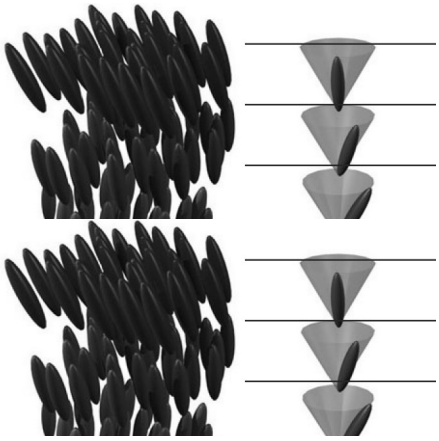
Elektrooptični pojav v feroelektričnem tekočem kristalu

Uvod

Tekoče kristale tvorijo podolgovate molekule, ki se pri ne previsokih temperaturah orientacijsko uredijo. Za smektične tekoče kristale je poleg orientacijskega reda značilna tudi plastovita struktura, torej enorazsežen pozicijski red. Molekule se uredijo v plasti, plasti same se vedejo kot dvorazsežna tekočina. V smektikih A kaže odlikovana smer, ki ji pravimo direktor, vzdolž normale plasti, v smektikih C pa ne: kot, ki ga oklepa direktor z normalo, znaša navadno med 10 in 30°.

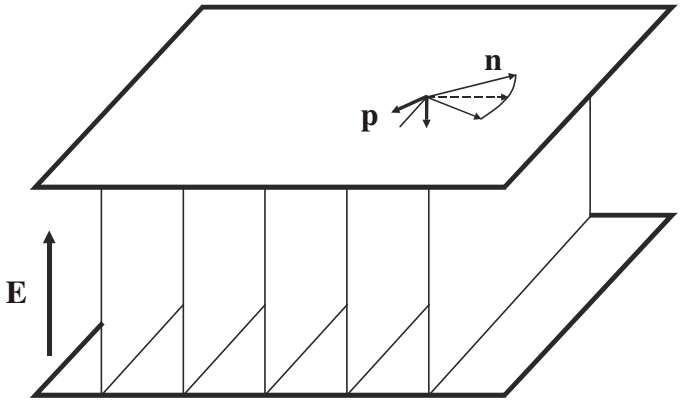
Feroelektrične smektične C* tvorijo molekule, ki imajo velik električni dipolni moment prečno na vzdolžno os molekul, zato se v teh snoveh pojavi električna polarizacija, ki leži v ravnini plasti in je pravokotna na direktor; električna polarizacija je približno sorazmerna s kotom nagiba. Tekoči kristali so posebej uporabni zaradi dvolomnosti, ki izhaja iz orientacijske urejenosti molekul, optična os je vzporedna z direktorjem (slika 1).



Slika 1: Struktura smektične C* faze: molekule ležijo v plasteh, povprečna smer molekul opiše vijačnico v smeri normale plasti

V debelem vzorcu feroelektričnega tekočega kristala se smer nagiba in s tem smer električne polarizacije v smektičnih ravninah zlagoma spreminja vzdolž normale plasti. Korak vijačnice, ki jo opiše konica direktorja, je navadno na nekaj sto do nekaj tisoč debelin plasti. poln krog. Zaradi vijačne strukture je makroskopska električna polarizacija vzorca enaka 0. Polarizacijo plasti lahko uredimo v isto smer bodisi z zunanjim električnim poljem bodisi tako, da vzorec ogradimo s ploščicama, ki

predpisujeta orientacijo molekul, kar dosežemo s kemično ali mehansko obdelavo površin. Če je razmik med ploščicama dovolj majhen (navadno manj kot $5\,\mu\mathrm{m}$), se direktor uredi v predpisani smeri po vsem vzorcu. V takem površinsko stabiliziranem feroelektričnem tekočem kristalu so smektične ravnine pravokotne na ploščici, električna polarizacija pa leži v ravnini ploščic (slika 2).



Slika 2: Shema površinsko stabilizirane feroelektrične tekočekristalne celice: smektične plasti so pravokotne na ograjujoči ploščici; direktor (**n**) lahko leži v dveh smereh, ki ju s konusa možnih smeri odbere ravnina steklene ploščice; polarizacija (**p**) leži pravokotno na direktor v ravnini ploščic. Optična os kaze v smeri normale plasti.

