



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



ELEKTRO-OPTIČKE ČELIJE SA TEČNIM KRISTALIMA

- diplomski rad -

Mentor:
dr Dušanka Obadović

Kandidat:
Biljana Marjanović

Novi Sad, 2007

SADRŽAJ

UVOD

TEORIJSKI DEO

1. Otkriće tečnih kristala
2. Oblasti primene tečnih kristala
3. Tipovi tečnih kristala, njihove fizičke osobine i reakcija na električno polje
 - 3.1. Nematski (N)
 - 3.1.1. Reakcija mezogena na spoljašnje električno polje
 - 3.1.2. Brzina reakcije nematske ćelije
 - 3.2. Smektički (SmA, SmC, SmC_A)
 - 3.3. Hiralni nematoci (N*) i holesterici
 - 3.3.1. Optički efekti
 - 3.4. Hiralni smektički (SmC*, SmA*, SmC_A*)
 - 3.4.1. Elektroklinski efekat u SmA*
 - 3.4.2. Osobine masivnog materijala SmC*
 - 3.4.3. Reakcija SmC* na spoljašnje električno polje
 - 3.4.4. Osobine masivnog SmC_A*

EKSPERIMENTALNI DEO

4. Displeji na bazi tečnih kristala
 - 4.1. Princip rada klasične TN ćelije
 - 4.2. Tipovi displeja: klasifikacije i osobine
5. Ćelije sa feroelektričnim tečnim kristalima (SmC*)
 - 5.1. Deformisana spirala (DHF)
 - 5.2. Površinski-stabilisani SmC* SSFLC
 - 5.2.1. SSFLC ćelije i displeji
 - 5.2.2. Realan SSFLC
 - 5.3. Uvrnuti smektički režim (TSM) i kontinualna rotacija direktora (CDR)
6. Višeslojni holesterički displeji u boji
 - 6.1. Opšti problem reflektivnosti kolor displeja
 - 6.2. Princip rada višeslojnog holesteričkog kolor displeja
 - 6.2.1. Prelazi između faza i upravljanje ćelijom
 - 6.2.2. Generacija boja i karakteristike displeja
 - 6.3. Tehnologija izrade troslojnog holesteričkog displeja

ZAKLJUČAK

LITERATURA

Najiskrenije se zahvaljujem dr Dušanki Obadović, mentoru ovog rada, na uputstvima i dragocenoj pomoći. Veliko hvala dr Predragu Habašu na podršci i korisnim diskusijama.

I would like to thank Dr. Simor Springer for giving me the opportunity to work on the development projects at ASULAB S.A., for his efforts in introducing me into the technology processes, and for providing me with several important references.

Biljana Marjanović

UVOD

Termin “tečni kristali” odnosi se na organske materije koje u određenoj temperaturnoj oblasti poseduju prelaznu fazu odnosno, posebno agregatno stanje koje se nalazi između tečnog i čvrstog. Ovo “tečno-kristalno” stanje odlikuje se nekim karakteristikama čvrstog kristalnog stanja – uređenost molekula i anizotropija fizičkih osobina, ali i nekim osobinama tečnosti – fluidnost. Suprotno čvrstom kristalnom stanju, uređenost molekula u tečno-kristalnom stanju je samo delimična i opada sa porastom temperature. Molekuli tečnih kristala mogu biti u obliku štapa, diska ili banane... Anizotropija je veoma izražena i u tome se tečno-kristalno stanje jasno razlikuje od izotropnih tečnosti. Makroskopski električni i mehanički parametri tečnih kristala su takođe anizotropni: permitivnost, indeks prelamanja, koeficijent elastičnosti, viskoznost... Osnovu na kojoj se zasniva praktična primena tečnih kristala predstavlja mogućnost upravljanja anizotropijom primenom spoljašnjeg električnog ili magnetnog polja, elektromagnetnim talasima, temperaturom...

