\varepsilon_{rs}} = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{2{,}3} + \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{1}$$
$$\frac{1}{\varepsilon_{rs}} = 0{,}661$$
$$\varepsilon_{rs} = \frac{1}{\varepsilon_{rs}}$$
$$\varepsilon_{rs} = 1{,}513\ [-]$$

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rs} \cdot \frac{S}{h} = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot 1{,}513 \cdot \frac{0{,}07 \cdot 0{,}12}{5 \cdot 10^{-3}} = 22{,}51 \text{ pF}$$

k = 0 (homogenní směs):



k->0 (logaritmické vztahy)

$$\begin{aligned}
\log(\varepsilon_{rs}) &= V_1 \cdot \log(\varepsilon_{r1}) + V_2 \cdot \log(\varepsilon_{r2}) \\
\log(\varepsilon_{rs}) &= \frac{3}{5} \cdot \log(2{,}3) + \frac{2}{5} \cdot \log(1) \\
log(\varepsilon_{rs}) &= 0{,}217 \\
\varepsilon_{rs} &= 10^{0{,}217} = 1{,}648\ [-]
\end{aligned}$$

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rs} \cdot \frac{S}{h} = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot 1{,}648 \cdot \frac{0{,}07 \cdot 0{,}12}{5 \cdot 10^{-3}} = 24{,}51\ \text{pF}$$

Kapacita se změnila cca o 2 pF (≈ 10 %).

Vysvětlivky:

V_1 a V_2 jsou objemové poměry, jejich hodnota vyplývá ze zadání a nákresů.

4)

Rezistivitu elektroizolačních kapalin ρ_v lze v závislosti na teplotě vyjádřit vztahem

$$\rho = A \cdot \exp^{\frac{B}{T}} \tag{1.3}$$

v němž $A[\Omega\,\mathrm{m}]$ a $B[\mathrm{K}]$ jsou materiálové konstanty; teplota T je udána v K. Kabelový impregnant složený z minerálního oleje s přídavkem 25 % (hmotnostních) rafinované kalafuny má při teplotě 20 °C rezistivitu $2{\cdot}10^{10}\,\Omega\,\mathrm{m}$. Stanovte rezistivitu tohoto impregnantu při teplotách 50 °C a 80 °C, je li součinitel B roven $7 \cdot 10^3$ K.

$\rho = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$
A [$\Omega\,\mathrm{m}$], B [K] = materiálové konstanty (neměnné s teplotou)
B = $7 \cdot 10^3$ K

---

20 °C = 293,15 K:

$$\rho_{20} = 2 \cdot 10^{10}\ \Omega\,\mathrm{m}$$

$$A = \frac{\rho_{20}}{e^{\frac{B}{T}}} = \frac{2 \cdot 10^{10}}{e^{\frac{7\cdot10^3}{293{,}15}}} = 0{,}8525\ \Omega\,\mathrm{m}$$

50 °C = 323,15 K:

$$\rho_{50} = A \cdot e^{\frac{B}{T}} = 0{,}8525 \cdot e^{\frac{7\cdot10^3}{323{,}15}} = 2{,}179 \cdot 10^9\ \Omega\,\mathrm{m}$$

80 °C = 353,15 K:

$$\rho_{80} = A \cdot e^{\frac{B}{T}} = 0{,}8525 \cdot e^{\frac{7\cdot10^3}{353{,}15}} = 0{,}346 \cdot 10^9\ \Omega\,\mathrm{m}$$

Z výpočtu vyplývá, že s rostoucí teplotou klesá rezistivita elektroizolačních materiálů.

5)

Měřením dynamické viskozity transformátorového oleje BTS2 na Höpplerově viskozimetru byly při několika teplotách zjištěny údaje uvedené v tabulce. Stanovte rezistivitu tohoto oleje při teplotách 50 °C a 85 °C, je li hodnota rezistivity při teplotě 20 °C rovna $3 \cdot 10^{11}\,\Omega\,\mathrm{m}$. Při výpočtu předpokládejte, že při změně teploty se nemění koncentrace volných iontů v oleji.

