

# 10. ELEKTROOPTIČNI POJAV V FEROELEKTRIČNEM TEKOČEM KRISTALU

## 10.1 Uvod

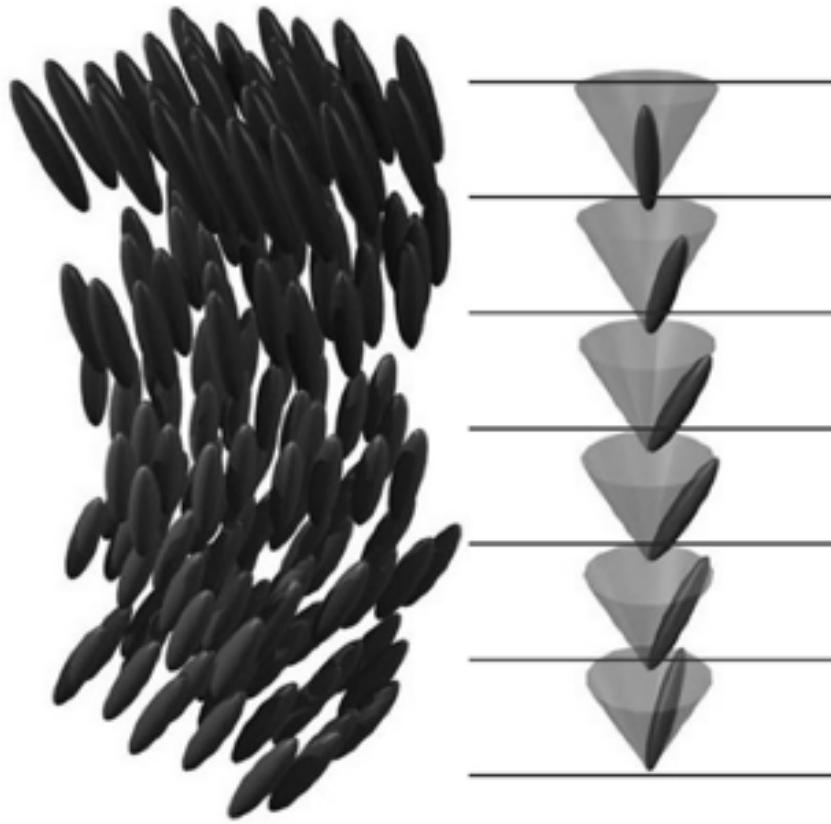
Tekoče kristale (TK) tvorijo podolgovate molekule, ki se pri ne previsokih temperaturah orientacijsko uredijo. Za smektične tekoče kristale je poleg orientacijskega reda značilna tudi plastovita struktura, torej enorazsežen pozicijski red. Molekule se uredijo v plasti, plasti same se vedejo kot dvorazsežna 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  $10^\circ$  in  $30^\circ$ .

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. TK so posebej uporabni zaradi dvolomnosti, ki izhaja iz orientacijske urejenosti molekul, optična os je vzporedna z direktorjem (slika 1)

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. 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  $5\mu\text{m}$ ), 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).

Če postavimo tanek površinsko stabiliziran feroelektrični tekoči kristal v zunanje električno polje, pravokotno na ograjujoči ploščici, se električna polarizacija 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 sprememb



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

polarizacije ( $\delta P$ ) od frekvence lahko opišemo z Debyevim relaksacijskim modelom

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

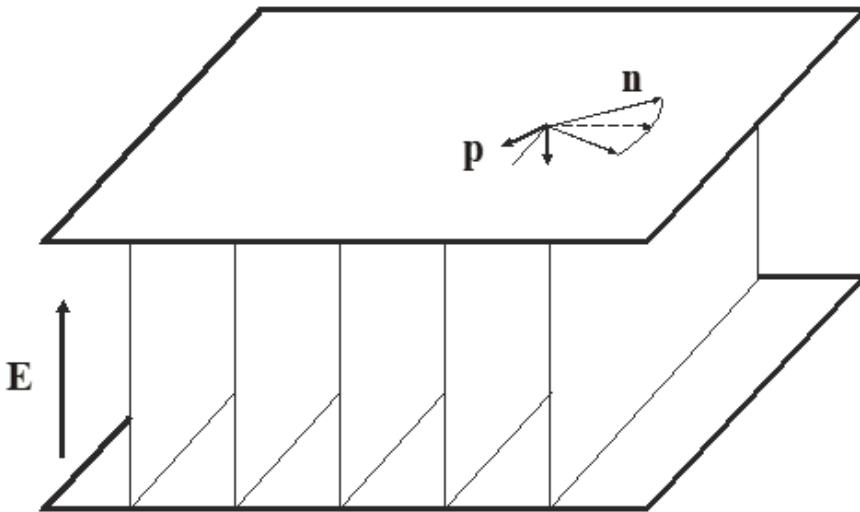
Relaksacijski čas  $\tau$  je odvisen od viskoznosti tekočega kristala in od debeline vzorca. Kot zasuka optične osi, ki je sorazmeren s spremembo polarizacije, ima enako frekvenčno odvisnost.