Poslednjih nekoliko decenija, odnosno od sedamdesetih godina XX veka, u oblasti primene tečnih kristala došlo je do nagle ekspanzije: od indikatora u ručnim digitalnim satovima i prenosnim mernim uređajima male potrošnje, do masovne komercijalne industrije vredne više desetina-milijardi EUR u poslednjoj godini. To znači da je od prvih opažanja (1850 god.) i otkrića tečno-kristalnog stanja (1888 god.) do prve ideje o praktičnoj primeni (1966 god.), prošlo više od jednog veka. Tečni kristali su dugo bili predmet čisto akademskog interesovanja, bez ikakve praktične upotrebe. Do proboja u oblasti primene došlo se otkrićem i demonstracijom koncepta displeja: 1968 godine napravljen je displej sa dinamičkim rasejanjem na nematskim tečnim kristalima (američka kompanija RCA; potrebna radna temperatura oko 80°C), a 1971 godine prva TN (“twisted nematic” – uvrnuti nematik) ćelija. U to vreme stabilni nematski materijali, u intervalu sobnih temperatura, sa pozitivnom anizotropijom permitivnosti nisu postojali. Tečno-kristalni materijali nisu bili dovoljno kvalitetni za komercijalnu upotrebu. Mogućnost komercijalne primene naglo su pospešila istraživanja tečno-kristalnih supstancija, kako na akademskim institucijama, tako i u industriji. Već 1973god. u naučnoj literaturi su publikovani, a i komercijalizovani, prvi tečno-kristalni materijali sa faznim prelazima na sobnoj temperaturi. Intenzivan rad u industriji i specijalizovanim institucijama poslednjih decenija doveo je do razvoja velikog broja kvalitetnih materijala. Glavna motivacija razvoja bila je mogućnost primene u TV displejima.

Osnovni preduslovi za masovnu komercijalnu upotrebu tečnih kristala su:

- I. Čistoća: mogućnost nabavke sintetizovanih materijala visoke čistoće (bez jona),
- II. Širok temperaturni opseg mezofaze¹,
- III. Pouzdane i jeftine mikro-fabrikacione tehnologije (razvijene za mikroelektronsku, mikromehaničku i druge industrije),
- IV. Kvalitetne podloge za dobijanje uređenih slojeva (“alignment layers”) i razumevanje procesa orijentacije.

¹ Napomenimo da je zahtevani opseg za elektronski sistem: u komercijalnim primenama od 0 do 60°C, u industrijskim od -30 do 85°C, a automobilska specifikacija zahteva od -40 do 125°C (u proširenoj oblasti od -45 do +150°C).

Komercijalne tečno-kristale smeše danas se prave od velikog broja čistih tečno-kristalnih supstancija sa dopantima (primesama) – ciljno za određenog kupca – za određenu namenu. Čak, dodavanje visoko-anizotropnih supstancija, ali bez tečno-kristalne faze, može značajno da poboljša karakteristike smeše. Parametri koji se podešavaju su: anizotropija indeksa prelamanja (“birefringence”), viskoznosti, temperaturni opseg mezofaza, prag napona, ugao uvrtnja, dužina koraka spirale, permitivnost, otpornost, napon rada ćelije, vreme isključenja ćelije, prenosna karakteristika ćelije (transparentnost u funkciji napona), kao i temperaturna stabilnost, stabilnost na UV zračenje...

U teorijskom delu ovog rada dat je prikaz osnovnih karakteristika tečno-kristalnih supstancija. Posebna pažnja posvećena je odzivu pojedinačnih molekula i slojeva tečno-kristalnih faza na primenjeno spoljašnje električno polje.

U eksperimentalnom delu rada dat je pregled elektro-optičkih ćelija sa tečnim kristalima. Objasnjeni su principi rada klasičnih ćelija: TN (“twisted-nematic” – uvrnuti nematik), STN (“super-twisted-nematic” – jako uvrnuti nematik) i IPS (“in-plane switching” – prekidanje u ravni ćelije). Diskutovane su razne vrste i realizacije displeja sa tečnim kristalima. Posebna pažnja posvećena nekim elektro-optičkim efektima i ćelijama specijalnih karakteristika, kao:

- elektrokliniski efekat – vrlo velika brzina rada,
- reflektivna slojna holesterička ćelija – stabilna bez napona, visoko reflektivna,
- ćelija sa SSFLC (“surface-stabilized-feroelectric-liquid-crystal” – površinski stabilisan feroelektrični tečni kristal) i ćelije sa SmC* u kontinualnom režimu rada (deformisana spirala, kontinualna rotacija direktora) – velike brzine rada.

