

# Tekući kristali

---

**Mijailović, Vito**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:938292>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
Kemijски odsjek

Vito Mijailović

Student 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

# TEKUĆI KRISTALI

## Završni rad

Rad je izrađen u Zavodu za fizikalnu kemiju

Mentor rada:

Prof. Dr. Sc. Tajana Begović

Zagreb, 2024.



Datum predaje prve verzije Završnog rada: 30. svibnja 2024.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita: 28. lipnja 2024.

Mentor rada: Prof. Dr. Sc. Tajana Begović

Potpis:



## Sadržaj

§ SAŽETAK.....	VII
§ 1. UVOD .....	1
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME.....	2
2.1. Primjer sinteze tekućih kristala.....	2
2.2. Svojstva tekućeg kristala .....	3
2.3. Uređenost .....	9
2.4. Primjena u LCD.....	15
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XVIII



## § Sažetak

Tekući kristal je termodinamički stabilno stanje neke tvari u kojem postoji anizotropija fizikalnih svojstava ali ne i definirana kristalna struktura. Molekule koje tvore tekuće kristale su organske molekule građene od rigidne „jezgre“ i fleksibilnih „repova“. Sinteza tekućih kristala je odavno poznata, te je lako provediva poznavajući osnovne postupke organske sinteze. Fizikalna svojstva tekućih kristala nalaze se između tekuće i čvrste agregatne faze. Tekuća kristalna faza ima određena svojstva koja ju povezuje sa tekućom fazom, poput izotropnog gibanja određenih dijelova molekula. Svojstva koja povezuju tekuće kristale i čvrstu kristalnu fazu su anizotropija određenih svojstava poput viskoznosti, adsorpcije, nekih optičkih svojstava i drugih obilježja. Tekuće kristale možemo podijeliti po načinu na koji nastaju, pa tako imamo termotropne koji nastaju ovisno o temperaturi tvari, te liotropne koji nastaju u otopini ovisno o koncentraciji i temperaturi. Termotropni tekući kristali se detaljnije mogu podijeliti po njihovoj strukturi, odnosno rasporedu molekula. Osnovne skupine faza termotropnih tekućih kristala su nematična, smektična i kiralna faza. U ovom radu se uglavnom razrađuje tema nematične faze u detalje pošto zahtjeva najmanje složenih parametara za objašnjenje njenih dielektričnih i optičkih svojstva. Razvojem znanosti dolazi do sve veće praktične primjene tekućih kristala, pa su tako najpoznatiji primjer tekućih kristala *Liquid Crystal Display* čelije koje su našle primjenu u suvremenoj tehnologiji većine zaslona koji nas svakodnevno okružuju.





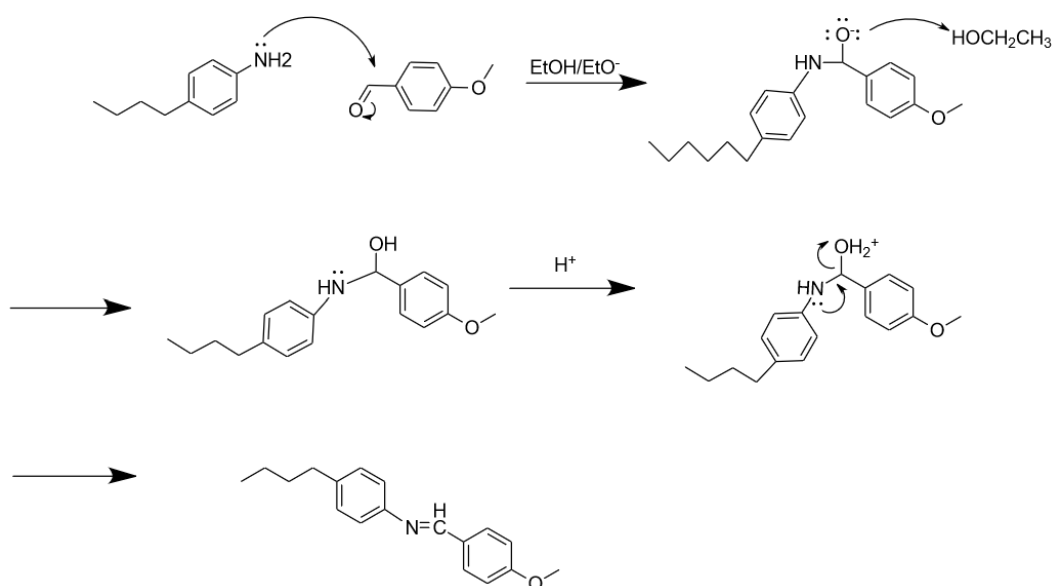
## § 1. UVOD

Tekući kristali su specifična faza tvari koja pokazuje svojstva i tekućina i krutih tvari. Otkriveni su u 19. stoljeću, a od tada su postali predmet istraživanja zbog svoje široke primjene. Pojam “tekući kristali” prvi je put upotrijebio austrijski botaničar Friedrich Reinitzer 1888. godine kada je proučavao tvar poznatu kao kolesteril benzoat.<sup>9</sup> Reinitzer je primijetio da ova tvar, kada se zagrijava, prolazi kroz dvije točke taljenja. Na prvoj točki taljenja, tvar bi se pretvorila iz krute u mutnu tekućinu. Na drugoj točki taljenja, mutna tekućina bi postala prozirna tekućina.<sup>9</sup> Ova dva stanja, koja su kasnije nazvana nematična i smektična faza, bila su prva otkrića faza tekućih kristala. Tekući kristali mogu postojati u različitim fazama, uključujući nematičnu, smektičnu i kiralnu fazu. Nematici su najjednostavnija faza tekućih kristala, u kojoj su molekule poredane u određenom smjeru, ali nemaju određen redoslijed u prostoru. Smektična faza ima dodatni stupanj uređenosti, gdje su molekule poredane u pravilne slojeve. Kiralna faza, s druge strane, ima molekule koje su poredane u slojevima i dodatno imaju stupanj zakrenutosti oko neke osi.<sup>1</sup> Struktura tekućih kristala je ono što ih čini jedinstvenima i daje im specifična svojstva. Molekule tekućih kristala su obično duguljaste ili pločaste i imaju tendenciju da se poravnaju u određenom smjeru nekog vektora u prostoru, što je poznato kao direktor.<sup>6</sup> Ova poravnatost molekula daje tekućim kristalima njihova jedinstvena svojstva, uključujući sposobnost mijenjanja orijentacije pod utjecajem nekog vanjskog utjecaja, poput električnog polja, što je kasnije našlo svoju široku primjenu u tehnologiji zaslona. Fizikalna svojstva tekućih kristala, uključujući njihovu viskoznost, elastičnost, dielektrična svojstva i optička svojstva, ovise o specifičnoj fazi tekućeg kristala i vrsti molekula. Na primjer, nematici su manje viskozni od smektika, a kiralni tekući kristali imaju veću viskoznost od ostalih tipova tekućih kristala. Tekući kristali imaju širok spektar primjena, a najpoznatija je u tehnologiji zaslona. Tekući kristali koriste se u televizorima, računalnim monitorima, pametnim telefonima i drugim uređajima s digitalnim zaslonima, široko poznatim kao LCD (engl. *Liquid Crystal Display*) ekrani. Osim toga, tekući kristali koriste se u termodinamičkim sustavima zbog njihovih specifičnih svojstava, na primjer u optičkim vlaknima i mikroskopiji, u farmaciji za dostavu lijekova, te raznim drugim područjima.<sup>6</sup>