Tabulka:

$\vartheta[°\mathrm{C}]$	20	40	60	80	100
$\eta[\mathrm{N\,s\,m^{-2}}]$	$4{,}35 \cdot 10^{-2}$	$1{,}21 \cdot 10^{-2}$	$3{,}95 \cdot 10^{-3}$	$1{,}46 \cdot 10^{-3}$	$6{,}01 \cdot 10^{-4}$

$\rho_{20} = 3 \cdot 10^{11}\ \Omega\,\mathrm{m}$
$\rho_{50,85} = ?$
$\rho = A \cdot e^{\frac{B}{T}}$
$\eta \cdot \gamma = k$

Neznáme A, B, můžeme vytvořit soustavu se 2 teplotami z tabulky.

$$\frac{\eta}{\rho} = k \Rightarrow \rho = \frac{\eta}{k}$$

$$\frac{\eta_1}{k} = A \cdot e^{\frac{B}{T_1}}$$
$$\frac{\eta_2}{k} = A \cdot e^{\frac{B}{T_2}}$$

$$\ln\left(\frac{\eta_1}{k}\right) = \ln A + \frac{B}{T_1}$$
$$\ln\left(\frac{\eta_2}{k}\right) = -\ln A - \frac{B}{T_2}$$

$$\ln\left(\frac{\frac{\eta_1}{\cancel{k}}}{\frac{\eta_2}{\cancel{k}}}\right) = \frac{B}{T_1} - \frac{B}{T_2}$$
$$\ln\left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right) = B \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$
$$B = \frac{\ln\left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

Dosadíme z tabulky pro 20 °C a 40 °C:

$$B = \frac{\ln\left(\frac{4{,}35\cdot 10^{-2}}{1{,}21\cdot 10^{-2}}\right)}{\left(\frac{1}{293{,}15} - \frac{1}{313{,}15}\right)} = 5873{,}15\ \mathrm{K}$$

Nalezení A:

$$\rho_{20} = A \cdot e^{\frac{B}{T_{20}}}$$
$$3 \cdot 10^{11} = A \cdot e^{\frac{5873{,}15}{293{,}15}}$$
$$A = \frac{3 \cdot 10^{11}}{e^{\frac{5873{,}15}{293{,}15}}} = 597{,}3\ \Omega\,\mathrm{m}$$

Nyní můžeme spočítat rezistivity stejným způsobem jako v příkladu 4.

50 °C = 323,15 K:

$$\rho_{50} = A \cdot e^{\frac{B}{323{,}15}} = 597{,}3 \cdot e^{\frac{5873{,}15}{323{,}15}} = 46{,}704 \cdot 10^{9}\ \Omega\,\mathrm{m}$$

85 °C = 358,15 K:

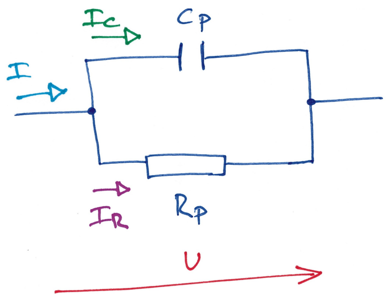
$$\rho_{85} = A \cdot e^{\frac{B}{358{,}15}} = 597{,}3 \cdot e^{\frac{5873{,}15}{358{,}15}} = 7{,}907 \cdot 10^{9}\ \Omega\,\mathrm{m}$$

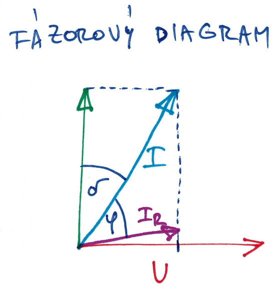
S rostoucí teplotou se tedy snižuje viskozita a zároveň klesá rezistivita.

6)

V obvodu střídavého elektrického proudu je zapojen kondenzátor, jehož dielektrikum vykazuje ztráty. Chování tohoto kondenzátoru lze za předpokladu, že pochody v dielektriku jsou lineární vyšetřit sledováním ekvivalentního dvouprvkového náhradního zapojení kondenzátoru s ideálním, bezztrátovým dielektrikem a odporu představujícího ztráty. Uvažujte, že kondenzátor s ideálním dielektrikem o kapacitě C_p a odpor R_p jsou v náhradním zapojení spojeny paralelně a že je na uvedenou soustavu připojeno napětí U.
Nakreslete pro tento případ fázorový diagram napětí a proudů soustavy a určete ztrátový činitel, celkovou impedanci a celkové ztráty energie v soustavě.

