

# Fizikalni praktikum V: Elektrooptični pojav v feroelektričnem tekočem kristalu

Žan Ambrožič

15. 10. 2025

## 1 Uvod

Podolgovate molekule, ki se pri ne previsokih temperaturah orientacijsko uredijo, tvorijo tekoče kristale. Smektični kristali imajo plastovito strukturo. Feroelektrični smektični C\* kristali so iz molekul z velikim električnim dipolnim momentom prečno na vzdolžno smer molekul. V ravnini plasti se pojavi električna polarizacija, pravokotna na direktor (normala plasti), ki je sorazmerna s kotom nagiba. Optična os je vzporedna z direktorjem, orientacijska urejenost pa povzroča dvolomnost. V debelejših feroelektričnih tekočih kristalih se smer nagiba počasi spreminja po plasteh (v vijačni strukturi). Z obdelavo ali zunanjim električnim poljem lahko dosežemo polarizacijo plasti. Z dovolj majhnim razmikom med ploščicama se direktor uredi po celotnem vzorcu, smektične ravnine pa so pravokotne na zunanji omejevalni ploščici, polarizacija pa je v njuni ravnini. V zunanjem polju se polarizacija deloma poravna (pojav je linearen). V izmeničnem polju na zasuk vpliva tudi frekvenca (Debyeov relaksacijski model):

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

kjer je  $\tau$  relaksacijski čas in je odvisen od viskoznosti in debeline vzorca ( $h$ ). Pri prehodu polarizirane svetlobe skozi vzorec nastane med z optično osjo vzopredno in pravokotno komponento fazna razlika  $k\Delta nh$  ( $n$  je razlika lomnih količnikov v obeh smereh). Analizator prepušča le svoji osi vzporedne komponente:

$$E_p = E_0 (\cos(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\alpha) \sin(\beta) e^{ik\Delta nh}), \quad (2)$$

kjer sta  $\alpha$  in  $\beta$  kota med optično osjo in vpadno polarizacijo oz. analizatorjem. Za prepuščeno moč dobimo:

$$I_p = I_0 \left( \cos^2(\alpha - \beta) - \sin(2\alpha) \sin(2\beta) \sin^2 \left( \frac{k\Delta nh}{2} \right) \right). \quad (3)$$

Zaradi periodične spremembe optične osi, kota malo nihata ( $\pm\psi$ ), razvoj okoli  $\alpha_0, \beta_0$  nam v linearnem redu da:

$$I_p(\omega) = -2I_0 \sin(2(\alpha_0 + \beta_0)) \sin^2 \left( \frac{k\Delta nh}{2} \right) \psi(\omega). \quad (4)$$

Opazimo, da je modulacija največja ob pogoju  $\alpha_0 + \beta_0 = \pi/4$ . Moč merimo s fotodiodo preko delovnega upora, napetost na katerem je sorazmerna z močjo svetlobnega vpadlega toka. Signal izluščimo s pomočjo fazno občutjivega ojačevalnika, ker pa nihanji nista nujno v fazi, v splošnem za kosinusno referenco velja:

$$S = S_1 \cos(\omega t) + S_2 \sin(\omega t), \quad (5)$$

kjer je  $S_1$  amplituda signala v fazi. Iz ojačevalnika dobimo enosmerni signal:

$$U_{\text{out}} = \frac{U_0}{2} (S_1 \cos(\delta) + S_2 \sin(\delta)). \quad (6)$$

V kristalu je odziv na zunanje polje zakasnen, zato je  $\psi$  v splošnem kompleksen:

$$\Re(\psi) = \frac{\psi_0}{1 + (\omega\tau)^2}; \quad \Im(\psi) = -\frac{\psi_0\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (7)$$

## 2 Pripomočki

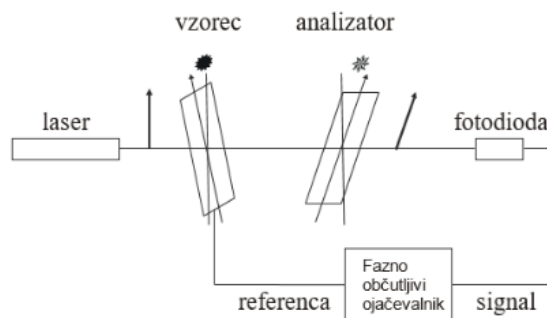
- Fazno občutljivi ojačevalnik,
- osciloskop,
- laser,
- tekoči kristal,
- analizator,
- fotodioda.