## § 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

### 2.1. Primjer sinteze tekućih kristala

Prva tvar za koju je uočeno stanje tekućeg kristala je kolesteril benzoat. Sinteza kolesteril benzoata se sastoji od jednostavnog procesa kloriranja kolesterola.<sup>5</sup> Procesima organske sinteze omogućen je razvoj raznih tvari sa svojstvima tekućeg kristala, poput najviše proučene tvari, para-metoksibenzil para-N-butilanilina (MBBA). MBBA je tvar koja spada u termotropne nematične tekuće kristale sa faznim prijelazom iz krutine u tekući kristal pri sobnoj temperaturi.<sup>5</sup> Termotropni tekući kristali su tip tekućih kristala koji nastaju u određenom temperaturnom području, dok nam pridjev „nematični“ govori o međusobnom rasporedu molekula u tekućem kristalu (detaljnija razrada ovih pojmova se nalazi u poglavlju 2.2.1). Razlog pristupačnosti proučavanju ove tvari je njegoja relativno jednostavna sinteza, koju je moguće provesti u osnovnim laboratorijskim uvjetima uz odgovarajuće reagense. Reagensi su komercijalno dostupne kemikalije, p-metoksibenzaldehid i p-butilanilin. Za pripravu MBBA potrebno je dodati jednake ekvivalente p-metoksibenzaldehida i p-butilanilina u okruglu tikvicu sa nastavkom za refluks. Reakcijska smjesa se refluksira oko sat vremena, tako da se smjesa oprezno zagrije do pojave mjehurića kojih treba biti što manje.<sup>3</sup> Nakon toga se otopina podvrgne destilaciji sa Dean-Stark nastavkom, kako bi se uklonio nastali azeotrop pošto se kao otapalo koristi etanol, a uz produkt također nastaje i voda. Nastali produkt je sakupljan pri temperaturi od 160 °C. Dobiveni produkt žute je boje, te je filtriran i ispran eterom kako bi se pročistio.<sup>8</sup> Mehanizam kojim se odvija reakcija sinteze MBBA je osnovni mehanizam nukleofilne adicije primarnog amina na karbonilnu skupinu, te kao produkt nastaje imin, odnosno Schiffova baza:<sup>5</sup>



Slika 1. Mehanizam odvijanja reakcije sinteze MBBA

## 2.2. Svojstva tekućeg kristala

Tekući kristali su građeni pretežito od organskih molekula koje se mogu naći u stanju koje se nalazi između tekućeg i čvrstog agregatnog stanja. To stanje nazivamo tekuća kristalna faza te ona posjeduje neka svojstva koja su svojstvena kako tekuću tako i čvrstu kristalnu fazu.<sup>6</sup> Svojstva koja uočavamo kod tekućih kristala su gibanja određenih molekula, što nalikuje tekućinama. Plinsku i tekuću fazu nazivamo izotropnom pošto sva njihova svojstva ne ovise o smjeru promatranja.<sup>1</sup> Molekule tekućih kristala imaju oblik izduženog valjka koji je kod većine tekućih kristala, pa tako i kod MBBA izgrađen od „molekularne jezgre“ građene od povezanih benzenskih prstenova i „fleksibilnih repova“ odnosno alkilnih lanaca.<sup>1,4</sup> Takva građa molekula uvelike utječe na fizikalna svojstva tvari, poput viskoznosti. Molekule se međusobno orijentiraju ovisno o disperznim, dipol-dipol interakcijama i vodikovim vezama koje ih drže na okupu, no generalno je privlačenje između jezgara različitih molekula jače nego intermolekularno privlačenje između molekularne jezgre jedne molekule i fleksibilnih repova druge. Stanje kristala je prisutno kad intermolekularne interakcije prevladaju kinetičke i entropijske doprinose u energiji sustava, dok je kod tekućina obrnut slučaj, iz čega možemo zaključiti da je stanje tekućeg kristala vrlo nestabilno.<sup>2</sup> Povećanjem udaljenosti među molekulama intermolekularne sile slabe te položaj molekula u prostoru ima sve veću ulogu na formiranje faze u kojoj se tvar nalazi, pa tako pri temperaturnom rasponu većem od temperature

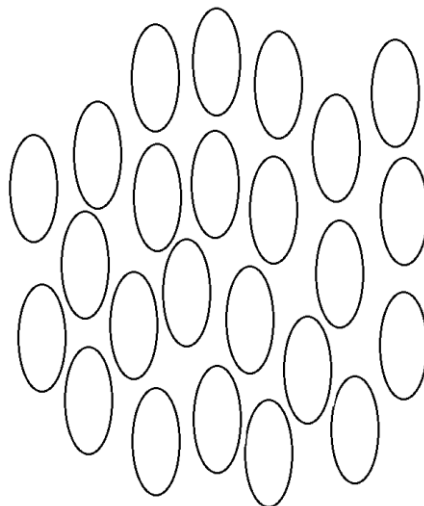
pri kojoj je tvar stabilna kao krutina, odnosno manjem od temperature nastanka tekućine nastaje tekući kristal. U tom temperaturnom području čvrsto stanje je i dalje moguće i stabilno ali molekule posjeduju mogućnost gibanja uz određeno ograničenje uzrokovano međusobnim paralelnim položajem. Tekuća kristalna faza također može posjedovati i orijentacijsku, odnosno translacijsku uređenost koja je vidljiva u anizotropnim svojstvima tipičnim za kristalne sustave.<sup>1</sup> Anizotropija je naziv za svojstva koja ovise o smjeru promatranja pa je tako u tekućim kristalima uočena anizotropija određenih svojstava poput viskoznosti, absorpcije svjetlosti, anizotropnosti u optičkim svojstvima poput brzine svjetlosti u različitim smjerovima. Postoje dvije osnovne faze tekućih kristala, to su termotropna i liotropna faza. Termotropna faza egzistira u određenom temperaturnom intervalu, dok liotropna faza uz ovisnost o temperaturi ovisi i o koncentraciji molekula tekućeg kristala u otopini.<sup>2</sup>