Paralelní náhradní zapojení:





Kondenzátor (C) - nejprve proud, potom napětí
tan (tg) - protilehlá ku přilehlé
X_C - kapacitní reaktance
Z_C - komplexní impedance

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{\cancel{U}}{R_p}}{\frac{\cancel{U}}{\omega\cdot C_p}} = \frac{\frac{1}{\omega\cdot C_p}}{\frac{R_p}{1}} = \frac{1}{R_P\cdot\omega\cdot C_p} = \frac{X_c}{R_p} = \frac{1}{\omega\cdot R_p\cdot C_p}$$

$$\Rightarrow R_p = \frac{1}{\tan\delta\cdot\omega\cdot C_p}$$

$$P_z = U\cdot I_R = U\cdot\frac{U}{R_p} = \frac{U^2}{\underbrace{R_p}_{\frac{1}{\tan\delta\cdot\omega\cdot C_p}}} = U^2\cdot\tan\delta\cdot\omega\cdot C_p$$

$$Z_C = \frac{1}{j\cdot\omega\cdot C_p}\cdot\frac{j}{j} = -\frac{j}{\omega\cdot C_p}$$

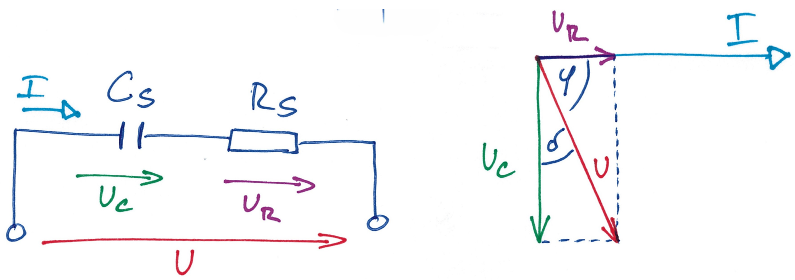
$$Z_p = \frac{Z_C \cdot R_p}{Z_C + R_p} = \frac{-\frac{j \cdot R_p}{\omega \cdot C_p}}{-\frac{j}{\omega \cdot C_p} + R_p} = \frac{\frac{-j \cdot R_p}{\cancel{\omega \cdot C_p}}}{\frac{-j + \omega \cdot C_p \cdot R_p}{\cancel{\omega \cdot C_p}}} = \frac{j \cdot R_p}{j - \omega \cdot C_p \cdot R_p} \cdot \underbrace{\frac{j + \omega \cdot C_p \cdot R_p}{j + \omega \cdot C_p \cdot R_p}}_{\text{Cmpx sdružené číslo}} =$$

$$= \frac{-R_p + j \cdot \omega \cdot C_p \cdot R_p^2}{-1 - \omega^2 \cdot C_p^2 \cdot R_p^2} = \frac{R_p - j \cdot \omega \cdot C_p \cdot R_p^2}{\omega^2 \cdot C_p^2 \cdot R_p^2 + 1}$$

7)

Ve smyslu zadání úlohy č. C-7 uvažujte sériové zapojení odporu R_s a kondenzátoru s ideálním dielektrikem C_s. K soustavě obou prvků nechť je přiloženo napětí U. Nakreslete fázorový diagram napětí a proudů soustavy, určete ztrátový činitel, celkovou impedanci a celkové ztráty energie v soustavě.

Sériové náhradní schéma:



$$\tan\delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{\cancel{I} \cdot R_s}{\cancel{I} \cdot X_C} = \frac{R_s}{\frac{1}{\omega \cdot C_s}} = R_s \cdot \omega \cdot C_s$$

$$Z_s = R_s - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_s}$$

$$P_z = U_R \cdot I_R = (R_s \cdot I_R) \cdot I_R = R_s \cdot I_R^2 = R_s \cdot \frac{U^2}{\left|\widehat{Z}\right|^2} = R_s \cdot \frac{U^2}{\left(\sqrt{R_s^2 + \left(-\frac{1}{\omega \cdot C_s}\right)^2}\right)^2} =$$

$$= R_s \cdot \frac{U^2}{R_s^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_s^2}} = R_s \cdot \frac{U^2}{\frac{\omega^2 \cdot R_s^2 \cdot C_s^2 + 1}{\omega^2 \cdot C_s^2}} = \frac{U^2 \cdot \omega^2 \cdot R_s \cdot C_s^2}{\omega^2 \cdot R_s^2 \cdot C_s^2 + 1}$$