Dat je opis tehnološkog postupka dobijanja reflektivnog kolor holesteričkog displeja i opisan je praktičan rad na realizaciji tog displeja (**eksperimentalan deo**).

TEORIJSKI DEO

1. Otkriće tečnih kristala

Otkriće tečno-kristalnog stanja obično se pripisuje austrijskom botaničaru Fridrihu Rajniceru (Friedrich Reinitzer). Proučavajući uticaj raznih supstancija na rast biljaka, primetio je 1888 god. da holesteril-benzoat prilikom topljenja na 145.5°C obrazuje mutni rastop, a postaje prozirna tečnost na 178.5°C . Pri hlađenju bistra tečnost menjala se od plavkaste na temperaturi prelaza, do ljubičaste neposredno pre kristalizacije. Rajnicer i Lemann (Otto Lehmann) su posle diskusija o ovom fenomenu postavili tezu da je u pitanju novo termodinamičko stanje (faza) materije, koje je Lemann kasnije nazvao “tečno-kristalno stanje”. U početku ta teza nije bila prihvaćena u naučnim krugovima: smatralo se da postoje samo tri agregatna stanja sa jasno definisanim faznim prelazima (čvrsto, tečno i gasovito).

Iako se Rajniceru pripisuje otkriće, takve pojave su opisane i ranije. Tako je Hajnc (W.Heintz) 1850 god. opazio da stearin prilikom topljenja na 52°C prelazi u zamagljenu tečnost, na 58°C u neprovidnu, a na 62.5°C u bistru. Oko 1855 god. Virhou (Virchow), Metenhajmer (Mettenheimer) i Valentin (Valentin) su primetili da nervno vlakno ispušta u vodu supstanciju sličnih osobina, za koju je kasnije pokazano da je optički aktivna.

Oto Lemann je pronašao mikroskop sa polarizatorom 1877 god. Koristeći taj mikroskop i grejnu podlogu, analizirao je fazne prelaze raznih supstancija u procesima grejanja i hlađenja. Opazio je postojanje među faze kod nekih organskih supstancija (etilester, amonijum oleati i druge) pri njihovom prelasku iz čvrstog u bistro tečno stanje. Primetio je postojanje optički anizotropnih, međusobno neuređenih oblasti, na čijim se granicama svetlost rasejava i rastvor čini mutnim. Poznato je njegovo delo “Tečni kristali” (“Flüssige Kristalle”) iz 1904 god.

Geterman i Ričke (Gatterman i Ritschke) su 1890 god. sintetizovali prvu veštačku tečno-kristalnu supstanciju: p-azokyanisol.

Forlender (D.Vorländer) je 1900 god. sa saradnicima prvi sintetizovao termotropnu smektičku supstanciju. Oni su sintetizovali više od stotinu tečno-kristalnih supstancija u laboratoriji. Na osnovu njihove hemijske strukture Forlender je 1907 god. publikovao rad o sistematizaciji anizometrije molekula i tečno-kristalnih osobina. Njegov rad je omogućio da se na osnovu hemijsko-prostorne strukture molekula predvide njegove tečno-kristalne osobine (faze), ali i da se na osnovu izučavanja tečno-kristalnih faza pojasni struktura nepoznatih jedinjenja. Referentna je njegova knjiga: “Hemijska kristalografija tečnosti” (“Chemische Kristallographie der Flüssigkeiten”) iz 1924 god.

Klasifikaciju tečnih kristala na osnovu uređenosti molekula na nematske, smektičke i holesteričke uveo je Fridel (G.Freidel) 1922 god. Njemu se pripisuje jedno značajno opažanje: orijentacija molekula tečnih kristala u spoljašnjem električnom, odnosno magnetnom polju usled anizotropije permitivnosti.

Bose (E.Bose) je 1907 god. dao prvu teoriju tečnih kristala, koja se zasnivala na pretpostavci postojanja velikog broja uređenih domena.

Born (M.Born) je 1916 god. postavio teoriju tečno-kristalnog stanja na osnovu postojanja stalnih dipola molekula za objašnjenje nematske faze. Kasnije je pokazano da je efekat dipola (dipol-dipol interakcija) slab da bi igrao ključnu ulogu u održanju faze.