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 svetlogo in merimo svetlobno moč, ki jo prepušča analizator za vzorcem. Kot med optično osjo in vpadno polarizacijo označimo z  $\alpha$ , kot med optično osjo in analizatorjem z  $\beta$ . 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,  $\Delta n$  razlika lomnih količnikov za oba žarka. Analizator prepusti le projekcijo polja na prepustno smer:

$$E_p = E_0 [\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \exp(ik\Delta nh)] \quad (2)$$

$$I_p = I_0 [\cos^2(\alpha - \beta) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2(k\Delta nh/2)]. \quad (3)$$

Zanima nas predvsem majhna sprememba prepuščene moči, ki je posledica majhne, periodične spremembe smeri optične osi. Zaradi te imata kota  $\alpha$  in  $\beta$  majhni časovno odvisni komponenti:



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

$$\alpha = \alpha_0 + \psi \quad (4)$$

$$\beta = \beta_0 + \psi. \quad (5)$$

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

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

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

Prepuščeno svetlobno moč merimo s pomočjo fotodiode. Nanjo zaporedno priklopimo delovni upor, napetost na njemu pa je sorazmerna vpadni moči svetlobe.

Odziv nekega sistema na majhne periodične zunanje motnje najlažje izmerimo s faznim občutljivim ojačevalnikom (FOO, angl. *lock-in amplifier*, ki vhodni izmenični signal iz fotodiode 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<sup>1</sup>, 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.

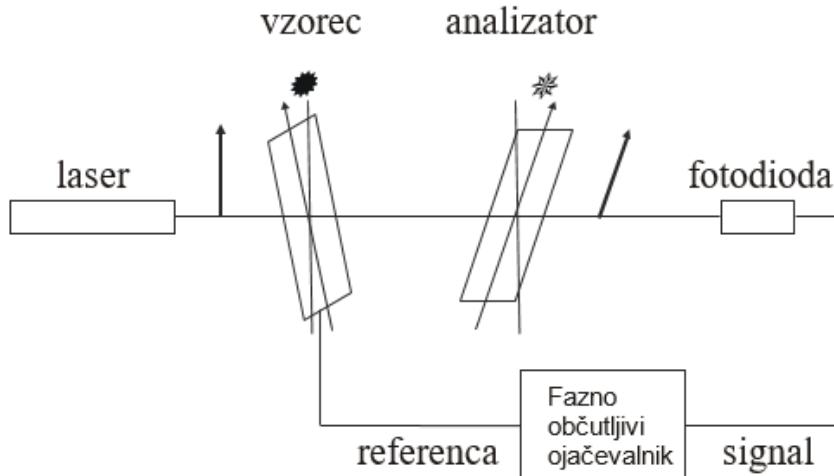
Referenčna napetost  $U_R$ , priklopljena na TK vzorec, ima obliko

$$U_R = U_0 \cos(\omega t). \quad (7)$$

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

$$S = S_1 \cos \omega t + S_2 \sin \omega t. \quad (8)$$

<sup>1</sup>Za matematične podrobnosti izračuna signala fazno občutljivega ojačevalca si pogledaj navodila vaje Fazno občutljivi ojačevalnik ali Elektronska spinska resonanca.



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

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

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

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

V tekočem kristalu je zasuk optične osi  $\psi$  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  $\frac{\pi}{2}$  pa kot imaginarni del enačbe 1:

$$\psi_r = \frac{\psi_0}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (10)$$

$$\psi_i = -\frac{\psi_0\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}. \quad (11)$$

Iz izmerjenih  $\psi_r$  in  $\psi_i$  lahko dobimo relaksacijski čas  $\tau$  s prilagajanjem gornjih izrazov meritvam. Imamo pa še drugo zanimivo možnost. Če narišemo razmerje med (10) in (11) v odvisnosti od frekvence  $\omega$ , dobimo premico, iz katere se z lahlkoto določi  $\tau$ .

## 10.2 Potelek dela

Najprej se s pomočjo navodil vaje *Fazno občutljivi ojačevalnik* in priročnikom **seznanite z delovanjem in uporabo fazno občutljivega ojačevalnika!**

Shemo meritve kaže slika 3. Navpično polarizirana svetloba iz laserja pada na vzorec, katerega optična os tvori s polarizacijo kot, ki je blizu  $45^\circ$ . Svetlobo, ki prepusti analizator, zaznamo s fotodiido. 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  $10\text{k}\Omega$ .

1. Na vzorec priključimo referenčno napetost iz FOO. Napetost naj ne bo prevelika, sicer bo signal popačen.
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 100Hz izmenični del signala začne padati in zaostajati za napetostjo na vzorcu.

3. Napeljite signal na vhod faznega detektorja. Nastavite občutljivost detektorja tako, da bo signal znotraj območja (vodoravna črta iz LED-ic prikazuje nivo signala glede na nastavljeno območje občutljivosti).
4. Izberite časovno konstanto izhodnega filtra blizu 1 s. Fazo reference najprej nastavite na 0. Pri neki fiksni frekvenci, npr. 20 Hz, izmerite realni del elektrooptičnega tekočega odziva pri nekaj vrednostih napetosti iz signalnega generatorja in se prepričajte, da je odziv sorazmeren z modulacijo do neke napetosti. (Signal izmerite tudi pri večjih napetostih, kjer je vidna nelinearnost odziva.)
5. Pri konstantni napetosti spreminjajte frekvenco in pri vsaki frekvenci komponenti signala v fazi in iz faze. Narišite obe komponenti signala kot funkciji frekvence in s prilagajanjem izrazov (10) in (11) določite relaksacijski čas. Narišite tudi razmerje med signalom pri fazi  $90^\circ$  in signalom pri fazi  $0^\circ$  v odvisnosti od frekvence in s prilagajanjem določite relaksacijski čas.