

-5cm

Samostatná práce II – BPC-EMV2

Jakub Charvot

3.5. 2023

Úvod

V této práci jsou prezentovány výpočty z oblasti elektronových procesů, iontových procesů, rentgenových procesů, jaderných procesů, laserových procesů a ultraakustických procesů.

1 Elektronové procesy

1.1 Přehled elektronových procesů

Elektronové procesy jsou procesy, při kterých jsou zapojeny elektrony. Tyto procesy mohou být popsány pomocí různých metod, např. Bornovy aproximace nebo Hartreeho-Fockovy metody.

1.2 Příklad 1.1.2 - výpočet

Zadání: *Určete hustotu emisního proudu rozžhaveného wolframového vlákna při teplotě 2 227 °C, působí-li současně elektrické pole o intenzitě $E = 2 \cdot 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$*

Nejprve je potřeba vypočítat emisní proud samotného vlákna, k tomu slouží následující vztah:

$$j_{eT} = AT^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

Po dosazení dostáváme:

$$j_{eT} = 3\,155 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

Takto vypočtená hodnota odpovídá emisnímu proudu samotného wolframového vlákna, bez působení el. pole. Působením napětí můžeme proudovou hustotu výrazně zesílit, platí

zde následující vztah:

$$\begin{aligned}
 j_{eTE} &= AT^2 \exp\left(-\frac{W - \Delta W}{kT}\right) \\
 j_{eTE} &= AT^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right) \\
 j_{eTE} &= j_{eT} \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right) = j_{eT} \cdot \exp\left(\frac{0,44\sqrt{E}}{T}\right) \\
 j_{eTE} &= 3155 \exp\left(\frac{0,44\sqrt{2 \cdot 10^5}}{2500}\right) \\
 j_{eTE} &= 3413 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}
 \end{aligned}$$

1.3 Příklad 1.1.3 - výpočet

Zadání: Určete emisní proud katody vyrobené ve tvaru disku o průměru 10 mm z wolframu, vyhřáté na teplotu 2 227 oC. Urychlovací anoda je umístěna ve vzdálenosti 50 mm od katody a je na ni přivedeno napětí 10 kV

Vyjdete z proudové hustoty vypočtené v předchozím příkladu, pro stanovení proudu stačí stanovit plochu katody a dosadit do obecně známého vztahu:

$$\begin{aligned}
 I &= j_{eTE}S = j_{eTE} \frac{\pi d^2}{4} \\
 I &= j_{eTE}S = 3413 \frac{\pi (10 \cdot 10^{-3})^2}{4} \\
 I &= 0,268 \text{ A}
 \end{aligned}$$

2 Iontové procesy

2.1 Přehled iontových procesů

Iontové procesy jsou procesy, při kterých jsou zapojeny ionty. Tyto procesy mohou být popsány pomocí různých metod, např. Bornovy aproximace nebo Hartreeho-Fockovy metody.

2.2 Příklad 1.2.1

Zadání: Srovnajte základní vlastnosti elektronů a iontů.

Elektrony mají vždy záporný náboj a jsou obecně podstatně lehčí a menší než ionty. Díky své nízké hmotnosti se mohou pohybovat velmi vysokými rychlostmi blízcími se rychlostí světla.

Ionty mohou mít kladný i záporný náboj a jsou větší a těžší. Oproti elektronům mohou také tvořit chemické reakce (jelikož se jedná o celé ionizované atomy nebo molekuly). Lze je použít například i pro depozici tenkých vrstev.

2.3 Příklad 1.2.2 - výpočet

Zadání: Stanovte maximální koncentraci implantovaných iontů bóru do monokrystalu křemíku ve vzdálenosti středního doletu iontů R_p od povrchu destičky a koncentraci iontů ve vzdálenosti $R_p \pm \Delta R_p$ a na povrchu monokrystalu. ΔR_p je střední kvadratická odchylka. Zjištěný koncentrační profil naznačte graficky. Celková dávka $Q = 1018 \text{ m}^{-2}$ při energii iontů 100 keV

