

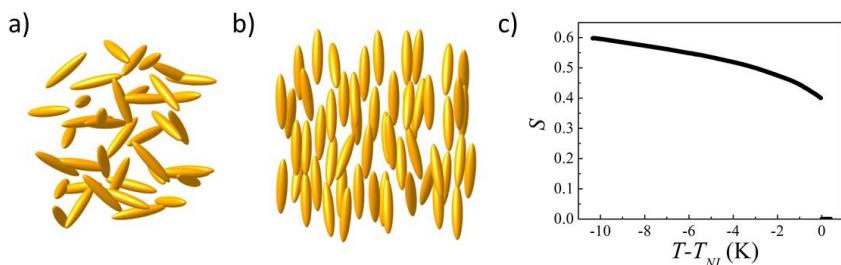
Dielektrična anizotropija tekočega kristala

Uvod

V nekaterih organskih snoveh se med tekočo in kristalno fazo pojavijo tekočekristalne faze. Te imajo tako lastnosti tekočine kot tudi kristalov. Najpreprostejša tekočekristalna faza je nematična faza, ki se običajno pojavi v snoveh sestavljenih iz podolgovatih molekul. V tej fazi snov še vedno teče kot tekočina. Medtem ko so v navadni izotropni tekočini molekule naključno orientirane (slika 1a), se v nematični fazi podolgovate molekule lokalno orientacijsko uredijo tako, da v povprečju kažejo v isto smer (slika 1b). To smer označimo z enotskim vektorjem \mathbf{n} , ki ga imenujemo direktor. Smeri \mathbf{n} in $-\mathbf{n}$ sta enakovredni. S skalarnim parametrom urejenosti S opišemo, koliko dolge osi molekul v povprečju odstopajo od smeri direktorja:

$$S = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 f(\beta) (3 \cos^2 \beta - 1) d(\cos \beta). \quad (1)$$

Kot β je kot med direktorjem in dolgo osjo molekul, $f(\beta)$ je porazdelitvena funkcija. V izotropni fazi so dolge osi molekul naključno urejene, tako je $f(\beta) = 1$ in posledično $S = 0$. V nematični fazi je vrednost S med 0 in 1. Fazni prehod med izotropno in nematično fazo je šibek prehod prvega reda, tako pri temperaturi faznega prehoda vrednost S nezvezno skoči iz 0 na neko končno vrednost (slika 1c). Z nižanjem temperature urejenost molekul in s tem S zvezno naraščata.



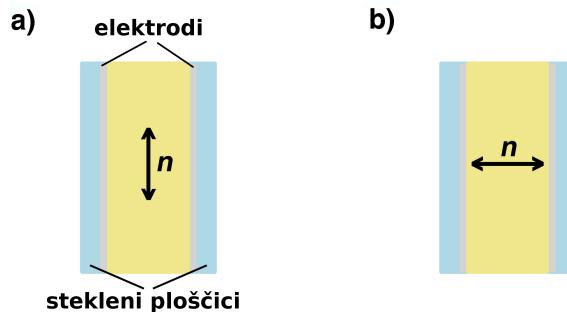
Slika 1: Prikaz orientacije molekul v a) izotropni in b) nematični fazi. c) Primer temperaturne odvisnosti parametra urejenosti S . T_{NI} je temperatura prehoda iz nematične v izotropno fazo.

Zaradi orientacijske ureditve molekul imajo tekoči kristali anizotropne lastnosti. Najbolj pomembni sta optična dvolomnost in velika dielektrična anizotropija. Odziv na zunanje električno polje v nematičnem tekočem kristalu namesto s skalarno dielektrično konstanto tako zapišemo z dielektričnim tenzorjem

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{||} \end{bmatrix} \quad (2)$$

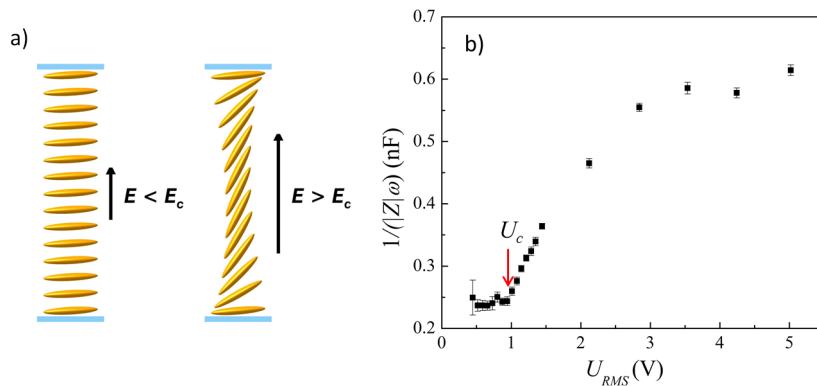
Tu smo privzeli, da direktor kaže v smeri osi z . Razlika med vrednostima komponent dielektričnega tenzorja vzdolž direktorja in pravokotno nanj $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp}$ je dielektrična anizotropija. Ta je sorazmerna s skalarnim parametrom urejenosti, $\Delta\varepsilon \propto S$.