### 2.2.1 Termotropna faza

Termotropna faza je vrsta faze tekućih kristala koji nastaju u uskom temperaturnom području između krutog i tekućeg agregatnog stanja, taj raspon je najčešće od 0 °C do 10 °C, a do nastanka termotropne faze dolazi zagrijavanjem krute kristalne faze. Zagrijavanjem dolazi do narušavanja kristalne strukture, ali zbog jakih intermolekulskih sila dio uređenosti je očuvan pa molekule posjeduju neki oblik usmjerenja, ovisno o vrsti termotropne faze. Ovisno o usmjerenju molekula u prostoru razlikujemo nematičnu, kiralnu i smektičnu termotropnu fazu.<sup>1,2</sup>

Nematična faza je najmanje uređena od svih navedenih faza. Molekule se u njoj nalaze usmjerene duž jedne osi u jednoj ravnini, ali ne posjeduju definiran položaj na osi. Molekule u nematičnoj fazi nisu podijeljene u pojedinačno odvojene dijelove već su sve molekule orijentirane u jednom smjeru, te mogu biti paralelne s obzirom na dugu os molekule, ali najčešće nisu.<sup>1</sup> Jedinstveno svojstvo nematične faze je njena sposobnost da pod različitim uvjetima, poput prolaska iona ili struje dolazi do difuzije svjetlosti. Prethodno prozirni nematični tekući kristal pod utjecajem struje se zamuti, a prestankom toka struje se vrati u ishodno stanje. Ta pojava je poznata kao elektrooptički efekt, te je našla svoju primjenu u modernoj tehnologiji poput LCD ekrana.<sup>6</sup> Molekule koje tvore nematičnu mezofazu su anizotropnog oblika, na slici 2 prikazane ovalnim oblikom, često su građene od rigidne molekulske okosnice koja definira dugu os molekule. Pojava tekućih kristala je uočena kod

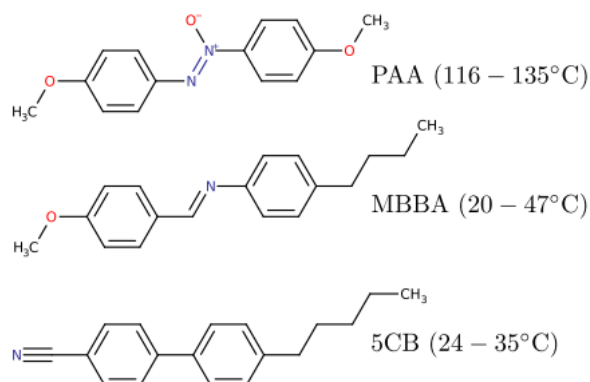
tvori koje su građene od molekula koje posjeduju ravne segmente poput benzenskih prstenova, te sadrže lako polarizabilne funkcijske skupine sa jakim dipolnim momentom.<sup>2</sup>



Nematična faza

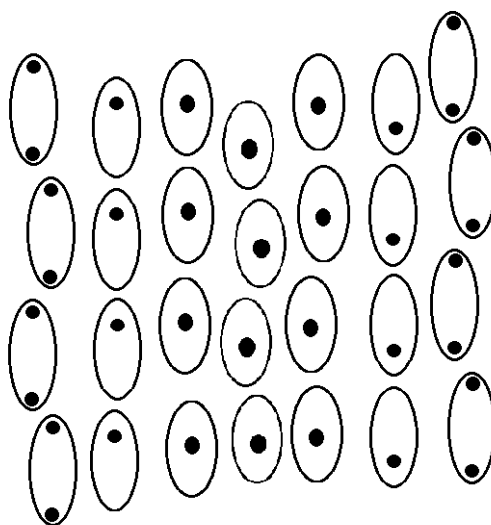
Slika 2. Shematski prikaz rasporeda molekula u nematičnoj mezofazi tekućeg kristala<sup>2</sup>

Neke od karakterističnih molekula koje tvore nematičnu fazu su para-azoksianisol (PAA), kemijska vrsta kod koje je nematična faza prisutna između 116 °C i 135 °C, 4-pentil-4-cijanobifenil (5CB) koji posjeduje nematičnu fazu između 24°C i 35°C, te N-(p-metoksibenziliden)-p-butilanilin (MBBA), čija je sinteza opisana u poglavlju 2.1, te je nematična faza prisutna u rasponu temperature od 20°C do 47°C.<sup>2</sup>



Slika 3. Strukture molekula kod kojih je vidljiv uzorak ravnih segmenata koje tvore nematičnu fazu tekućih kristala (u zagradama su navedeni intervali u kojima se pojavljuje nematična faza).

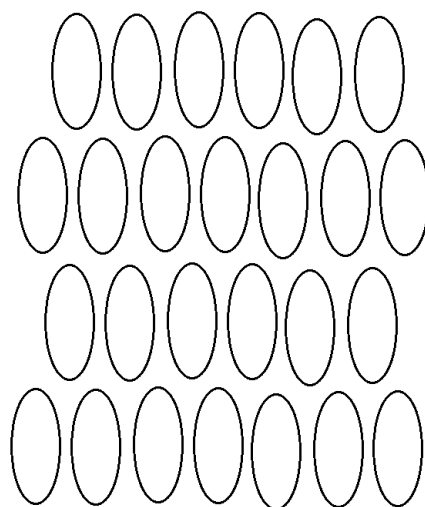
Kiralna faza je uređenija od nematične pošto se molekule nalaze u jednoj ravnini te je svaki sljedeći sloj zakrenut za određeni kut s obzirom na prijašnju ravninu, što rezultira spiralnim uređenjem susjednih slojeva, pa je također možemo zvati i zakrivljena nematična faza (slika 3). Ovaj oblik termotropne faze je prvi put uočen kod derivata kolesterola, kao na primjer kolesteril benzoata pa se ova faza naziva i kolesterična faza.<sup>1,2</sup>



Kiralna faza

Slika 4. Struktura molekula u kiralnoj fazi tekućih kristala (točke predstavljaju krajeve molekula radi lakše vizualizacije rotacije slojeva)<sup>2</sup>

Smektična faza je od svih navedenih faza najuređenija te je građena od jednakih i paralelnih slojeva molekula usmjerene točno u smjeru određene osi. Molekule u smektičnoj fazi su istog smjera te se nalaze u istoj ravnini koje su međusobno paralelne, što uvelike utječe na optičku aktivnost uzorka, odnosno dolazi do pojave duple refrakcije elektromagnetskog zračenja, što je moguće vizualizirati korištenjem polarizacijskog mikroskopa. Smektična kao i nematična faza optički se ponašaju poput jednoosnog kristala, odnosno posjeduju dva indeksa loma pa je tako brzina svjetlosti koja putuje kroz fazu ovisna o smjeru u kojem svjetlost putuje.<sup>2</sup>