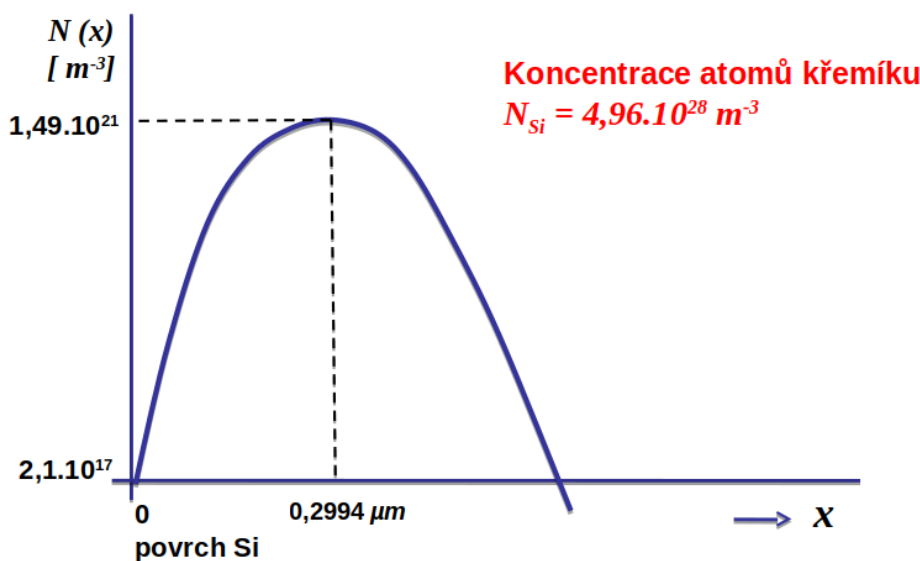
Pro implantaci bóru do křemíku při energii iontů 100 keV platí:

$$R_p = 0,2994 \mu\text{m} \text{ a } \Delta R_p = 0,0710 \mu\text{m}$$

Pro stanovení maximální koncentrace vyjdeme z následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} N_{max} &= \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta R_p}} \\ N_{max} &= \frac{10 \cdot 10^{18}}{\sqrt{2\pi 0,0710 \cdot 10^{-6}}} \\ N_{max} &= 1,49 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \end{aligned}$$

Jak by vypadal koncentrační profil v závislosti na vzdálenosti od povrchu můžeme vidět na obrázku 1



Obrázek 1: Závislost koncentrace dopantů na hloubce resp. vzdálenosti od povrchu.

3 Rentgenové procesy

3.1 Přehled rentgenových procesů

Rentgenové procesy jsou procesy, při kterých jsou zapojeny rentgenové záření. Tyto procesy mohou být popsány pomocí různých metod, např. Bornovy aproximace nebo Hartreeho-Fockovy metody.

3.2 Příklad 2.1.1 - výpočet

Zadání: Stanovte nejkratší vlnovou délku rentgenového záření vzniklého po dopadu svazku elektronů na kov. Urychlovací napětí $U = 2 \text{ kV}$

Nejkratší vlnovou délku bude mít záření s nejvyšší energií, musíme tedy stanovit maximální energii dopadajících elektronů. Ty jsou urychlovány napětím U , bude to tedy vypadat takto:

$$\begin{aligned}\lambda_{min} &= \frac{hc}{E} = \frac{hc}{qU} \\ \lambda_{min} &= \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^3} \\ \lambda_{min} &= 0,619 \text{ nm}\end{aligned}$$

3.3 Příklad 2.1.2 - výpočet

Zadání: Stanovte vlnovou délku rentgenového záření pro kterou dosáhne intenzita záření maxima. Urychlovací napětí $U = 2 \text{ kV}$

Ze spektrální charakteristiky vyzářeného rtg. záření bylo empiricky zjištěno, že maximální intenzita záření odpovídá frekvenci, při které má záření energii přibližně 0,6 maximální hodnoty. Upravíme tedy výpočet:

$$\begin{aligned}\lambda_{I_{max}} &= \frac{hc}{0,6E} = \frac{hc}{0,6qU} \\ \lambda_{I_{max}} &= \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{0,61,602 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^3} \\ \lambda_{I_{max}} &= 1,032 \text{ nm}\end{aligned}$$

4 Jaderné procesy

4.1 Přehled jaderných procesů

Jaderné procesy jsou procesy, při kterých jsou zapojena jádra atomů. Tyto procesy mohou být popsány pomocí různých metod, např. Bornovy aproximace nebo Hartreeho-Fockovy metody.