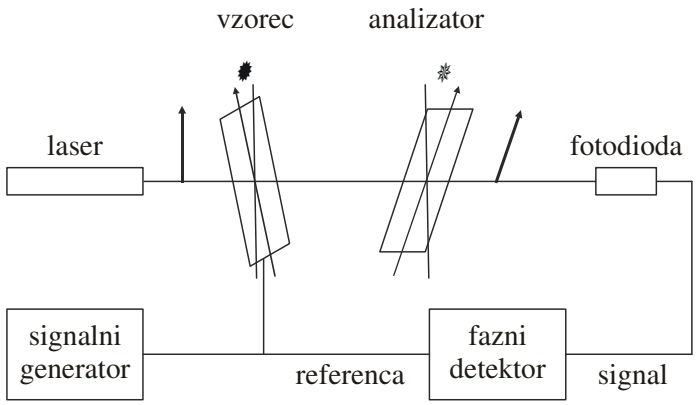
Če postavimo tanek površinsko stabiliziran feroelektrični tekoči kristal v zunanje električno polje, pravokotno na ograjujoči ploščici, se električna polarizacija vzorca deloma zasuče v smeri polja. Ker je povezana z orientacijo direktorja, se tudi ta nekoliko zasuče na stožcu dovoljenih smeri, ki ga določa predpisani nagib direktorja glede na normalo plasti, značilen za Sm C fazo. Zato se spremeni smer optične osi vzorca, kot kaže slika 2. Zasuk električne polarizacije je linearno odvisen od električnega polja, zato je tudi zasuk optične osi sorazmeren s poljem. Linearnemu odzivu lomnega količnika snovi na zunanje električno polje pravimo elektrooptični pojav.

Zasuk polarizacije in s tem direktorja v izmeničnem električnem polju je odvisen tudi od frekvence. Če je previsoka, polarizacija ne more več slediti polju. Odvisnost spremembe polarizacije (δP) od frekvence lahko opišemo z Debyevim relaksacijskim modelom

$$\delta P = \delta P_0 \frac{1}{1 + i\omega\tau}. \qquad (1)$$

Relaksacijski čas τ je odvisen od viskoznosti tekočega kristala in od debeline vzorca. Kot zasuka optične osi, ki je sorazmeren s spremembo polarizacije, ima enako frekvenčno odvisnost.

Spremembo smeri optične osi vzorca lahko zaznamo tako, da opazujemo, kako se spremeni polarizacija svetlobe pri prehodu skozi vzorec. Shemo meritve kaže slika 3. Na vzorec posvetimo s polarizirano svetlobo in merimo svetlobno moč, ki jo prepušča analizator za vzorcem. Kot med optično osjo in vpadno polarizacijo označimo z α, kot med optično osjo in analizatorjem z β. Vpadno polarizacijo razstavimo na izredno komponento, ki je vzporedna z optično osjo, in na redno komponento, pravokotno na optično os. Po prehodu skozi vzorec debeline h znaša fazna razlika med izrednim in rednim žarkom $k\Delta nh$, kjer je k valovni vektor svetlobe, Δn razlika lomnih količnikov za oba žarka. Analizator prepusti le projekcijo polja na prepustno smer:



Slika 3: Shema eksperimenta; polarizacija svetlobe je nakazana z debelejšo puščico

$$E_p = E_0\left[\cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta\exp\left(ik\Delta nh\right)\right]. \tag{2}$$

$$I_p = I_0\left[\cos^2\left(\alpha-\beta\right) - \sin 2\alpha\sin 2\beta\sin^2\left(k\Delta nh/2\right)\right]. \tag{3}$$

Zanima nas predvsem majhna sprememba prepuščene moči, ki je posledica majhne, periodične spremembe smeri optične osi. Zaradi te imata kota α in β majhni časovno odvisni komponenti

$$\alpha = \alpha_0 + \psi, \tag{4}$$

$$\beta = \beta_0 + \psi. \tag{5}$$

Z razvojem prepuščene moči do linearnega člena v ψ dobimo, da je izmenični del prepuščene svetlobne moči enak

$$I_p(\omega) = -2I_0 \sin 2(\alpha_0 + \beta_0) \sin^2(k\Delta nh/2)\psi(\omega). \tag{6}$$

Modulacija moči bo torej največja, če je $\alpha_0 + \beta_0 = \pi/4$.

Odziv nekega sistema na majhne periodične zunanje motnje najlažje izmerimo s faznim detektorjem, ki vhodni izmenični signal pomnoži z referenčnim izmeničnim signalom s frekvenco modulacije (v našem primeru zunanjega električnega polja, priklopljenega na tekočekristalni vzorec). Oba imata enaki frekvenci, saj se vzbujevani sistem vselej odziva s frekvenco vzbujanja. Zmnožek signalov vsebuje komponento z dvojno frekvenco in enosmerno komponento, ki jo izločimo z ustreznim nizkopasovnim filtrom. Časovna konstanta filtra določa efektivno širino frekvenčnega intervala, v katerem opazujemo signal. Čim ožji je ta interval, torej čim daljša je časovna konstanta izhodnega filtra, tem manj je v signalu šuma.