Smektična faza

Slika 5. Raspored molekula u smektičnoj fazi tekućih kristala<sup>2</sup>

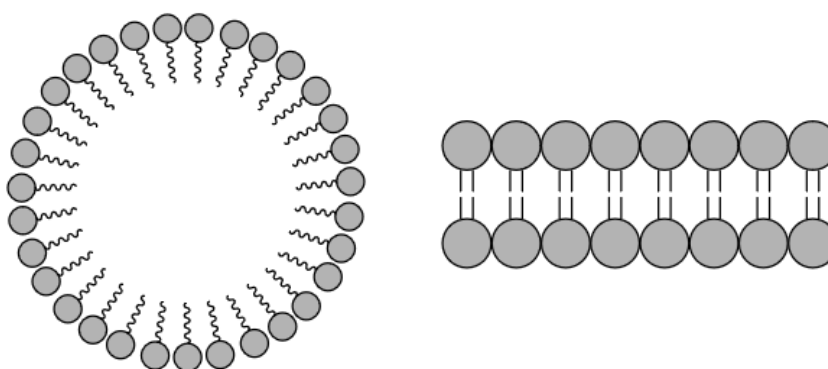
Kod tvari koje imaju samo jednu vrstu termotropne faze dolazi do dvije fazne transformacije, iz čvrstog stanja u tekući kristal, te iz tekućeg kristala u izotropnu tekućinu. Termodinamički gledano ove fazne transformacije su identične onima koje se odvijaju i kod drugih tvari koje ne posjeduju svojstva tekućih kristala. Strogo gledano, u ravnoteži je razlika standardne Gibbsove energije nula, pa je  $\Delta H^\circ = T\Delta S^\circ$ .<sup>5</sup> Neke tvari mogu imati i više od jedne tekuće kristalne faze te njih nazivamo polimorfima. Na primjer tvar može imati smektičnu fazu koja se daljnjim zagrijavanjem mijenja u nematičnu fazu.

### 2.2.2. Liotropna faza

Tekući kristali u liotropnoj fazi nastaju isključivo u otopinama, pošto je njihovo postojanje uvjetovano određenom koncentracijom tvari u otopini. Molekule koje tvore ovu fazu se oblikom ne razlikuju od molekula koje tvore termotropnu fazu, ali je njihova građa različita.<sup>2</sup> Molekule koje tvore liotropnu fazu građene su od hidrofilnog i hidrofobnog dijela, te ih nazivamo amfipatskim molekulama. Hidrofilni dio ili „glava“ molekule je građena od polarnog, nabijenog dijela koji se u vodenim otopinama orijentira prema molekulama vode, dok se hidrofobni dio ili „rep“ molekule građen uglavnom od dugih alkilnih lanaca orijentira tako da bude što dalje od molekula vode.<sup>10</sup> Zbog navedenih svojstava amfipatske molekule u vodenim otopinama imaju tendenciju samoorganizacije u micelle i druge oblike kako bi smanjile

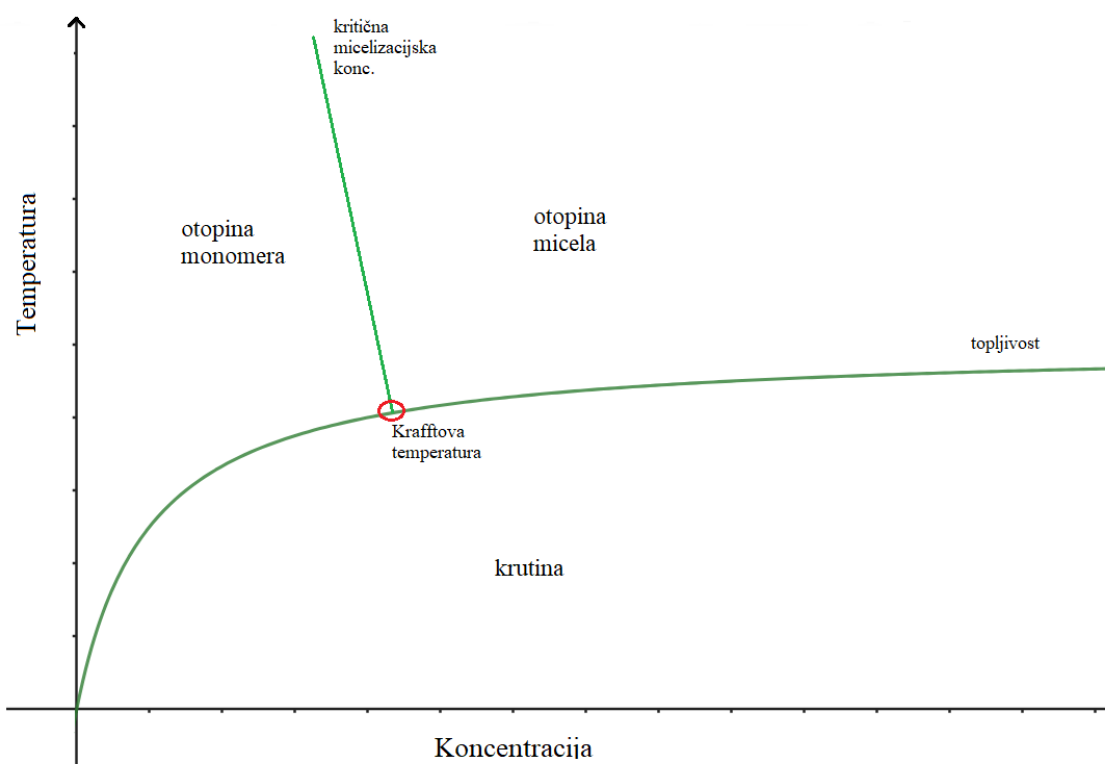


specifičnu površinu. Do nastajanja micela dolazi kada je koncentracija otopljene tvari veća od kritične micelizacijske koncentracije, te se u vodi molekule orijentiraju tako da su polarne glave okrenute prema van a nepolarni repovi prema unutrašnjosti micela.<sup>10</sup> Ovisno o veličini molekule koja se otapa, ta koncentracija se mijenja, te uglavnom produljenjem hidrofobnog dijela dolazi do smanjenja vrijednosti kritične micelizacijske koncentracije. Pri niskim koncentracijama prevladavat će sferični oblik micela, dok povećanjem koncentracije dolazi do nastajanja drugih kompleksnijih samoorganizacijskih oblika poput dvoslojnih sfera i cilindara, dvosloja ili cilindara.<sup>10</sup>



Slika 6. Neke od mogućih vrsta samoorganizacijskih oblika (lijevo micela, desno dvosloj; nacrtano korištenjem ChemDraw alata)