4.2 Příklad 2.2.1 - výpočet

Zadání: Stanovte rychlost s jakou se pohybují tzv. tepelné neutrony při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Vyjdeme zde z kinetické energie neutronu, ta je rovna jeho energii tepelné:

$$E = \frac{1}{2}m_nv_n^2 = kT$$

Z této rovnosti vyjádříme rychlost neutronu v závislosti na termodynamické teplotě:

$$v_n = \sqrt{\frac{2kT}{m_n}}$$

$$v_n = \sqrt{\frac{21,38 \cdot 10^{-23}(25 + 273,15)}{1,674 \cdot 10^{-27}}}$$

$$v_n = 2\,216 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.3 Příklad 2.2.7 - výpočet

Zadání: Stanovte kolikrát se zmenší tok tepelných neutronů při průchodu destičkou z kadmia a hliníku o tloušťce 1 mm. Účinný průřez pro kadmium $\sigma_{Cd} = 2\,500 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ a pro hliník $\sigma_{Al} = 0,21 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$

Pro vypočtení tohoto příkladu je potřeba stanovit absorpční koeficient obou materiálů:

$$\alpha = n\sigma$$

$$\alpha_{Cd} = n_{Cd}\sigma_{Cd} = 4,6 \cdot 10^{28} \cdot 2\,500 \cdot 10^{-28} = 11\,500 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha_{Al} = n_{Al}\sigma_{Al} = 6,02 \cdot 10^{28} \cdot 0,21 \cdot 10^{-28} = 1,26 \text{ m}^{-1}$$

Následně využijeme vztah pro stanovení toku neutronů po průchodu vrstvou materiálu tlustou x m:

$$\varphi(x) = \varphi_0 \cdot \exp(-\alpha x)$$

$$\frac{\varphi_0}{\varphi(x)} = \frac{1}{\exp(-\alpha x)}$$

Zlomek na posledním řádku přímo odpovídá na naši otázku "kolikrát se zmenší?". Po dosazení hodnot pro oba materiály získáme následující hodnoty:

- Po průchodu kadmíem se tok zmenší 99 009 krát.
- Po průchodu hliníkem pouze 1,002 krát.

5 Laserové procesy

5.1 Přehled laserových procesů

Laserové procesy jsou procesy, při kterých jsou zapojeny lasery. Tyto procesy mohou být popsány pomocí různých metod, např. Bornovy aproximace nebo Hartreeho-Fockovy metody.

5.2 Příklad 3.1.1 - výpočet

Zadání: Yttrium-Aluminium-Granát laser dotovaný neodymem, YAG:Nd³⁺, má rozdíl energií mezi horní a spodní laserovou hladinou 1,17 eV. Určete vlnovou délku příslušného laserového záření a stanovte jaké oblasti spektra odpovídá.

Energie vyzářeného fotonu je přímo svázaná s vlnovou délkou takového záření:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{hc}{\Delta E} \\ \lambda &= \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{1,17 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} \\ \lambda &= 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}\end{aligned}$$

Tato vlnová délka odpovídá infračervené oblasti elektromagnetického spektra.

5.3 Příklad 3.1.4 - výpočet

Zadání: Laserový svazek o průměru $d = 0,1 \text{ mm}$ dopadl kolmo na destičku z křemíku. Výkon přenášený ve svazku je $P = 10 \text{ kW}$. Stanovte plošnou hustotu výkonu laserového záření po průchodu destičkou o tloušťce $x = 2 \text{ mm}$, použijeme-li záření o vlnové délce $\lambda = 1,06 \text{ }\mu\text{m}$, součinitel reflexe uvažujme $R = 0,28$ a absorpční součinitel $\alpha(\lambda) = 5 \text{ cm}^{-1}$. Rozhodněte, zda na dané vlnové délce lze křemík použít pro optické systémy

Zde se kombinují dva jevy, nejprve se část intenzity paprsku odrazí zpět a následně je část pohlcena materiálem. Pro stanovení hustoty výkonu po průchodu systémem musíme zohlednit oba jevy.

Plošná hustota výkonu na začátku:

$$N_{S_0} = \frac{P_0}{S} = \frac{4P_0}{\pi d^2} = 1,27 \cdot 10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Odečtení odraženého výkonu:

$$N'_{S_0} = N_{S_0}(1 - R) = 9,144 \cdot 10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Odečtení absorbovaného výkonu:

$$\begin{aligned}N_S &= N'_{S_0} \cdot \exp(-\alpha(\lambda)x) \\ N_S &= 9,144 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-5 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) \\ N_S &= 3,36 \cdot 10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}\end{aligned}$$

6 Ultraakustické procesy

6.1 Přehled ultraakustických procesů

Ultraakustické procesy jsou procesy, při kterých jsou zapojeny zvukové vlny. Tyto procesy mohou být popsány pomocí různých metod, např. Bornovy aproximace nebo Hartreeho-Fockovy metody.