Prvi matematički model tečno-kristalnog stanja su postavili Ozen i Coher (C.Oseen i D.Zocher). Oni su definisali parametar uređenosti, a u periodu od 1922-1939 god., razvili kontinualnu teoriju tečno-kristalnog stanja, kao kontinualanog mediuma preko makroskopskih konstanti elastičnosti. Konačnu opštu "Kontinualnu teoriju statičkih sistema" dao je Frank (F.C.Frank) 1958 god. Teorija se obično referiše kao Frank-Leslijeva (Frank-Leslie) ili Ozen-Frankova metoda, a koeficienti elastičnosti za istezanje (K_1), uvrtnje (K_2) i savijanje (K_3) često se nazivaju Frankovi koeficienti elastičnosti.

Lesli i Erikson (F.M.Leslie i J.L.Ericksen) su razvili "Kontinualnu teoriju dinamičkih sistema", u periodu 1960-1968 god. (dinamička teorija Lesli-Eriksona).

Frederiks (V.K.Freedericksz) je 1930-tih godina izučavao i objasnio deformaciju tečnog kristala pod uticajem spoljašnjeg električnog polja, kao i postojanje praga polja za deformaciju (efekat Frederiksa).

Onzager (L.Onsager) je publikovao svoj rad o prelazu iz izotropne u nematsku liotropnu tečno-kristalnu fazu (1949 god.).

Zaupe i Majer (A.Saupe i W.Maier) su razvili statističku molekularnu teoriju tečnih kristala bez stalnih dipola, uključujući intermolekularni potencijal (teorija Majer-Zaupea, 1958 god.). Teorija se zasniva na usrednjenom polju i dosta uspešno predviđa eksperimentalne termotropne fazne prelaze.

Hajlmajer (G.Heilmeyer) i saradnici su demonstrirali prvi displej na bazi tečnih kristala 1968 god. (laboratorije kompanije RCA). Displej je radio koristeći dinamičko rasejanje na tečnim kristalima ("dynamic-scattering-mode" – DSM) [2]. Taj režim je Hajlmajer uveo u svom radu godinu dana ranije (1967), mada je on otkriven u tečnim kristalima još 1963 god. od strane Vilijamsa (R.Williams). U prvom displeju Hajlmajera korišćeni materijal je zahtevao radnu temperaturu od 80°C.

A. Zaupe je otkrio smektičku C fazu 1969 god.

H. Keler (H.Keler) je sintetizovao prvo nematsko jedinjenje na sobnoj temperaturi (MBBA) 1969 god.

TN (twisted-nematic) tip ćelije za displeje sa tečnim kristalima je razvijen od strane Šada i Helfriha (M.Schadt i W.Helfrich) 1971 god. u Švajcarskoj i od strane Fergasona (J.Ferguson) u USA. TN ćelija je intenzivno komercijalizovana i sve do nedavno je bila jedina ćelija u masovnoj upotrebi².

Šefer i Nering (T.Scheffer i J.Nehring) i saradnici su razvili STN (jako uvrnuti nematik) ćeliju 1981 god.

² Zapravo, dve ćelije su se masovno koristile: TN i STN ("super-twisted-nematic"). Od nedavno se za velike aktivno-matrične displeje koriste VA ("vertical alignment") i IPS ("in-plane-switching") ćelije.

Grej (G.W.Gray) je otkrio cianobifenil supstancije, koje imaju nematsku fazu na sobnim temperaturama 1973 god. Te supstancije su bile idealne za TN ćelije, jer imaju pozitivnu dielektričnu anizotropiju i izraženo dvojno prelamanje. Kako su otkrivene, ove supstancije su odmah komercijalizovane. Posle njih, 1970-tih godina, sintetizovano je više klasa tečno-kristalnih supstancija sa odličnim osobinama za praktičnu primenu u TN ćeliji.

Francuski naučnik De Žen (P.-G. de Gennes – Nobelova nagrada 1991 god.) proširio je teoriju faznih prelaza Landaua (L.Landau) na tečne kristale. On je 1960-tih godina radio na tečno-kristalnim sistemima i polimerima i pronašao da se ovi složeni materijali mogu opisati opštim zakonitostima faznih prelaza (haotičnog i uređenog sistema) koje su se potvrdile za “jednostavnije” sisteme, poput fenomena: magnetizma, superprovodnosti ili superfluidnosti.