## 3 Naloga

1. Preveriti, da je realni del odziva do neke točke sorazmeren z amplitudo napetosti na tekočem kristalu.
2. Izmeriti odvisnost obeh komponent odziva od frekvence ter določiti relaksacijska časa.

## 4 Metodologija

Najprej preverimo, da prejemamo signal s fotodiode tako, da ga povežemo na osciloskop in po potrebi obračamo analizator. Ker je laser močan, direkten žarek zasiči fotodiodo in ne dobimo časovne odvisnosti, temveč le bolj ali manj stalno napetost. To popravimo s kosom papirja, ki ga postavimo pred fotodiodo in zmanjša gostoto vpadlega toka. Ko na osciloskopu dobimo val brez zasičenj, nastavimo še analizator tako, da je amplituda največja. S spreminjanjem napetosti oz. frekvence na tekočem kristalu opravimo meritve (pazimo na primerno izbiro območja na ojačevalniku). Napetost spreminjamo pri stalni frekvenci 20,000 Hz, frekvenco pa pri stalni napetosti 0,500 V (ki je na območju linearnega odziva).



Skica 1: Skica postavitve poskusa.

## 5 Meritve

$U$ [V] $\pm 0,001$ V	$\Re(\psi)$ [mV] ( $1 \pm 1\%$ )
0,010	6,5
0,020	12,9
0,050	32,4
0,030	19,2
0,040	25,5
0,060	38,4
0,070	44,7
0,080	51,0
0,090	57,0
0,100	64,9
0,110	69,9
0,120	76,4
0,160	101,0
0,140	88,3
0,180	114,0
0,200	130,0
0,220	140,0
0,240	152,0
0,260	165,0
0,280	178,0
0,300	190,0
0,330	209,0
0,360	230,0
0,390	250,0
0,420	269,0
0,450	288,0
0,500	333,0
0,550	353,0
0,600	386,0
0,650	419,0
0,700	449,0
0,800	504,0
0,850	531,0
0,900	555,0
0,950	576,0
1,000	615,0
1,100	636,0
1,200	661,0
1,300	682,0
1,400	700,0
1,500	716,0
1,700	732,0
2,000	745,0
2,500	753,0
3,000	759,0
5,000	767,0

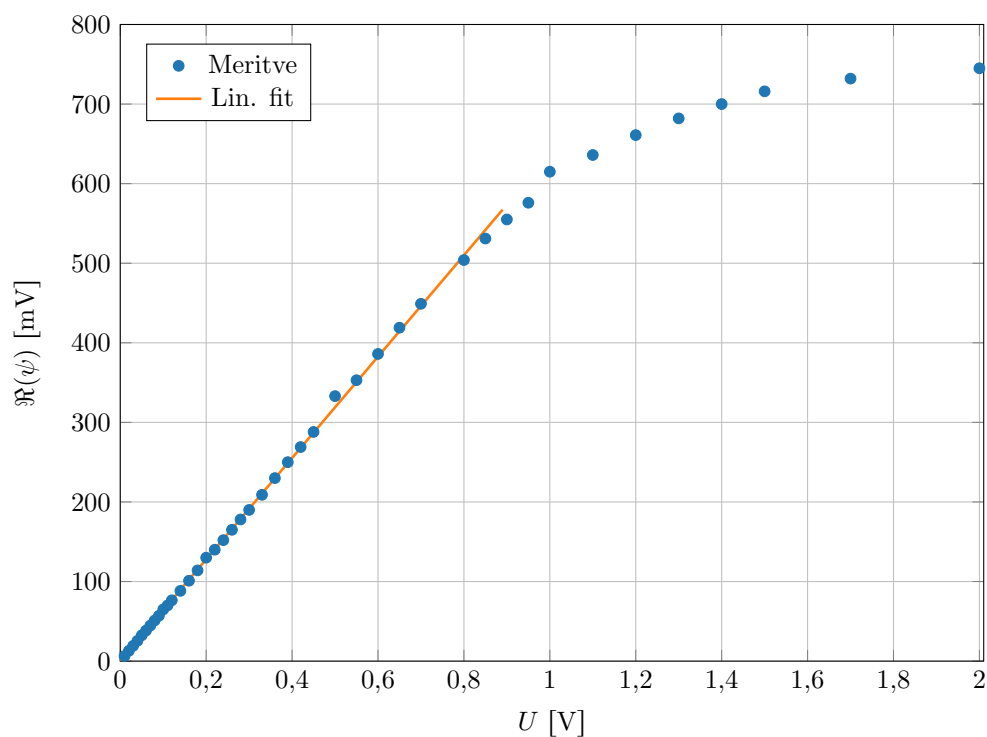
Tabela 1: Odvisnost realnega dela odziva od amplitude napetosti pri stalni frekvenci 20 Hz.

