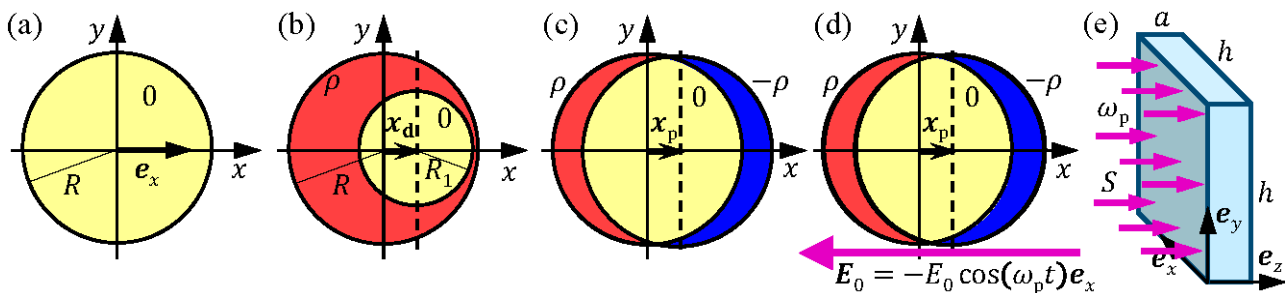


Úvod

V tejto úlohe sa budete zaoberať účinným procesom výroby pary, ktorý bol demonštrovaný. Vodný roztok sférických strieborných nanočastíc (iba 10^{13} častíc na liter) je osvetlený zaostreným svetelným zväzkom. Časť svetla je absorbovaná nanočasticami, ktoré sú tak zahriate a lokálne generujú paru vo svojom okolí bez toho, aby zahrievali celý objem roztoku. Para sa z roztoku uvoľňuje formou unikajúcich bublín. Zatiaľ nie sú známe všetky detaily tohto procesu, ale vie sa, že podstatou je absorpcia svetla prostredníctvom tzv. elektrónových kolektívnych oscilácií kovových nanočastíc. Zariadenie je známe ako plazmónový generátor pary.



Obrázok 2.1 (a) Sférická elektricky neutrálna nanočastica s polomerom R umiestnená v začiatku súradnicového systému. (b) Guľa s homogénnou kladnou hustotou náboja ρ (červená) obsahujúca malú neutrálnu sférickú oblasť (0, žltá) s polomerom R_1 a stredom posunutým o $\mathbf{x}_d = x_d \mathbf{e}_x$. (c) Guľa s kladnou hustotou náboja ρ strieborných iónov nanočastice so stredom v začiatku súradnicovej sústavy; stred sférickej oblasti so záporným nábojom s hustotou $-\rho$ (modrá) elektrónového mraku je posunutá o \mathbf{x}_p , kde $x_p \ll R$. (d) Vonkajšie elektrické pole $\mathbf{E}_0 = -E_0 \mathbf{e}_x$. Pri časovo závislom \mathbf{E}_0 sa elektrónový mrak pohybuje rýchlosťou $\mathbf{v} = d\mathbf{x}_p/dt$. (e) Pravouhlá nádoba ($h \times h \times a$) obsahujúca vodný roztok nanočastíc osvetlená monochromatickým svetlom s uhlovou frekvenciou ω_p a intenzitou S šíriacim sa pozdĺž osi z .

Jednotlivá sférická strieborná nanočastica

V celej tejto úlohe uvažujeme sférickú striebornú nanočasticu s polomerom $R = 10,0$ nm a stredom umiestneným v začiatku súradnicového systému, obr. 2.1 (a). Všetky pohyby, sily a silové polia sú rovnobežné s vodorovnou osou x (s jednotkovým vektorom \mathbf{e}_x). Nanočastica obsahuje voľné (vodivostné) elektróny, ktoré sa pohybujú v celom objeme nanočastice bez toho, aby boli viazané na niektorý jednotlivý atóm striebra. Každý atóm striebra predstavuje kladný ión, ktorý prispieva jedným voľným elektrónom.

2.1	Určte nasledujúce hodnoty veličín: Objem V a hmotnosť M nanočastice, počet N a hustotu náboja ρ strieborných iónov v častici a pre voľné elektróny častice ich koncentráciu n , celkový náboj Q a celkovú hmotnosť m_0 .	0.7
-----	---	-----

Elektrické pole v neutrálnej oblasti vnútri nabitej gule

Vo zvyšku úlohy predpokladajte relatívnu permitivitu všetkých materiálov $\epsilon_r = 1$. Vo vnútri nabitej gule s homogénnou hustotou náboja ρ a polomerom R sa vytvorí malá sférická neutrálna oblasť s polomerom R_1 pridaním náboja s opačnou hustotou $-\rho$ so stredom posunutým o $\mathbf{x}_d = x_d \mathbf{e}_x$ zo stredu gule s polomerom R , obr. 2.1 (b).