Mekmilan i Mejer (W.McMillan i R.B.Meyer) su postavili teoriju usrednjenog polja za smektičke tečne kristale 1974 god.

Mejer je otkrio hiralnu smektičku C fazu i predvidio je njenu jedinstvenu osobinu: samopolarizabilnost (feroelektričnost) 1975 god.

Prvo feroelektrično jedinjenje (hiralno smektičko C) sintetizovano je radom Mejera, Liberta, Strzeleckog i Kelera (R.B.Meyer, L.Liebert, L.Strzelecki i P.Keller) (DOBAMBC, 1975 god.).

Klark (N.Clark) i Lagerval (S.Lagerwall) su patentirali SSFLC (površinski stabilisan feroelektrični tečni kristal) ćeliju 1980 god.

Čandrasekar (S.Chandrasekhar) je opisao po prvi put tečne kristale čiji su molekula u obliku diska 1978 god.

Ju i Zaupe (L.J.Yu i A.Saupe) su opazili optičku biaksijalnost kod nematskih kristala 1980 god.

Teorijski i ekperimentalni radovi Čigrinova (V.Čigrinov), Blinova (L.Blinov), Berešneva (L.Beresnev), Funšilinga (J.Fünfschilling) i Šada (M.Schadt) doveli su do ćelije sa režimom rada u deformisanoj spirali (1985-89 god.).

Patent za IPS (prekidanje u ravni ćelije) ćeliju podneo je Faunhoferov institut za primenjenu fiziku čvrstog stanja (Fraunhofer IAF) iz Frajburga (Freiburg) (Nemačka) 1990-92 god. IPS ćelija je ključna komponenta značajnog broja najnovijih TV displeja sa širokim uglom gledanja (taj ugao nije moguće postići sa klasičnom TN strukturom).

Nemačka kompanija Merk (Merck), koja je vodeći proizvođač komercijalnih nematskih tečnih kristala, je 1997 god. podnela patent za VA (“vertical-alignment” – vertikalno uređenje) tip displeja, koji je danas primenjen za komercijalne kućne TV ekrane.

Kompanija Kenon (Canon) komercijalizovala je prvi displej na bazi SSFLC (površinski stabilisani feroelektrični tečni kristali) 1995 god.

Jang (D.-K.Yang) je predložio koncept reflektivne ćelije sa holesteričkim tečnim kristalom 1991 god. Prvu demonstraciju gradacije sivog u holesteričkom reflektivnom displeju dao je Huang (X.-Y.Huang) 1998 god.

2. Oblasti primene tečnih kristala

Osnovno svojstvo tečnih kristala koje ih čini pogodnim za primenu, je mogućnost upravljanja njihovim optičkim osobinama spoljašnjim električnim ili magnetnim poljem. Spoljašnje polje utiče na orijentaciju molekula, a na taj način na optičke osobine materijala. **Na elektro-optičkim efektima zasnivaju se sledeće primene:**

- a) Konstrukcija displeja: transmisionih, reflektivnih i trans-reflektivnih; pasivnih i aktivnih. Napon (električno polje) utiče na svetlosnu propustnost ili reflektivnost piksela displeja i tako stvara sliku. Oni se koriste kako za ekrane displeja, tako i unutar projekcionih sistema.
- b) Elektronski prekidači svetlosti (optički ventili) i modulacija intenziteta svetlosti u optičkim sistemima: električnim naponom se utiče na transparentnost materijala. Snop svetlosti se propušta, ili prekida. Primena je u sistemima za optičke komunikacije.
- c) Kao aktivni optički filtri: Napon utiče na frekventnu karakteristiku svetlosnog filtra – menja se opseg svetlosti koji filter propušta. Razvijeni su, takođe, filtri koji prigušuju uzan opseg frekvencija, pri čemu se prigušena frekvencija naponski reguliše.
- d) Za upravljanje pravcem svetlosti: Primene su u komutatorima svetlosti u optičkim komunikacionim linkovima (prostorni optički prekidači sa više ulaza i izlaza), selektori oblasti i sl. U tim primenama sistemi sa tečnim kristalima (bez pokretnih delova) pokazuju neke prednosti u odnosu na konkurentne mikro-elektromehaničke sisteme. Druge primene su za upravljanje pravcem svetlosti u raznim preciznim sistemima, kao na primer ćelija za samokorekciju pravca svetlosti (sistemi za pisanje i čitanje optičkih diskova) ili u holografiji.
- e) Za kontrolu i stabilizaciju ravni polarizacije u optičkim sistemima. Primena je, takođe, u optičkim komunikacijama.
- f) Upotreba u elektronski kontrolisanoj nelinearnoj optici (NLO): radi se na tečno-kristalnim materijalima koji mogu da zamene skup LiNbO_3 u ćelijama za razne NLO funkcije.
- g) Medijum za memorisanje holografskih slika.
- h) Elektronska fotografija, fleksibilni elektronski displeji i elektronske knjige.