6.2 Příklad 3.2.4 - výpočet

Zadání: Jak velký výkon bude předán destičce o ploše 1 cm^2 ponořené ve vodě, bude-li amplituda kmitů $Y = 10^{-6} \text{ m}$ při kmitočtech 20 kHz a 1 MHz , při kolmém dopadu a úplné absorpci vlnění?

Výkon akustických vln závisí na prostředí, kde vlna působí (to určuje rychlost šíření vlnění) a také jeho amplituda. Výkon označíme P a vyjdeme z následujícího vztahu:

$$P = \frac{1}{2} \omega^2 Y^2 \rho v S$$

Dosazení pro 20 kHz:

$$P = \frac{1}{2} (2\pi \cdot 20 \cdot 10^3)^2 (10^{-6})^2 1\,000 \cdot 1\,483 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$$

$$P = 1,17 \text{ W}$$

Dosazení pro 1 MHz:

$$P = \frac{1}{2} (2\pi \cdot 1 \cdot 10^6)^2 (10^{-6})^2 1\,000 \cdot 1\,483 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$$

$$P = 2,926 \text{ kW}$$

6.3 Příklad 3.2.7 - výpočet

Zadání: *Vypočtete jak velká část intenzity dopadajícího ultrazvukového vlnění projde do oceli a jak velká část se odrazí při kolmém dopadu akustické vlny na rozhraní voda – ocel, resp. vzduch – ocel*

Pro rozhraní libovolných dvou prostředí lze stanovit součinitel odrazu, který udává, jak velká část intenzity vlnění se odrazí zpět, zbytek naopak projde. Tento součinitel závisí na akustickém vlnovém odporu obou prostředí.

Výpočet akustického vlnového odporu:

$$Z_a = \rho v$$

Vzduch:

$$Z_{vz} = \rho_{vz} v_{vz}$$

$$Z_{vz} = 1,276 \cdot 332$$

$$Z_{vz} = 423,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Voda:

$$Z_{vo} = \rho_{vo} v_{vo}$$

$$Z_{vo} = 1\,000 \cdot 1\,483$$

$$Z_{vo} = 1,483 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ocel:

$$Z_{oc} = \rho_{oc} v_{oc}$$

$$Z_{oc} = 7\,800 \cdot 6\,000$$

$$Z_{oc} = 4,68 \cdot 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Koeficienty odrazu:

$$R_{vo-oc} = \left(\frac{Z_{vo} - Z_{oc}}{Z_{vo} + Z_{oc}} \right)^2$$

$$R_{vo-oc} = \left(\frac{1,483 \cdot 10^6 - 4,68 \cdot 10^7}{1,483 \cdot 10^6 + 4,68 \cdot 10^7} \right)^2$$

$$R_{vo-oc} = 0,881 = 88,1 \%$$

Na rozhraní voda–ocel se odrazí 88,1 % intenzity vlnění, zbylých 11,9 % projde dále.

$$R_{vo-oc} = \left(\frac{Z_{vz} - Z_{oc}}{Z_{vz} + Z_{oc}} \right)^2$$

$$R_{vo-oc} = \left(\frac{423,6 - 4,68 \cdot 10^7}{423,6 + 4,68 \cdot 10^7} \right)^2$$

$$R_{vo-oc} = 1 = 100 \%$$

Na rozhraní vzduch–ocel se odrazí téměř 100 % intenzity vlnění.

Závěr

V této práci byly prezentovány výpočty z oblasti elektronových procesů, iontových procesů, rentgenových procesů, jaderných procesů, laserových procesů a ultraakustických procesů. Pro každou oblast byly uvedeny příklady a provedeny výpočty s použitím různých metod. Výsledky těchto výpočtů byly uvedeny v příslušných sekcích.

Výpočty byly provedeny s ohledem na principy dané oblasti a s použitím vhodných metod. Výsledky ukázaly, že metoda použitá k výpočtu může mít významný vliv na výsledky a jejich správnost.

Tato práce by mohla být rozšířena o další příklady a oblasti, a tím poskytnout více informací o různých procesech. Zároveň by bylo možné věnovat se více srovnání různých metod a zhodnocení, která metoda je pro danou oblast nejvhodnější.