$U$ [V] $\pm 0,001$ V	$\Re(\psi)$ [mV] ( $1 \pm 1\%$ )	$\Im(\psi)$ [mV] ( $1 \pm 1\%$ )
10	443,0	-60,0
12	421,0	-107,0
15	383,0	-154,0
18	344,0	-182,0
20	314,0	-194,0
25	269,0	-208,0
30	228,0	-212,0
35	195,0	-211,0
40	167,0	-206,0
50	123,0	-194,0
60	92,4	-180,0
70	69,3	-167,0
80	51,6	-156,0
100	25,0	-133,0
120	9,9	-116,0
150	-4,8	-94,0
200	-17,4	-67,0
250	-20,9	-50,0
300	-21,8	-37,3
400	-19,7	-21,5
500	-16,3	-12,6
600	-13,3	-7,7
700	-10,8	-4,7
800	-8,9	-2,9
1000	-6,01	-1,01
1200	-4,33	-0,80
1500	-2,78	0,27
2000	-1,5	0,43
5000	-0,12	0,12
10000	0,00	0,03
15000	0,00	0,00

Tabela 2: Odvisnost odziva od frekvence pri stalni napetosti 0,500 V.

## 6 Analiza

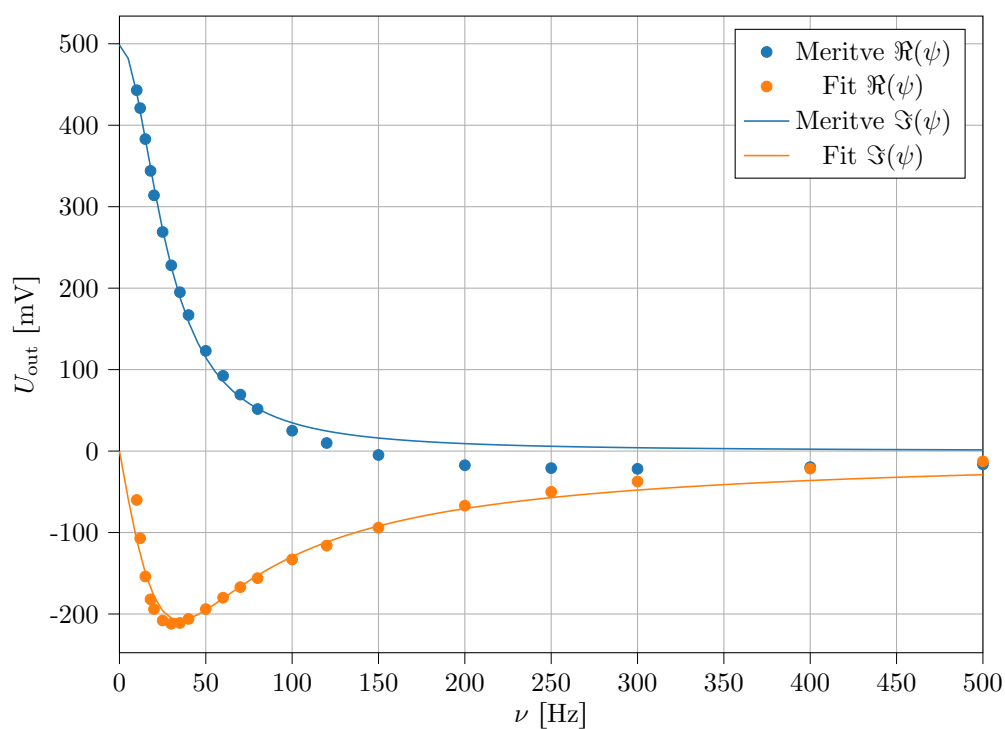
Ker je linearni trend prisoten le na začetku, premico prilagamo podatkom za napetosti do 0,85 V.



Graf 1: Odziv v odvisnosti od amplitude napetosti na tekočem kristalu pri stalni frekvenci.