Danas postoje veoma različiti displeji sa tečnim kristalima i mnogi od njih su našli primenu u specijalnim oblastima. Uobičajni tipovi u svakodnevnoj upotrebi su:

- aktivni displeji sa matricom TN ćelija koje pobuđuje matrica MOS (“metal oxide semiconductor” – metal oksid poluprovodnik) tranzistora u tehnologiji tankog filma za računarske monitore (stoni i prenosivi),
- aktivni displeji sa VA/VMD i IPS ćelijama za sobne televizijske ekrane i
- pasivni displeji sa TN/STN za indikatorske displeje (kalkulatori, merni instrumenti, satovi, informacioni panoi...).

Neki drugi tipovi displeja sa tečnim kristalima su se nedavno komercijalno probili u specifičnim segmentima tržišta:

- reflektivni holesterički displeji za prenosive male sisteme na baterije ili bez napajanja,
 - feroelektrički mali displeji za projekcione sisteme ili u viziru (skupih) kamera.
- Primena u kolor-sekvencijalnim displejima.

Na efektu **uticaja temperature na korak spirale** holesteričkih tečnih kristala zasnivaju se:

- indikatorske trake za temperaturu u industriji i domaćinstvu,
- skaniranje lokalne neravnomernosti temperature kože u medicini: za lokalizaciju tumora, upala tkiva i krvnih sudova,
- detekcija mesta otkaza u elektronskom kolu putem tečnih kristala,
- detekcija mikropukotina u mašinstvu,
- pretvaranje infracrvene slike u vidljivu,
- dobijanje specijalnih efekata kod boja i lakova (odevna i automobilska industrija).

To su obično kapsulirani holesterici ili holesterički filmovi.

Na efektu **promene koraka spirale holesterika usled hemijskog uticaja** rade:

- pretvarači ultraljubičaste slike u vidljivu – viziri za ultraljubičasti opseg.

Mogućnosti primene tečnih kristala su velike. Na primer, promena orijentacije mezogena pod uticajem električnog polja, menja efektivnu permitivnost sloja tečnog kristala, a time kapacitet kondenzatora sa tečno-kristalnim dielektrikom. Tako je moguće realizovati naponsko-kontrolisani kondenzator – varaktor. Odlične karakteristike u mikrotalasnom opsegu su demonstrirane u radu [1]: opseg do 5GHz, promena kapaciteta od 25% za promenu jednosmernog napona 0-5V, vrlo visok faktor dobrote (Q faktor) u opsegu 20-310.

3. Tipovi tečnih kristala, njihove fizičke osobine i reakcija na električno polje

Tečni kristali su delimično uređeni materijali. Po stepenu uređenja oni se nalaze između tečnog i kristalnog čvrstog stanja. Ove prelazne faze se nazivaju mezomorfne faze (mezofaze).

Gasovito stanje materije karakteriše odsustvo uređenosti molekula i sila na kratkim i dugim rastojanjima. Molekuli interaguju jedan sa drugim samo putem sila na vrlo kratkim rastojanjima, koja su mnogo manja od srednjeg rastojanja između molekula – u sudarnim procesima, u vremenu koje je mnogo kraće od srednjeg vremena između dve interakcije. Termička energija molekula (atoma) je puno veća od intermolekularnih sila (osim pri sudaru).