2.2	Ukážte, že elektrické pole v neutrálnej oblasti je homogénne s intenzitou $\mathbf{E} = A (\rho/\epsilon_0) \mathbf{x}_d$, a určte faktor A .	1.2
-----	--	-----

Vratná sila na vychýlený elektrónový oblak

V nasledujúcej časti študujeme kolektívne správanie sa voľných elektrónov, a teda elektróny modelujeme ako jeden záporne nabitý sférický mrak s hustotou náboja $-\rho$ so súradnicou stredu \mathbf{x}_p , ktorý sa môže pohybovať pozdĺž osi x voči stredu kladne nabitej gule (strieborných iónov) so stredom fixovaným v začiatku súradnicovej sústavy, obr. 2.1 (c). Predpokladajte, že vonkajšia sila \mathbf{F}_{ext} vychýli elektrónový mrak do novej rovnovážnej polohy $\mathbf{x}_p = x_p \mathbf{e}_x$, kde $|x_p| \ll R$. Okrem tenkých nabitých koncov nanočastice zostáva väčšina vnútorného objemu neutrálna.

2.3	Pomocou x_p a n vyjadrite nasledujúce dve veličiny: vratnú silu \mathbf{F} , ktorá pôsobí na elektrónový mrak, a prácu W_{el} , ktorá sa vykoná pri vychýlení elektrónového mraku.	1.0
-----	---	-----

Gul'ová strieborná nanočastica vo vonkajšom konštantnom elektrickom poli

Nanočastica je umiestnená vo vákuu a vystavená účinku vonkajšej sily \mathbf{F}_{ext} vyvolanej statickým homogénnym elektrickým poľom $\mathbf{E}_0 = -E_0 \mathbf{e}_x$, ktoré posunie elektrónový mrak o veľmi malú vzdialenosť $|x_p|$, kde $|x_p| \ll R$.

2.4	Vyjadrite posunutie x_p elektrónového mraku pomocou E_0 a n a určte náboj $-\Delta Q$ elektrónov, ktorý pritom prejde rovinou yz prechádzajúcou stredom nanočastice, pomocou n , R a x_p .	0.6
-----	--	-----

Ekvivalentná kapacita a indukčnosť striebornej nanočastice

Pre prípady konštantného i časovo premenného poľa \mathbf{E}_0 modelujeme nanočasticu ako ekvivalentný elektrický obvod. Ekvivalentnú kapacitu získame porovnaním práce W_{el} vykonanej pri oddelení nábojov ΔQ s energiou kapacitora nabitého na náboj $\pm \Delta Q$. Oddelenie nábojov vyvolá určité ekvivalentné napätie V_0 na ekvivalentnom kapacitore.

2.5a	Vyjadrite ekvivalentnú kapacitu C sústavy pomocou ϵ_0 a R a určte jej hodnotu.	0.7
2.5b	Pre túto kapacitu vyjadrite pomocou E_0 a R ekvivalentné napätie V_0 , ktoré pri pripojení k ekvivalentnému kapacitoru nabije kapacitor na náboj ΔQ .	0.4

V prípade časovo premenného poľa \mathbf{E}_0 sa elektrónový mrak pohybuje rýchlosťou $\mathbf{v} = v \mathbf{e}_x$, obr. 2.1 (d). Má kinetickú energiu W_{kin} a vytvára prúd I prechádzajúci rovinou yz . Kinetická energia

elektrónového mraku môže byť považovaná za energiu ekvivalentného induktora (cievky) s indukčnosťou L , ktorým prechádza prúd I .

2.6a	Vyjadrite W_{kin} a I pomocou rýchlosti v .	0.7
2.6b	Vyjadrite ekvivalentnú indukčnosť L pomocou polomeru R , náboja elektrónu e , hmotnosti elektrónu m_e a koncentrácie elektrónov n a určte jej hodnotu.	0.5

Plazmónová rezonancia striebornej nanočastice

Z predchádzajúcej analýzy vyplýva, že pohyb vyvolaný vychýlením elektrónového mraku z rovnovážnej polohy a následným uvoľnením možno modelovať pomocou ideálneho LC -obvodu kmitajúcim v stave rezonancie. Tento dynamický mód elektrónového mraku je známy ako plazmónová rezonancia, zodpovedajúca osciláciám s tzv. plazmónovou uhlovou frekvenciou ω_p .