Za merjenje dielektričnega tenzorja damo tekoči kristal med dve stekleni ploščici, ki imata površino obdelano tako, da vsiljujeta orientacijo ali vzporedno ali pravokotno na površino. Na ta način dobimo dobro urejeno plast tekočega kristala. Na notranji površini stekelc sta naparjeni elektrodi, tako da taka celica deluje kot kondenzator (slika 2). Komponente dielektričnega tenzorja določimo iz kapacitivnosti celic. Pri merjenju kapacitivnosti pazimo, da je napetost med elektrodama dovolj majhna. Komponento ϵ_{\perp} merimo v celici z ureditvijo direktorja vzporedno s površino (slika 2a), komponento ϵ_{\parallel} pa v celici z ureditvijo direktorja pravokotno nanjo (slika 2b).



Slika 2: a) Tekočekristalna celica z ureditvijo direktorja vzporedno s površino stekelc za merjenje ϵ_{\perp} in Frederiksovega prehoda. b) Tekočekristalna celica z ureditvijo direktorja pravokotno na površino stekelc za merjenje ϵ_{\parallel} . Sliki nista narisani v razmerju. Tipična debelina tekočekristalne plasti je namreč precej manjša od debeline stekelc. V tej vaji sta debelini tekočekristalne plasti 20.4 μm za celici z vzporedno ureditvijo in 18.3 μm za celico s pravokotno ureditvijo direktorja. V tekočekristalnih zaslonih so plasti še tanjše, tj. okoli 5 μm .

Če je $\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} > 0$, potem je energijsko ugodno, če je direktor orientiran v smeri zunanjega električnega polja. Kadar površina celice vsiljuje drugačno ureditev kot zunanje polje, pride do deformacije direktorskega polja, kot je npr. prikazano na sliki 3. Zaradi



Slika 3: a) Shematski prikaz Frederiksovega prehoda. b) Odvisnost C od povprečne napetosti U_{RMS} .

deformacije direktorja se sistemu poveča elastična energija. Tako v primeru na sliki 3 pride do deformacije šele, ko je zunanje polje tako veliko, da je zmanjšanje električne energije sistema zaradi reorientacije direktorja v smeri vzdolž polja $\Delta\epsilon\epsilon_0 E^2$ večje od povečanja energije zaradi deformacije $K_1 \left(\frac{\pi}{d}\right)^2$. To se zgodi, kadar je napetost na celici

večja od kritične napetosti[1]

$$U_c = \pi \sqrt{\frac{K_1}{\Delta \varepsilon \varepsilon_0}} \quad (3)$$

kjer je K_1 je orientacijska elastična konstanta tekočega kristala. Tu smo upoštevali, da je $E = U/d$, in tako kritična napetost ni odvisna od debeline celice d . Prehod iz nedeformirane strukture v deformirano pod vplivom polja imenujemo Frederiksov prehod. Merimo ga lahko na več načinov. Eden izmed načinov je merjenje kapacitivnosti tekočekristalne celice v odvisnosti od napetosti. Zaradi deformacije direktorja se namreč spremeni efektivna dielektričnost tekočega kristala, ki vpliva na kapacitivnost kondenzatorja.

Tekoči kristali v praksi niso popolni dielektrični, ker so v njih prisotni ioni (disociirani deli molekul nečistoč). Če damo na njih enosmerno napetost, jo bodo ti ioni delno zasenčili in bo odziv na polje zato manjši. Da se temuognemo, uporabimo izmenično napetost z dovolj veliko frekvenco, da ji ioni in direktor ne morejo slediti. V primeru sinusne napetosti se tako tekoči kristal obnaša, kot bi nanj dali enosmerno napetost z amplitudo $U_{\text{RMS}} \equiv \sqrt{\overline{U^2}} = U_{\text{amp}}/\sqrt{2}$.