Tečno stanje materije je karakterisano odsustvom sila na dugim odstojećima, ali stalnim prisustvom intermolekularnih sila na kratkim rastojanjima. Tečnosti su izotropne: mehaničke, električne/magnetne i optičke osobine tečnosti ne zavise od ugla posmatranja. To važi čak i ako se tečnost sastoji od polarnih molekula. Kod tečnosti je parametar uređenosti (vektorska projekcija direktora na osu posmatranja) $S=0$. Molekuli nemaju određenu poziciju, niti orijentaciju.

Čvrsto kristalno stanje je potpuno uređeno stanje u tri prostorne dimenzije, u kome se molekuli (atomi) mogu da nalaze samo u tačno određenim položajima jedan u odnosu na drugog. Njega karakteriše kristalna rešetka i klase simetrije za dati materijal. Atomi su stalno vezani jedan za drugi, jakim vezama koje čine da je čvrsto kristalno stanje otporno na deformacije. Atomi osciluju oko ravnotežnih položaja u rešetci. U opštem slučaju, čvrsto kristalno stanje je anizotropno za elektronsko-transportne, elektrostatičke, magnetne, elektromagnetne i mehaničke procese.

Tečno-kristalno stanje se po uređenosti molekula nalazi između čvrstog i tečnog stanja. Tečni kristali su slični tečnostima, sa manjom ili većom unutrašnjom uređenošću molekula. Zbog toga oni poseduju anizotropne osobine svojstvene čvrstim telima.

Samo određene supstancije poseduju tečno-kristalno stanje. Te molekule zovemo mezogeni. Obično su to izduženi organski molekuli, srednje veličine. Osim molekula u obliku štapa, mezogeni mogu da budu molekuli u obliku diska ili banane.

Tečne kristale kod kojih promena temperature određuje prelaz, *kristalna* $\leftrightarrow$ *tečno* – *kristalna* $\leftrightarrow$ *izotropna faza*, zovemo termotropnim.

Liotropne tečne kristale čine supstancije koje mezofazu obrazuju prilikom rastvaranja u vodi ili organskim rastvaračima, pri čemu i koncentracija (osim temperature) određuje tečno-kristalnu fazu.

Molekuli u tečno-kristalnoj fazi uvek poseduju orijentacionu uređenost, a prostorno su neuređeni ili delimično uređeni (sl.3.1). U zavisnosti od stepena prostorne uređenosti tečne kristale delimo na:

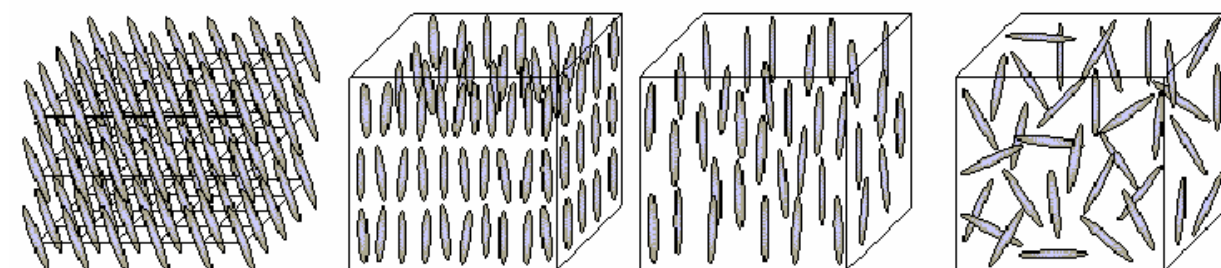
- smektičke – prostorno uređene po slojevima (12 potklasa, npr. SmE, SmH, SmB, SmC_A, SmC, SmA) i
- nematske – prostorno neuređene (N)

Fazni prelazi iz čvrstog kristalnog u različita tečno-kristalna stanja, zavise od temperature po sledećoj šemi:

čvrsta-kristalna – *SmE* – *SmF* – *SmB* – *SmC_A* – *SmC* – *SmA* – *N* – *izotropna faza*
 ----- T E M P E R A T U R A ----->

Faze su poredane po stepenu uređenosti mezogena. Pojedinačne tečno-kristalne supstancije, ili smeše poseduju samo neke od tih faza: pri zagrevanju ili hlađenju one prolaze samo kroz neke od njih. U opštem slučaju, fazni dijagrami nisu isti u procesu hlađenja i zagrevanja.