2.7a	Vyjadrite vzťah pre plazmónovú uhlovú frekvenciu ω_p elektrónového mraku pomocou náboja elektrónu e , hmotnosti elektrónu m_e , koncentrácie elektrónov n a permitivity ϵ_0 .	0.5
2.7b	Určte ω_p v jednotkách rad/s a vlnovú dĺžku λ_p v nm svetla vo vákuu s uhlovou frekvenciou $\omega = \omega_p$.	0.4

Strieborná nanočastice osvetlená svetlom s plazmónovou frekvenciou

Vo zvyšku úlohy je nanočastica osvetlená monochromatickým svetlom s plazmónovou uhlovou frekvenciou ω_p a intenzitou $S = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 = 1,00 \text{ MW m}^{-2}$. Ak je vlnová dĺžka veľká, $\lambda_p \gg R$, nanočasticu možno považovať za umiestnenú v homogénnom harmonicky premennom poli $\mathbf{E}_0 = -E_0 \cos(\omega_p t) \mathbf{e}_x$. Pod účinkom \mathbf{E}_0 stred elektrónového oblaku kmitá s rovnakou frekvenciou rýchlosťou $\mathbf{v} = d\mathbf{x}_p/dt$ a s konštantnou amplitúdou x_0 . Tento kmitavý pohyb spôsobuje absorpciu svetla. Energia zachytená časticou je buď premenená na Jouleovo teplo vo vnútri častice alebo opäť vyžiarená ako rozptýlené svetlo.

Jouleovo teplo je spôsobené náhodnými nepružnými zrážkami, pri ktorých voľné elektróny odovzdávajú celú získanú kinetickú energiu strieborným iónom a tá sa premení na energiu tepelného pohybu iónov. Stredná doba medzi zrážkami je $\tau \gg 1/\omega_p$, pričom pre strieborné nanočastice uvažujeme $\tau = 5,24 \times 10^{-15} \text{ s}$.

2.8a	Vyjadrite vzťah pre stredný Jouleov tepelný výkon P_{heat} v nanočastici, ďalej časovú strednú hodnotu kvadrátu prúdu $\langle I^2 \rangle$, v ktorom sa vyskytuje explicitne časová stredná hodnota kvadrátu rýchlosti $\langle v^2 \rangle$ elektrónového mraku.	1.0
2.8b	Vyjadrite vzťah pre ekvivalentný odpor R_{heat} v ekvivalentnom odporovom modeli nanočastice zodpovedajúci Jouleovmu teplu P_{heat} a prúdu elektrónového mraku I . Vypočítajte hodnotu R_{heat} .	1.0

Dopadajúci svetelný zväzok stráca priemerný výkon P_{scat} rozptylom na osciláciách elektrónového mraku (re-emisiou). P_{scat} závisí od vlastností zdroja rozptylu (amplitúda x_0 , náboj Q a uhlová

frekvencia ω_p plazmónového dipólového momentu) a vlastností svetla (rýchlosť svetla c vo vákuu a permitivita ϵ_0). Pomocou týchto štyroch veličín je P_{scat} vyjadrené vzťahom $P_{\text{scat}} = \frac{(Qx_0)^2 \omega_p^4}{12\pi c^3 \epsilon_0}$.

2.9	S použitím P_{scat} vyjadrite vzťah pre ekvivalentný rozptylový odpor R_{scat} (analogický R_{heat}) v ekvivalentnom odporovom modeli a určte jeho hodnotu.	1.0
-----	---	-----

Uvedené ekvivalentné obvodové parameter možno spojiť do *LCR* sériového obvodového modelu striebornej nanočastice, pripojeného na harmonicky kmitajúce ekvivalentné napätie $V = V_0 \cos(\omega_p t)$ určené elektrickým poľom E_0 dopadajúceho svetla.

2.10a	Vyjadrite vzťahy pre stredné stratové výkony P_{heat} a P_{scat} , v ktorých vystupuje amplitúda E_0 elektrického poľa dopadajúceho svetla v prípade plazmónovej rezonancie $\omega = \omega_p$.	1.2
2.10b	Určte hodnoty E_0 , P_{heat} a P_{scat} .	0.3

Para generovaná svetlom

Vodný roztok strieborných nanočastíc má koncentráciu $n_{\text{np}} = 7,3 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$. Nachádza sa v pravouhlej priehľadnej nádobe s rozmermi $h \times h \times a = 10 \times 10 \times 1,0 \text{ cm}^3$ ktorá je osvetlená svetlom s plazmónovou frekvenciou a intenzitou $S = 1.00 \text{ MW m}^{-2}$ s kolmým dopadom, pozri obr. 2.1 (e). Teplota vody $T_{\text{wa}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a predpokladáme, v súlade s pozorovaniami, že v ustálenom stave všetko Jouleovo teplo nanočastíc sa prejaví produkciou pary s teplotou $T_{\text{st}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ bez zvýšenia teploty vody.

Tepelná účinnosť η plazmónového generátora pary je definovaná ako pomer $\eta = P_{\text{st}}/P_{\text{tot}}$, kde P_{st} je výkon spotrebovaný na produkciu pary v celej nádobe a P_{tot} je celkový výkon dopadajúceho svetla vstupujúceho do nádoby.

Po väčšinu času je nanočastica obklopená parou namiesto vody a to sa dá opísať ako keby sa nachádzala vo vákuu.

2.11a	Určte celkovú hmotnosť pary μ_{st} vytvorenej v plazmónovom generátore za sekundu počas osvetlenia svetlom s plazmónovou frekvenciou a intenzitou S .	0.6
2.11b	Určte hodnotu tepelnej účinnosti η plazmónového generátora pary.	0.2