Potrebščine

A) Merjenje dielektrične anizotropije tekočega kristala

- Eksperimentalna priprava je sestavljena iz grelca (dveh avtomobilskih žarnic) in osrednjega dela, v katerem sta dve celici tekočega kristala E7, urejenega v ravnini stekelc in pravokotno nanje, ter senzor temperature PT100;
- GWinstek L/C/R meter 800;
- Agilent 34410A multimeter;
- izvor napetosti za napajanje žarnic;

B) Merjenje Frederiksovega prehoda

- celica tekočega kristala urejenega v ravnini stekelc;
- osciloskop (Tektronix TDS 2012B);
- funkcionalni generator (GW Instek SFG-2004);
- vezje za merjenje karakteristike $U(I)$.

Naloga

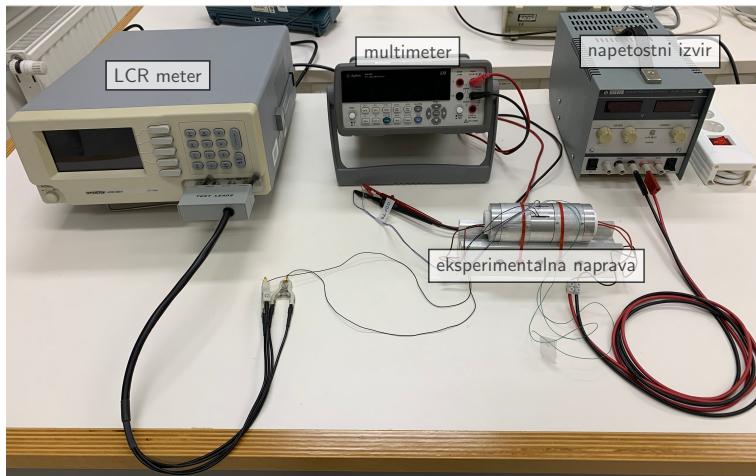
1. Izmerite temperaturno odvisnost komponent dielektričnega tenzorja vzdolž in pravokotno na direktor.
2. Narišite na isti graf temperaturno odvisnost obeh komponent dielektričnega tenzorja in povprečne dielektrične konstante. Narišite graf dielektrične anizotropije v odvisnosti od temperature. Določite temperaturo faznega prehoda.

3. Izmerite odvisnost kapacitivnosti celice z orientacijo direktorja vzdolž stekelc od napetosti, narišite graf $C(U)$ ter določite elastično konstanto tekočega kristala.

Navodilo

A) Dielektrična anizotropija tekočega kristala

Postavitev eksperimenta za merjenje temperaturne odvisnosti dielektričnih konstant je prikazana na sliki 4: na levi je napajalnik za kontrolo napetosti na grelnih žarnicah, na sredini multimeter za odčitavanje temperature s pomočjo PT100 sonde in na desni LCR meter za merjenje kapacitivnosti tekočekristalne celice. PT100 je naziv za platinast

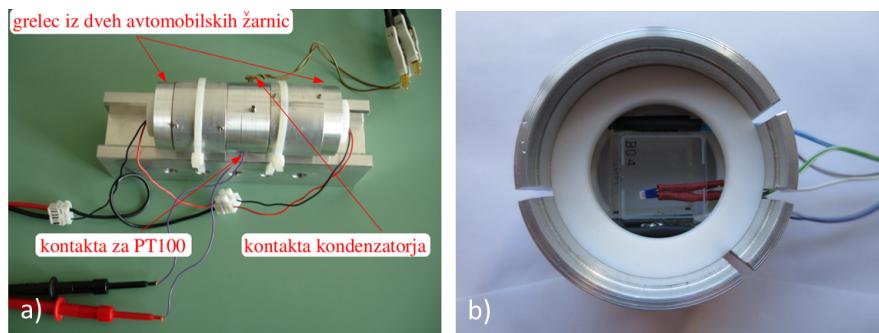


Slika 4: Postavitev eksperimenta za merjenje dielektrična anizotropija TK.