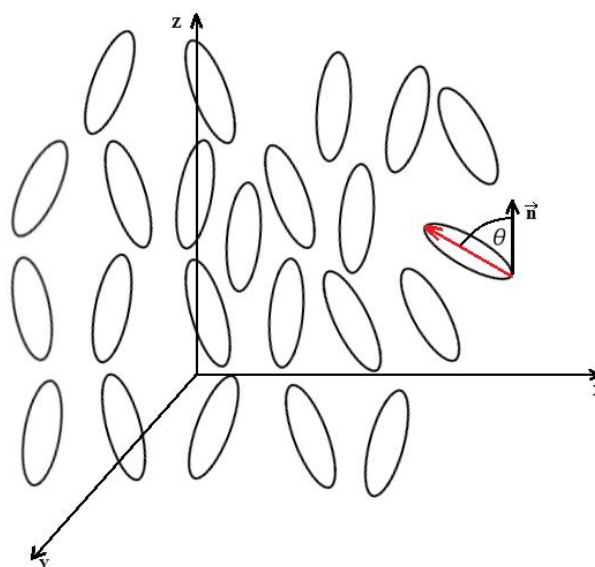
Topljivost pa tako i najveća koncentracija koja se može postići otapanjem neke tvari u otapalu uvelike ovisi o temperaturi. Pri niskoj koncentraciji u otopini se nalaze samo monomerne molekule, a sniženjem temperature se smanjuje i njihova topljivost te može doći i do taloženja čvrste tvari. Povećanjem temperature dolazi do povećanja topljivosti tvari (u slučaju da je otapanje te tvari endoterman proces), i naknadnim dodavanjem liotropne tvari u otopinu dolazi do nastajanja micela. Micele u otopini nastaju iznad specifične temperature koja se naziva Kraftova temperatura i iznad kritične micelizacijske koncentracije, koja također ovisi o temperaturi. Kraftova temperatura je temperatura pri kojoj su kritična micelizacijska koncentracija i topljivost tvari jednake te je specifično svojstvo za svaku tvar sa ovim svojstvima.<sup>2,10</sup>

Slika 7. Fazni dijagram tekućih kristala liotropne faze<sup>10</sup>

### 2.3. Uređenost

Promatranjem tekućih kristala i njihovih faza te izduženih molekula od kojih su građeni može se zaključiti da se molekule nalaze usmjerene u određenom smjeru te da postoji određena uređenost. Ta uređenost je definirana orijentacijom dužih osi svih molekula u istom smjeru i mogućnosti molekula da vibriraju. Kao posljedicu toga dolazi do anizotropije u svojstvima poput susceptibilnosti, permitivnosti, permeabilnosti, viskoznosti i drugim svojstvima.<sup>2</sup> Navedena svojstva mogu se opisati tenzorima koji su definirani stanjem uređenosti, ali navedena svojstva također ovise i o drugim molekularnim svojstvima pa ih ne možemo uzeti kao uvjet za uređenost sustava. Povećanjem kompleksnosti potrebno je za potpuni opis sustava sve više parametara uređenosti, pa će se u ovom radu razmotriti najjednostavnija faza tekućih kristala, a to je nematična faza. Postavljeni model proučavanja je sustav određenog volumena koji sadrži veliki broj molekula koje su u prosjeku sve orijentirane u istom smjeru, te je taj smjer proizvoljan. Prosječna orijentacija svih dugih osi nekog skupa molekula naziva se direktor (engl. *director*).<sup>2</sup> Direktorom se prikazuje jedinični vektor u nekom prosječnom

smjeru. Kod nematične faze javlja se specifičan slučaj u kojem dva direktora, odnosno vektora suprotnog smjera, zapravo opisani jednim vektorom iste orijentacije, a to dolazi kao posljedica kvadrupolarne simetrije ove faze.<sup>6</sup> Definirani direktor ne sadrži informacije o stupnju uređenosti sustava molekula, ali je potreban za definiranje parametra uređenosti, pa tako možemo imati nematičnu i smektičnu fazu sa istim direktorom, no smektična faza je sama po sebi uređeniji sustav zbog vlastitog rasporeda molekula u slojeve.<sup>2,6</sup>



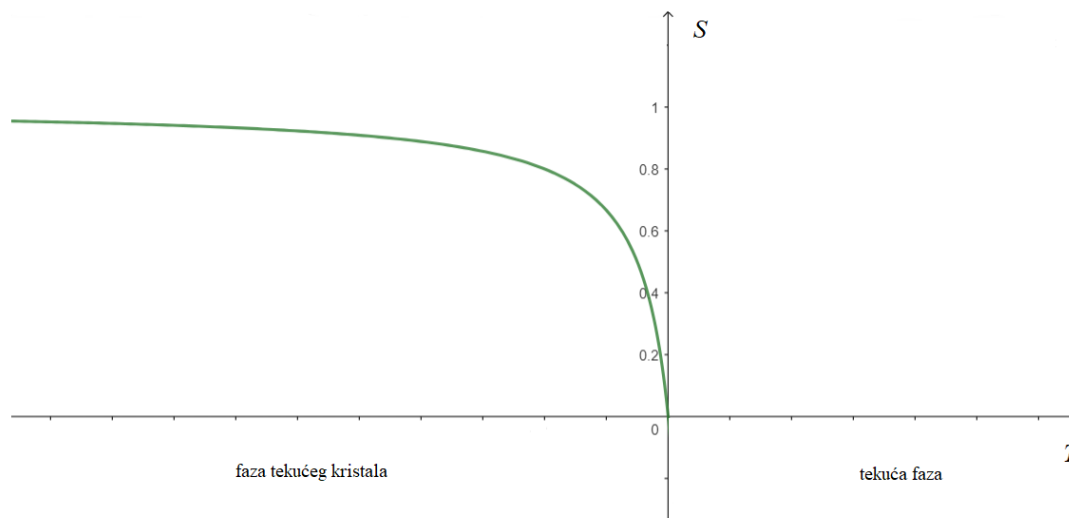
Slika 8. Raspored molekula nematične faze sa prikazanim kutom  $\vartheta$  između direktora  $\vec{n}$  i molekularnog direktora označenog crvenim vektorom<sup>2</sup>