8)

Určete ztrátový činitel vzduchu za normálních fyzikálních podmínek a při kmitočtu 50 Hz, má-li rozhodující vliv na velikost ztrát elektrická vodivost vzduchu. Relativní permitivita vzduchu je za normálních fyzikálních podmínek rovna 1,000 584, rezistivita je za stejných podmínek $10^{16}\,\Omega\,\mathrm{m}$.

$f = 50$ Hz
$\varepsilon_r = 1{,}000584$
$\rho = 10^{16}\,\Omega\,\mathrm{m}$ (rezistivita vzduchu)

$$\tan\delta = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot \frac{\cancel{l}}{\cancel{S}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{\cancel{S}}{\cancel{l}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{16} \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot 1{,}000584} = 3{,}59 \cdot 10^{-8}\ [-]$$

9)

Komplexní permitivita ε^* dielektrika je definována vztahem $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$. V závislosti na kmitočtu lze podle Debyeho vyjádřit komplexní permitivitu rovnicí

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \tag{1.4}$$

v níž ε_s značí relativní (statickou) permitivitu dielektrika určenou při kmitočtu $f \to 0$, ε_∞ relativní (optickou) permitivitu určenou při velmi vysokých kmitočtech; τ je relaxační doba, která je mimo jiné i funkcí teploty. **Vyjděte z obou uvedených vztahů a určete reálnou část ε' a imaginární část ε'' komplexní permitivity**.

Rozdelením rovnice (1.4) na reálnu a imaginárnu zložku dostaneme:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \cdot \frac{1 - j\omega\tau}{1 - j\omega\tau} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} - j\frac{\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2}$$

Porovnaním s rovnicou $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ dostávame:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{Reálna časť}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{Imaginárna časť}$$

Poznámka: Tento príklad **nebol riešený vrámci cvičenia**. Je prevzatý zo skrípt (BPC-EMV skripta 2019, strana 86 č. 10) a takisto ho možno nájsť aj v prednáškach (Prednáška č. 2, strany 14 - 18).

2 Polovodičové materiály

1)

Tři vzorky příměsového polovodiče křemíku N typu jsou dotovány postupně 10^{20}, 10^{22} a 10^{24} atomy fosforu v $1\,\mathrm{m}^3$ polovodiče. Stanovte koncentrace elektronů a děr a konduktivitu těchto polovodičových materiálů při teplotě $20\,°\mathrm{C}$ (stav plné ionizace příměsí). Vypočtěte polohu Fermiho energetické hladiny v jednotlivých vzorcích polovodičů. Polohy Fermiho hladiny v závislosti na měnící se koncentraci donorů graficky znázorněte v pásovém modelu příměsového polovodiče pro $T = 300\,\mathrm{K}$.

Šířka zakázaného pásu u křemíku je $W_g = 1{,}11\,\mathrm{eV}$, efektivní hustota stavů v pásu vodivostním je $N_C = 2{,}8 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m}^{-3}$, efektivní hustota stavů v pásu valenčním je $N_V = 1{,}04 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m}^{-3}$. Pohyblivost elektronů v křemíku je $\mu_n = 0{,}135\,\mathrm{m}^2\,\mathrm{V}^{-1}\,\mathrm{s}^{-1}$ a pohyblivost děr $\mu_n = 0{,}048\,\mathrm{m}^2\,\mathrm{V}^{-1}\,\mathrm{s}^{-1}$. Rovnovážná koncentrace elektronů a děr v křemíku je $n_i = 1{,}45 \cdot 10^{16}\,\mathrm{m}^{-3}$.

Příklad řešte pro případ příměsového polovodiče křemíku P typu dotovaného postupně 10^{19}, 10^{21} a 10^{23} atomu bóru v $1\,\mathrm{m}^3$ polovodiče.