Za parametra najboljše premice ( $y = kx + n$ ) dobimo:

$$k = 0,637 \pm 0,003 \quad n = (0,53 \pm 0,15) \text{ mV}$$



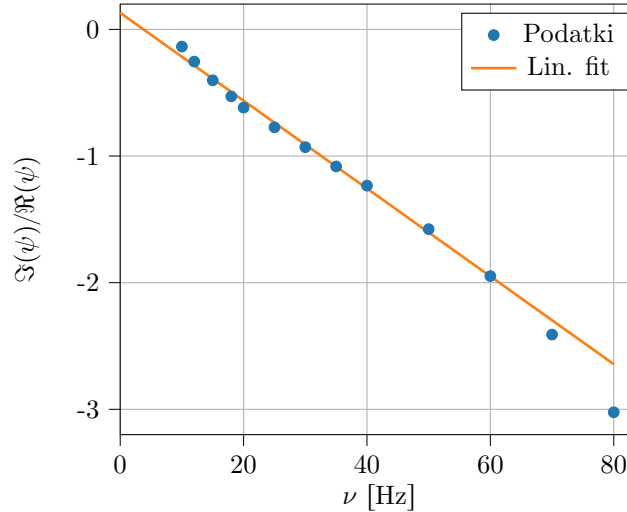
Graf 2: Odziv v odvisnosti od frekvence na tekočem kristalu pri stalni amplitudi napetosti.

Parametri prilegajočih se funkcij (7):

$$\psi_0(\Re) = (498 \pm 12) \text{ mV} \quad \tau(\Re) = (5,8 \pm 0,2) \text{ ms} \quad (8)$$

$$\psi_0(\Im) = (415 \pm 9) \text{ mV} \quad \tau(\Im) = (4,5 \pm 0,2) \text{ ms} \quad (9)$$

Ker vrednosti realne komponente prečkajo ničlo, je smiselno gledati razmerje le za frekvence, pri katerih je realna komponenta dovolj velika (do 60 Hz).



Graf 3: Razmerje komponent odziva v odvisnosti od frekvence.

Za parametra najboljše premice ( $y = kx + n$ ) dobimo:

$$k = (-3,47 \pm 0,08) \cdot 10^{-2} \text{ Hz}^{-1} \quad n = 0,13 \pm 0,03$$

Iz naklona lahko določimo relaksacijski čas:  $\tau = k/(2\pi) = (5,52 \pm 0,13) \cdot 10^{-3} \text{ s}$ .

## 7 Rezultati

Za območje linearnosti lahko (pri 20 Hz) vzamemo interval med 0 V in  $(0,80 \pm 0,05) \text{ V}$ . Izračuni relaksacijskega časa se razhajajo, kar je najverjetneje posledica manjše napake v kotu analizatorja, ki smo ga nastavili pri 20 Hz in 0,2 V na tekočem kristalu. Ker dosežemo maksimum, kjer je odvod glede na spremembo kota analizatorja 0, imamo nekaj stopinj negotovosti. To je verjeten razlog, ker se pri višjih frekvencah spremeni predznak realne komponente, ki se sicer ne bi smel (sodeč po enačbi 7). Tudi  $\psi_0$  se razlikuje med komponentama. Nestalno temperaturo tekočega kristala (temperatura vpliva na viskoznost, ta pa na relaksacijski čas) med samo meritvijo lahko izločimo iz dveh razlogov: 1) tekoči kristal je bil v času meritev že nekaj časa prižgan, zato se je temperatura že v veliki meri stabilizirala 2) prve meritve so bile opravljene kvazi-logaritemsko (1, 2, 5, 10, itn.), da smo dobili občutek o odvisnosti (kje bo potrebnih več merskih točk) in te točke ne odstopajo od ostalih meritev, narejenih kasneje. Edini možen vpliv temperature bi bil, da je bil kristal še neogret v času nastaljanja analizatorja. Dobljene vrednosti relaksacijskega časa se gibljejo med 4,5 ms in 5,8 ms, vendar je dejanska vrednost sodeč po grafih bolj na spodnji strani intervala ali celo pod njo. Še opomba glede merskih napak točk na grafih: v tabeli so napake ocenjene na podlagi nihanja vrednosti (ki so sicer prikazane na 4 oz. 5 mest natančno). Napake bi bile na vseh grafih manjše od narisanih pik, saj je tudi pri deljenju dveh meritev napaka manjša od 2%. Napake koeficientov so določene preko kovarianc pri prileganju premic oz. funkcij po metodi najmanjših kvadratov.