Kako bi dobro opisali uređenost sustava potrebno je definirati neka svojstva pomoću kojih se definira željeni parametar. Direktor i parametar moraju biti nezavisni, odnosno prosječan smjer u prostoru u kojem se nalaze izdužene molekule ne smiju utjecati na iznos parametra koji bi trebao opisati simetriju faze, ali mora biti povezan sa distribucijom molekula i kutom koji pojedinačna molekula tvori sa direktorom.<sup>6</sup> Za nematičnu fazu bi tako parametar trebao ostati isti pri rotaciji svake molekule za  $180^\circ$ . Parametar bi također trebao biti normiran tako da za potpuno neuređeni sustav iznosi 0, a za idealni slučaj kad su molekule u istom smjeru iznosi 1. Promatranjem sustava kao cjeline zaključujemo da su molekule orijentirane u prosjeku u smjeru direktora, no promatranjem pojedinačnih  $N$  molekula u odnosu na direktor možemo zaključiti da se većina njih ne nalazi u identičnom usmjerenju, već da postoji neki kut  $\vartheta$  koji predstavlja

odstupanje od prosjeka. Pošto molekule vibriraju u prostoru, taj će se kut mijenjati prolaskom vremena. Možemo zaključiti da je uređenost sustava niska ako imamo veliku vjerojatnost pronalaska velikog kuta između molekule i direktora, te vrijedi i obrnut slučaj u kojem je uređenost visoka pri slučaju da je većina molekula u smjeru direktora. Zbog navedenih uvjeta uvodi se „molekularni direktor“ (označen crvenim vektorom na slici 7). To je vektor koji definira trenutni položaj  $i$ -te molekule, odnosno njene duge osi u vremenu.<sup>2</sup> Uvođenjem molekularnog direktora kut  $\vartheta_i$  definira kut između direktora  $\vec{n}$  i molekularnog direktora  $i$ -te molekule  $n_i$ . Problematiku nezavisnosti stupnja uređenosti o smjeru u kojem je prosječna izdužena os molekule bi riješili uprosječivanjem  $\vartheta_i$  preko svih molekula.<sup>6</sup> Uprosječivanje molekularnog direktora na direktor bi u ovom slučaju rezultiralo nulom zbog kvadrupolarne simetrije sustava, pa to nije dobra mjera. Sljedeća mogućnost je kvadriranje funkcije kuta koja zbog simetrije neće iščeznuti, na primjer  $\cos^2\vartheta_i$ , no njen prosjek u slučaju potpune neuređenosti ne iznosi 0, već je  $\langle \cos^2\vartheta_i \rangle = 1/3$ .<sup>6</sup> Rješenje ovog problema nalazi se u renormalizaciji funkcije, odnosno oduzimanjem  $1/3$  od ukupne funkcije kako bi dobili nulu pri potpuno neuređenom sustavu. Sada parametar  $S$  iznosi  $2/3$  u idealno uređenom sustavu, pa se cijela funkcija množi sa  $3/2$  kako bi se dobio broj jedan, te tako parametar uređenosti za nematičnu fazu iznosi:

$$S = \frac{3}{2} \left( \langle \cos^2 \theta_i \rangle - \frac{1}{3} \right) \quad (1)$$

Kako parametar  $S$  intrinzično ovisi o vibraciji molekula, a vibracija molekula je povezana sa temperaturom, tako će i parametar  $S$  ovisiti o temperaturi. Ovisnost je prikazana na slici 8. Fazni prijelaz iz izotropne (tekuće) faze u nematičnu je diskontinuiran pa parametar  $S$  iznosi nula dok se sustav nalazi u izotropnoj fazi sve do temperature bistrenja, u kojoj dolazi do formacije tekućeg kristala i vrijednost naglo naraste, te daljnjim smanjenjem temperature parametar teži idealnom slučaju.<sup>6</sup>



Slika 9. Uređenost sustava nematične faze ovisno o temperaturi <sup>6</sup>

Parametar  $S$ , odnosno uređenost sustava nije moguće direktno mjeriti, pa se mjeri preko svojstava poput birefringencije (dvolom), dijamagnetičnosti ili drugih proporcionalnih svojstava koje je moguće aproksimirati za dani parametar. Suvremena znanost koristi računalne metode i aproksimacije kako bi što preciznije odredila parametre tekućih kristala.<sup>2</sup>

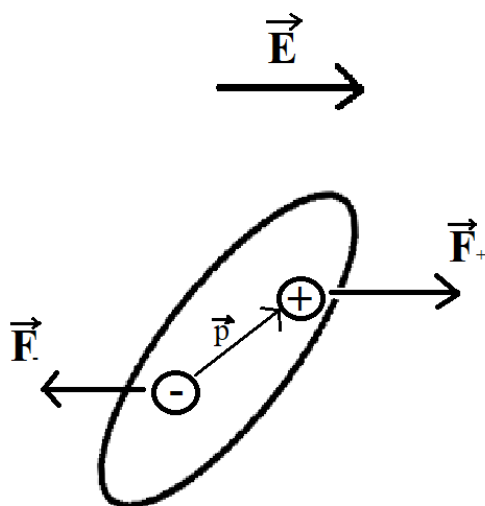
### 2.3.1 Dielektrična svojstva tekućih kristala

Polarizacija molekula općenito ovisi o njihovoj orijentaciji u odnosu na vanjsko električno polje, te je to anizotropno svojstvo uočeno i kod izduženih molekula tekućih kristala. Polarizacija izduženih molekula je specifična pošto postoje posebni slučajevi orijentacije molekula, pa tako molekule mogu biti paralelno ili okomito orijentirane s obzirom na električno polje.<sup>1,7</sup> U slučaju paralelnosti inducirana polarizacija molekule je najveća, a u slučaju okomitosti električnog polja na dugu os izdužene molekule polarizacija je najmanja. U nekim posebnim slučajevima to ne mora biti striktno pravilo za određivanje polarizacije, kao na primjer u materijalima u kojima su molekule uređene. Polarizabilnost molekula koje se nalaze u uređenom sustavu opisuje se pomoću električne susceptibilnosti.<sup>4</sup> Električna susceptibilnost je fizikalna veličina kojom se opisuje svojstvo polarizacije dielektrika u električnom polju. Ona

je po svojoj prirodi tenzor, pa tako polarizabilnost molekula tekućeg kristala u električnom polju možemo prikazati matricom;

$$X = \begin{bmatrix} X_p & 0 & 0 \\ 0 & X_o & 0 \\ 0 & 0 & X_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

Gdje je  $X_p$  polarizabilnost molekule u polju paralelno na direktor, a  $X_o$  polarizabilnost u polju okomitom na direktor ranije definiran. Djelovanjem električnog polja molekula postaje polarizirana, no ako se ta ista molekula ne nalazi u specifičnom položaju s obzirom na električno polje, na primjer okomito ili paralelno, dolazi do pojave zakretnog momenta električnog polja na inducirani dipol odnosno molekulu.<sup>6</sup>