uporovni termometer (angl. Resistance Temperature Detector RTD). Temperaturna odvisnost upornosti je na intervalu $[0,190^{\circ}\text{C}]$ opisana s formulo

$$R(T) = 100 \Omega (1 + 0.00385(T - 273.16 \text{ K})) \quad (4)$$

do 1 % natančno po standardih DIN 43760 and IEC 751. Tako preko merjenja upornosti izvemo temperaturo senzorja PT100. Eksperimentalna priprava, povečano prikazana na sliki 5a, je izdelana iz aluminijaste cevi. Na koncih sta pritrjeni avtomobilski žarnici, ki nam služita kot grelec osrednjega dela. V osrednjem delu, prikazan na sliki 5b, pa sta dve tekočekristalni celici z mešanicami tekočih kristalov z oznako E7 proizvajalca Merck [2]. Kontakte iz kondenzatorja vodimo na LCR meter, ki je nastavljen na merjenje kapacitivnosti C in upornosti R. Kapacitivnost tekočekristalne celice merimo pri frekvenci 1 kHz in z relativno majhno amplitudo napetosti $U_{\text{amp}} = 0.2 \text{ V}$, s čimer si zagotovimo delo v linearinem odzivu tekočega kristala. Med tekočekristalnima celicama je pritrjen še temperaturni senzor PT100, ki ga povežemo z multimetrom. S pritiskom na Shift in Temp multimeter nastavimo namerjenje temperature, ki poteka preko uporabe izraza (4). Če meritve niso smiselne ali če se na zaslonu izpiše +OVLD °C, potem je potrebno merilec temperature nastaviti. To storimo s pritiskom na Config in odgovarjamo na vprašanja preko gumbov < > in Enter: nastavimo Probe Type na RTD – 2W – dvožilni uporovni termometer in na ostala vprašanja odgovorimo le s potrditvijo Enter. Fazni prehod za izbrani tekoči kristal je okoli 58 °C.



Slika 5: Priprava za merjenje temperaturne odvisnosti kapacitivnosti tekočekristalnih celic (a) in njen osrednji del (b). Vijolični žici vodita do celice za merjenje ϵ_{\parallel} , rdeči do celice za merjenje ϵ_{\perp} ter vijolična in siva do senzorja PT100.

Preden začnete greti, pomerite kapaciteto obeh celic pri sobni temperaturi. Med ohlajanjem zaporedoma izmerite kapacitivnosti obeh tekočekristalnih celic v temperaturnem intervalu od 40 do 65 °C. **Ko prižgete napetostni izvir, preverite, da je napetost postavljena na 0.** Stekleni celici s kondenzatorjem in PT100 senzorjem segrevamo tako, da postopoma večamo napetost na napetostnem izviru. Segrejte na 65 °C, počasi ohlajajte in si zapisujte kapacitivnost C . Vzorec je razmeroma majhen, zato je čas termalizacije kratek (reda nekaj sekund), vendar je zaradi samega beleženja meritev in ustrezega delovanja druge opreme smiselno držati hitrost ohlajanja dokaj nizko, recimo 1 °C na 40 s, v bližini faznega prehoda pa 0.1 °C na 20 s. Temperatura se ustali, ko je doveden tok energije enak odvedenemu. Potem preklopite vhod GWinstek LCR metra na drugo celico in ponovimo meritev. Hitrost hlajenja naj bo v obeh primerih enaka. Iz kapacitivnosti izračunajte komponenti dielektričnega tenzorja in njuni temperaturni odvisnosti narišite na isti graf. Kapacitivnosti praznih tekoče-kristalnih celic C_0 so naslednje:

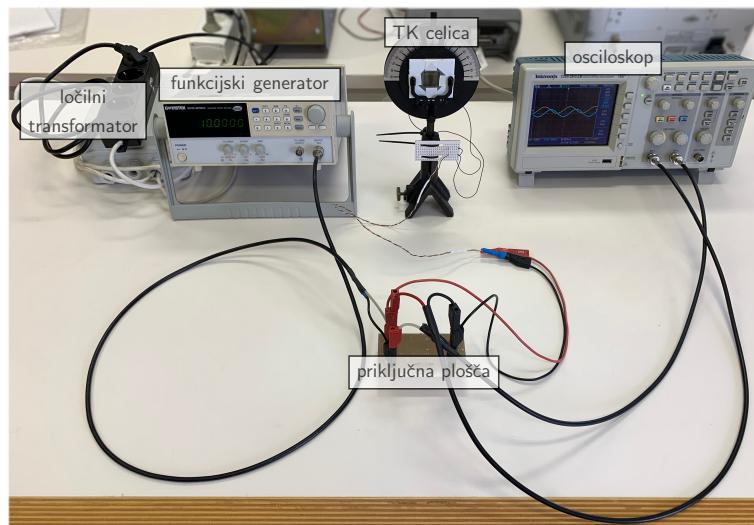
- oznaka F62, za merjenje ϵ_{\perp} : $C_0 = 53.4 \text{ pF}$
- oznaka B04, za merjenje ϵ_{\parallel} : $C_0 = 56.5 \text{ pF}$

Na isti graf narišite tudi povprečno dielektrično konstanto $\bar{\epsilon} = (2\epsilon_{\perp} + \epsilon_{\parallel})/3$. Izračunajte še anizotropijo $\Delta\epsilon$ in jo narišite na graf. Iz grafov določite temperaturo faznega prehoda iz izotropne v nematično fazo.