Referenčno napetost priključimo na poseben vhod faznega detektorja, ki omogoča, da spreminjamo fazo referenčnega signala napetost. Referenčni signal je torej oblike

$$U_r = U_0 \cos(\omega t + \phi). \tag{7}$$

Signal ni nujno v fazi z motnjo, zato ga zapišemo kot

$$S = S_1 \cos \omega t + S_2 \sin \omega t. \tag{8}$$

Enosmerni del produkta signala in referenčne napetosti, ki ga dobimo na izhodu faznega detektorja, je

$$U_i = \frac{1}{2} U_0 (S_1 \cos\phi + S_2 \sin\phi). \tag{9}$$

Z izbiro faze reference lahko torej ločimo odziv sistema, ki je v fazi z vzbujanjem, in odziv, ki je za $\pi/2$ iz faze.

V tekočem kristalu je zasuk optične osi ψ zaradi viskoznosti snovi zakasnjen glede na zunanje električno polje. Del, ki je v fazi, dobimo kot realni del izraza 1, del, ki je premaknjen za $\pi/2$, pa kot imaginarni del enačbe 1:

$$\psi_r = \frac{\psi_r}{1+(\omega\tau)^2}, \tag{10}$$

$$\psi_i = -\frac{\psi_i \omega\tau}{1+(\omega\tau)^2}. \tag{11}$$

Iz izmerjenih ψ_r in ψ_i lahko dobimo relaksacijski čas τ s prilagajanjem gornjih izrazov meritvam. Imamo pa še drugo zanimivo možnost. Prav lahko se prepričamo, da tvorijo točke v kompleksni ravnini, ki predstavljajo pare $(\psi_r(\omega), \psi_i(\omega))$ znotraj celotnega frekvenčnega intervala, krožnico v kompleksni ravnini. s Središče krožnice je na realni osi pri vrednosti ψ_r, ki ustreza frekvenci $\omega = 1/\tau$. Če določimo središče krožnice, dobimo s tem $1/\tau$.

Potek dela

Najprej se s pomočjo Priročnika seznanite z delovanjem in uporabo faznega detektorja. Shemo meritve kaže slika 3. Navpično polarizirana svetloba iz laserja pada na vzorec, katerega optična os tvori s polarizacijo kot, ki je blizu 45°. Svetlobo, ki prepusti analizator, zaznamo s fotodiodo. Fotodioda daje tok, ki je sorazmeren vpadni svetlobni moči. Da ga je lažje opazovati, priključimo na izhod iz diode preko T člena še delovni upor velikosti $10\,\mathrm{k\Omega}$.

1. Na vzorec priključimo izmenično napetost iz signalnega generatorja, ki mu lahko spreminjamo frekvenco. Napetost naj ne bo večja od 3 V, kar preverite z osciloskopom. Napeljite jo tudi na referenčni vhod faznega detektorja.
2. Signal iz fotodiode si najprej oglejte na osciloskopu skupaj z napetostjo na vzorcu. Analizator zavrtite tako, da bo izmenični del signala čim večji. Spreminjajte tudi frekvenco in se prepričajte, da pri frekvencah nad nekaj $100\,\mathrm{Hz}$ izmenični del signala začne padati in zaostajati za napetostjo na vzorcu.
3. Napeljite signal na vhod A faznega detektorja. Po potrebi spremenite občutljivost tako, da ne bo gorel indikator za prekoračenje območja.
4. Izberite časovno konstanto izhodnega filtra blizu 1 s. Fazo reference najprej nastavite na 0. Izmerite realni del elektrooptičnega tekočega odziva pri nekaj

vrednostih napetosti iz signalnega generatorja in se prepričajte, da je odziv sorazmeren z modulacijo.

5. Pri konstantni napetosti iz signalnega generatorja spreminjajte frekvenco in pri vsaki frekvenci izmerite signal pri fazi 0° in pri fazi 90°. Narišite obe komponenti signala kot funkciji frekvence in s prilagajanjem izrazov 9 in 10 določite relaksacijski čas. Narišite še vse izmerjene vrednosti v ravnini, kjer na absciso nanašate signal pri fazi 0°, na ordinato pa signal pri 90°, in določite relaksacijsko frekvenco tudi iz tega diagrama.