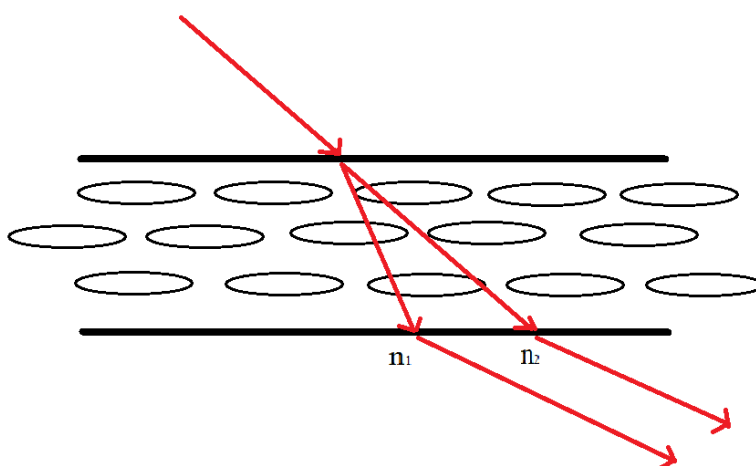
Slika 10. Polarizacija molekule tekućeg kristala primjenom električnog polja uz pojavu zakretnog momenta koji mijenja usmjerenje molekule u prostoru <sup>6</sup>

Molekule preferiraju biti u okomitom ili paralelnom položaju s obzirom na električno polje, ali im entropijski element rotacije i translacije u prostoru to brani, kao i intermolekularne i površinske interakcije.<sup>6</sup> Orijehtacija molekula je generalno proizvoljna ali slabe interakcije sa površinama, kao na primjer u LCD ćeliji, su dovoljne za odrediti generalnu orijentaciju molekula. Primjenom električnog ili nekog drugog oblika polja dolazi do strukturne promjene

koja se naziva Freedrickzsonova tranzicija, te je ona uzrokovana poljem a ne promjenom temperature sustava, te je temeljna pojava na kojoj se baziraju LCD ekrani.<sup>1</sup>

### 2.3.2. Optička svojstva tekućih kristala

Anizotropija tekućih kristala uzrokovana njihovom strukturom, pogotovo u nematičnoj fazi u kojoj su molekule usmjerene u jednom smjeru vidljiva je u određenim svojstvima, pa tako i u optičkim. Navedeno je vidljivo u postojanju dvije različite brzine gibanja svjetlosti kroz polarizatore napravljene od tekućih kristala, ovisno o usmjerenju molekula. Elektromagnetsko zračenje, to jest vidljivi dio spektra ima veći indeks loma svjetlosti ako je zračenje polarizirano u smjeru veće osi molekula, odnosno manji indeks loma ako pada u smjeru manje osi molekule.<sup>7</sup> Zraka svjetlosti koja pada pod kutom na tekući kristal će se razdvojiti na dvije nove zrake koje su okomito polarizirane s obzirom na dugu os molekule. Pojavu razdvajanja jedne zrake prolaskom kroz neku tvar na dvije nove zrake sa međusobno okomitom polarizacijom nazivamo dvostruka refrakcija.<sup>6</sup> Prolaskom zrake kroz tekući kristal ne dolazi do prostornog razdvajanja zraka, te valni vektor zrake ostaje isti prije i nakon prolaska pa se radi bolje separacije zraka u praksi koriste ćelije u obliku prizme. Smjer valnih vektora nakon prolaska ostaje isti za obje zrake ali njihova brzina se razlikuje stoga posljedično dolazi i do razlike u valnoj duljini i faznom pomaku za obje zrake. Pošto fazni pomak ovisi samo o razlici indeksa loma novonastalih zraka ovu pojavu također nazivamo i dvolom svjetlosti.<sup>4</sup>

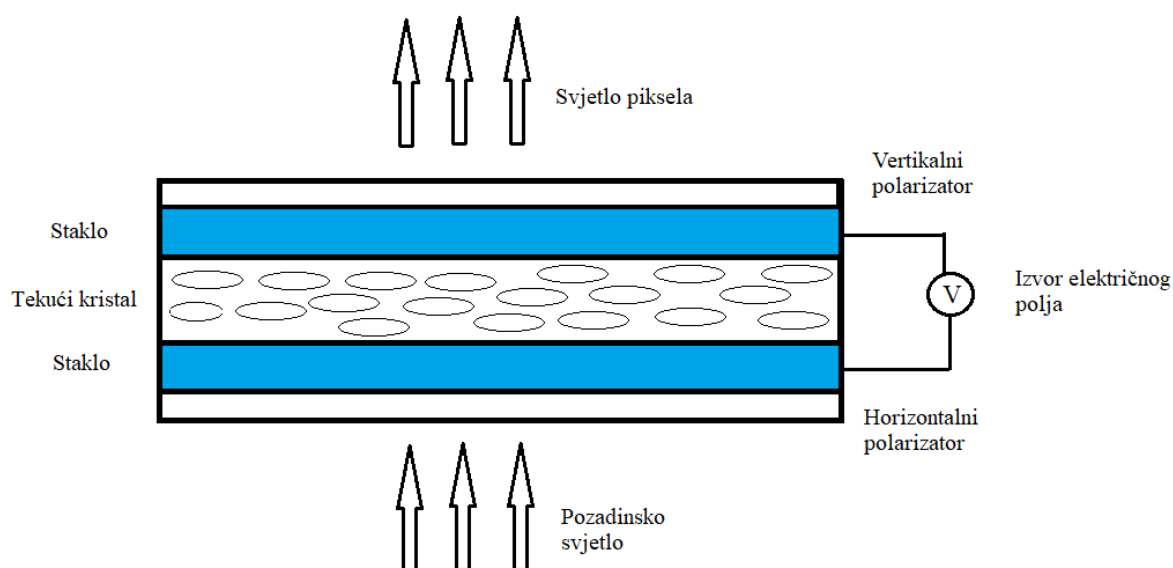


Slika 11. Dvolom svjetlosti ishodnog zračenja uzrokovam prolaskom kroz ćeliju tekućeg kristala sa novim indeksima loma ( $n_1$  i  $n_2$ )<sup>4</sup>