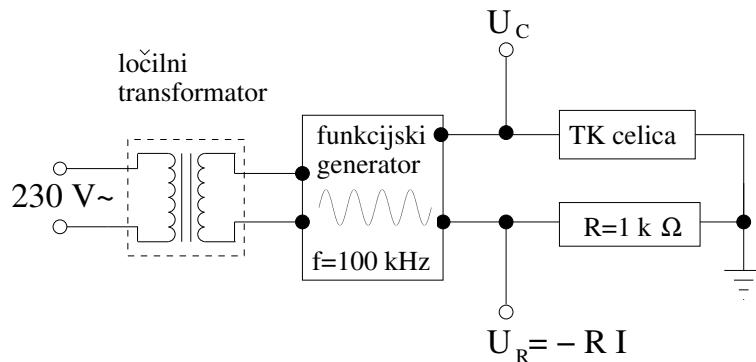
B) Frederiksov prehod

Postavitev vaje je prikazana 6. Na mizi imate stojalo s celico tekočega kristala površine $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ in debeline $20.6 \mu\text{m}$, ki ima direktor urejen v ravni stekelc. Površini sta prevodni in priklopljeni na napetostni vir. Na vsaki strani celice je nameščen polarizator. Osi polarizatorja sta vzporedni in tvorita kot 45° z osjo urejenosti TK. Pri gledanju skozi celico tako vidimo spremembe optične dvolomnosti v odvisnosti od električne napetosti na celici. Z opazovanjem celice lahko izmerimo minimalno napetost, ki že spremeni barvo prepuščene svetlobe in na ta način določimo Frederiksov prehod.

Drugi način pa je merjenje kapacitete celice v odvisnosti od amplitude napetosti. Celica je nekoliko tanjša, da ima večjo kapaciteto. Celico priklopite, kot kaže slika 7, to je enako kot tudi ostale elemente, ki jih boste merili naslednjič. Meritve Frederiksovega prehoda



Slika 6: Postavitev vaje DielTK za izvedbo meritev Frederiksovega prehoda.



Slika 7: Shema meritve odvisnosti kapacitivnosti od napetosti. Ločilni transformator dovojuje, da ozemljimo poljubno točko v krogu.

se lotite, ko boste opravili meritve ostalih elementov in se boste z merskim postopkom že dobro spoznali. Tekočekristalna celica ni idealni kondenzator in zato slika na osciloskopu ne bo vedno elipsa z osema poravnanimi z x in y osjo. Vendar pa postaja kondenzator "idealnejši" pri visokih frekvencah zato nastavite testni signal v okolici 10 kHz na tako frekvenco, da bo elipsa na zaslonu približno simetrična glede na x in y os. Takrat je faza med tokom in napetostjo enaka 90° in lahko iz izmerjene amplitude toka I_{amp} in napetosti U_{amp} določite kapaciteto kondenzatorja $C = I_{\text{amp}} / (\omega U_{\text{amp}})$. Spreminjajte amplitudo testne napetosti in si zapisujte vrednosti I_{amp} in U_{amp} . Amplitude napetosti spremajte v korakih po 0.1 V od 0.7 V do 2.5 V, nad 2.5 V pa v korakih po 0.5 V. Narišite graf odvisnosti C od korena povprečnega kvadrata napetosti na celici U_{RMS} in določite kritično napetost, pri kateri pride do Frederiksovega prehoda.

Iz meritev kritične napetosti Frederiksovega prehoda določite orientacijsko elastično konstanto tekočih kristalov K_1 v uporabljenih celicah preko zvezde (3).

Literatura

- [1] Pierre-Gilles de Gennes. *The physics of liquid crystals.* eng. 2nd ed. International series of monographs on physics ; 83. Oxford: Clarendon Press, 1993. ISBN: 0198520247.
- [2] Merck & Co., Inc. <https://www.merck.com>. 2022.