2)

Monokrystal křemíku je dotován atomy fosforu o koncentraci $10^{22}\,\mathrm{m^{-3}}$ a atomy boru o koncentraci $10^{21}\,\mathrm{m^{-3}}$ (kompenzovaný polovodič). Vypočítejte koncentraci elektronů a děr v polovodiči a jeho konduktivitu při $T = 300\,\mathrm{K}$. Uvažujte, že při této teplotě jsou všechny příměsi ionizovány. Rovnovážná koncentrace elektronů a děr v křemíku při této teplotě je $n_i = 1{,}45 \cdot 10^{16}\,\mathrm{m^{-3}}$. Pohyblivost elektronů v křemíku je $\mu_n = 0{,}135\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$ a pohyblivost děr $\mu_n = 0{,}048\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$. Stanovte polohu Fermiho úrovně v tomto polovodiči při teplotě 300 K. Šířka zakázanéhov pásu u křemíku je 1,11 eV; efektivní hustota stavů v pásu vodivostním je $N_C = 2{,}8 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m^{-3}}$, efektivní hustota stavů v pásu valenčním je $N_V = 1{,}04 \cdot 10^{25}\,\mathrm{m^{-3}}$.

3)

Stanovte potenciální rozdíl na PN přechodu křemíkové diody za předpokladu, že oblast přechodu je v tepelné rovnováze; koncentrace donorových příměsí je $3{,}5 \cdot 10^{23}\,\mathrm{m^{-3}}$, koncentrace akceptorových příměsí je $1{,}5 \cdot 10^{18}\,\mathrm{m^{-3}}$. Při výpočtu uvažujte teplotu $300\,\mathrm{K}$.

4)

Přechod mezi oblastí vodivosti typu P a N v křemíkové diodě má tvar kruhové plošky o poloměru 0,15 mm. Vypočtěte celkový proud procházející přechodem při teplotě 300 K, působí-li na přechodu v přímém směru vnější stejnosměrné napětí 0,1 V. Koncentrace donorových příměsí nechť je $5 \cdot 10^{18}\,\mathrm{m^{-3}}$, koncentrace akceptorových příměsí $3 \cdot 10^{20}\,\mathrm{m^{-3}}$. Předpokládejte, že pohyblivost elektronů je $0{,}135\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$, pohyblivost děr je $0{,}048\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$ a doba života je 100 µs pro oba druhy nosičů.
Uvažujte, že vnější napětí působí na PN přechodu v závěrném směru. Jaký bude v tomto případě celkový proud procházející přechodem?

5)

Stanovte šířku PN přechodu v křemíku, je-li koncentrace donorových příměsí $1{,}5 \cdot 10^{20}\,\mathrm{m}^{-3}$ a koncentrace akceptorových příměsí $3{,}5 \cdot 10^{17}\,\mathrm{m}^{-3}$. Relativní permitivita křemíku je 11,7. Jak se změní šířka uvedeného přechodu, působí-li na něj současně vnější stejnosměrné napětí $0{,}2\,\mathrm{V}$

a) v přímém směru
b) v závěrném směru

Úlohu řešte pro $T = 300\,\mathrm{K}$.
Popsaný přechod nechť má tvar kruhové plošky o poloměru $3\,\mathrm{mm}$. Stanovte kapacitu daného přechodu v nezatíženém stavu i v případě, kdy na přechodu působí v přímém nebo v závěrném směru stejnosměrné napětí o hodnotě $0{,}2\,\mathrm{V}$.

6)

Vyjděte z Einsteinova universálního vztahu vyjadřujícího závislost mezi pohyblivostí nosičů nábojů a difúzním koeficientem a odvoďte rozměr difúzního koeficientu.

7)

Stanovte číselnou hodnotu difúzního koeficientu elektronů a děr v monokrystalu křemíku při teplotě 300 K, je-li při téže teplotě pohyblivost elektronů μ_n rovna $0{,}135\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$ a pohyblivost děr μ_p rovna $0{,}048\,\mathrm{m^2\,V^{-1}\,s^{-1}}$.

8)

Z prvního Fickova zákona lze pro hustotu proudu J_{dif} podmíněného difusí nosičů nábojů psát rovnici

$$J_{dif} = \pm q\ D\ grad\ n \tag{2.1}$$

v níž n označuje koncentraci nosičů o náboji q a D je difúzní koeficient.
Jaký je rozměr veličiny D?