## 2.4. Primjena u LCD

Tekući kristali su pronašli svoju primjenu u širokom području u industriji i znanosti, od medicine, farmacije i kozmetike do industrije polimera i elektronike. Jedna od najzanimljivijih primjena u elektronici koju svakodnevno koristimo su ekrani napravljeni od tekućih kristala, poznatiji kao „LCD ekrani“ (engl. *Liquid Crystal Display*).<sup>1</sup> Osnova funkcioniranja LCD ćelije je njena sposobnost da se pod utjecajem električnog ili magnetskog vanjskog polja promjeni raspored molekula. Različit intenzitet najčešće električnog polja će dovesti do različitog rasporeda molekula u ćeliji, što ima utjecaj na transmitirano svjetlo. LCD ćelija je građena od pozadinskog izvora svjetlosti koji se nalazi ispod ćelije te emitira nepolarizirano svjetlo koje može ali i ne mora nastajati prolaskom struje kroz elektrode koje se nalaze u staklenim pločama LCD piksela.<sup>4</sup> Glavni element ćelije se naziva LCD matrica koja je građena od sloja tekućeg kristala koji se nalazi između dvije staklene ploče. Matrica može biti aktivna ili pasivna, ovisno o tome radi li se o zaslonu u boji koji sadrži aktivnu matricu ili monokromatskom, primitivnijem obliku koji sadrži pasivnu matricu. Svjetlo na svom putu do matrice prolazi kroz prvi polarizator prije matrice, koji je za 90° okrenut s obzirom na drugi polarizator koji se nalazi nakon matrice.<sup>6</sup> U slučaju da tekući kristali ne bi imali sposobnost zakretanja svjetlosti zbog ovako orijentiranih polarizatora ćelija nebi emitirala svjetlost. pojava cirkularnog dikroizma je svojstvo nekih optički aktivnih tvari, najčešće kristala da različito apsorbiraju lijevo i desno polarizirano svjetlo.<sup>4</sup> Tekući kristali koji pokazuju optičku aktivnost su najčešće kiralni tekući kristali. Kiralne molekule su one koje se ne mogu preklopiti sa svojom slikom u zrcalu, nemaju ravninu simetrije ni centar inverzije, a specifične su po sposobnosti zakretanja svjetlosti. Sastav matrice često varira, no razvojem tehnologije su se neke tvari uspostavile kao najbolje za korištenje poput derivata fenilcikloheksana, trifluorometil-bicikloheksana ili 2,3-difluorofenila.<sup>2</sup> Sastav je najčešće mješavina različitih tekućih kristala nematične i kiralne termotropne faze kako bi poboljšali neke željene performanse poput funkcionalnosti u većem temperaturnom rasponu. Na matrici se nalazi ranije spomenuti drugi polarizator i monokromator, odnosno filter za boju. Svaka optička ćelija sadrži tri različita filtera, crveni, plavi i zeleni, čijom kombinacijom možemo stvoriti druge boje.<sup>4</sup>



Slika 12. Građa LCD ćelije<sup>6</sup>

Do sad navedena svojstva tekućih kristala će biti dovoljna za opisati osnovne načine funkcioniranja piksela. Optička svojstva ćelije ovise o dielektričnim svojstvima kad je riječ o elektromagnetskom zračenju u području vidljive svjetlosti, te dolazi do prethodno opisane pojave dvoloma svjetlosti. Razlike između indeksa loma za svjetlost polariziranu duž i okomito na direktor su dovoljno velike pa nam to omogućava da korištenjem električnog polja koje djeluje na ćeliju utječemo na njena optička svojstva. Standardna debljina tekućih kristala u LCD ćeliji je nekoliko mikrometara, što odgovara oko 10 do 15 valnih duljina ishodnog zračenja, te omogućava dobru kontrolu uređenosti sustava.<sup>4</sup> Raspored molekula tekućeg kristala uvelike utječe na polarizaciju s obzirom da je ćelija puno veća od valne duljine vidljive svjetlosti koja prolazi kroz nju. Svjetlost polarizirana u smjeru duge osi molekula ulaskom u ćeliju prati orijentaciju te se rotira za 90 stupnjeva, točno kako su i polarizatori postavljeni jedan s obzirom na drugog, pa je i rezultat toga svjetleća LED ćelija. Primjenom električnog polja dolazi do polarizacije molekula duž dugih osi te se inducira zakretni moment koji pomiče molekule u smjeru prema električnom polju, što posljedično dovodi do promjene strukture te je polarizacija svjetlosti sada djelomična.<sup>6</sup> U slučaju da molekule ostanu raspoređene tako da je njihova duga os okomita na put svjetlosti, optičke promjene su dovoljno značajne da uz kontroliranu promjenu direktora dolazi do rotacije polarizirane svjetlosti, kako paralelne tako i okomite polarizacijske komponente, što nije slučaj kad je duga os molekule okomita na električno polje, odnosno staklo ćelije. U tom slučaju je kontrola polarizacije puno manja, no to nam omogućuje

gradaciju boje pošto je u tom slučaju svjetlost eliptički polarizirana i dolazi do veće apsorpcije, što rezultira promjenom intenziteta obojenosti piksela, odnosno nastaju takozvana „siva stanja“ u kojima svjetlost nije u potpunosti apsorbirana. Boja ekrana nastaje miješanjem tri primarne boje od tri piksela koji tvore optičku jedinicu, te je moguće jedino kontrolirati „siva stanja“ za svaku boju pojedinačno.<sup>1,4</sup> Razvojem znanosti i tehnologije nastale su različite varijacije i izvedbe LCD ćelije, te se uvođenjem tranzistora u matricu tekućih kristala osigurala veća kontrola napona u željenim dijelovima ćelije te je većom kontrolom nad svjetlinom i boljim kontrastom postignuta bolja slika. Neke od vrsta LCD ćelija koje se razlikuju po svojstvima poput vrsti termotropne faze, rasporedu molekula u pojedinim slojevima i samoj izvedbi su TN (engl. *twisted nematic*) koja je ranije opisana, IPS (engl. *in-plane switching*), AFFS (engl. *advanced fringe field switching*) i VA (engl. *vertical alignment*). Ulaskom u 21. stoljeće LCD monitori su zamijenili ranije korištene tehnologije poput ekrana na katodne zrake i plazma ekrane zbog prednosti poput veće rezolucije ali i boljeg prikaza boja, dužeg radnog vijeka i manje potrošnje energije.

## § 3. LITERATURNI IZVORI

1. J. Pavlin, N. Vaupotić, M. Čepič, *Eur. J. Phys.* 34 (2013) 745–761
2. D. Andrienko, Introduction to liquid crystals, *Journal of Molecular Liquids* (2018), 267 (2018), 520-541
3. J. Pavlin, K. Susman, S. Zihlerl, N. Vaupotić & M. Čepič (2011) How to Teach Liquid Crystals?, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 547:1, 255/[1945]-261/[1951]
4. M. Čepič, *European J of Physics Education* ISBN 1309-7202 Special Issue 2012
5. L. Verbit, *Journal of Chemical Education Liquid Crystals—Synthesis and Properties* An experiment for the integrated organic and physical laboratory, 49 (1972) 36-39
6. M. Čepič, *Liquid Crystals Through Experiments*, Morgan & Claypool Publishers 2014, 1-12
7. S. Ledesma, H. Lozza, M. Pomata, Undergraduate optical experiments using simple liquid crystal displays, *SPIE Vol. 3831* (2000), 342-351
8. N. V. V. Raghavan & L. A. Paddock (1975): IMPROVED SYNTHESIS AND PURIFICATION OF p-METHOXYBENZAL-p-(n-BUTYL) ANILINE (MBBA), *Organic Preparations and Procedures International: The New Journal for Organic Synthesis*, 7:6, 311-312
9. Dunmur, D., & Sluckin, T. *Soap, science, and flat-screen TVs: a history of liquid crystals*. Oxford University Press, 2014
10. T. Begović, N. Kallay, T. Klačić, *Koloidna i međupovršinska kemija*, nedovršena i nerecenzirana skripta (2021.)