— T E M P E R A T U R A —>



Čvrsto kristalno stanje
 - orijentaciona uređenost
 - prostorna uređenost u 3D

Smektička A faza
 - orijentaciona uređenost
 - prostorna uređenost u 1D (po slojevima)

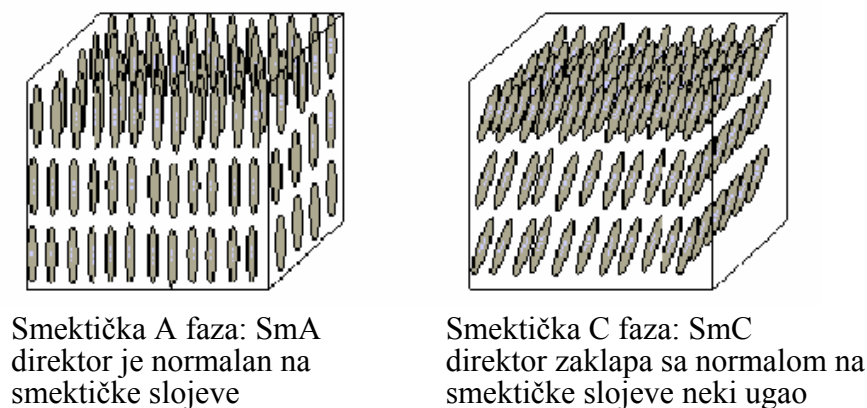
Nematska faza
 - orijentaciona uređenost
 - bez prostorne uređenosti

Izotropna tečna faza
 - nema orijentacije
 - nema prostorne uređenost

Slika 3.1: Uređenost molekula u različitim fazama tečno-kristalnog materijala

U smektičkim fazama molekuli su uređeni po slojevima (sl.3.2). Postoji delimična translaciona simetrija. U SmA i SmC mezofazama, molekuli slobodno difunduju u sloju kome pripadaju – nema prostorne uređenosti (translacione simetrije) unutar sloja. Ove faze se ponašaju kao 2D slojevi tečnosti; slojevi slobodno klize jedan po drugom, međusobno ne interagujući.

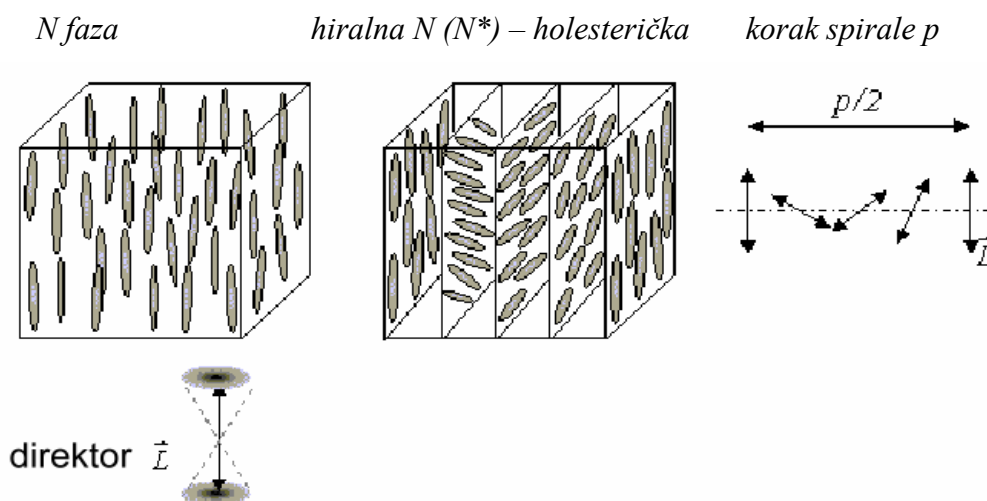
U heksagonalnim smektičkim mezofazama molekuli imaju delimičnu prostornu uređenost u okviru sloja. U zavisnost od ugla orijentacije mezogena razlikujemo podgrupe: SmB, SmI, SmF...



Slika 3.2: Uređenost molekula u smektičkim fazama
tečno-kristalnog materijala

Hiralnost menja kvalitativno organizaciju i osobine tečnog kristala. Tečni kristal je hiralan ako njegova slika u ogledalu ne može da se dobije kombinacijom rotacije i translacije. Mezogen je hiralan ako ne poseduje rotaciono-translacionu simetriju sa svojom slikom. Hiralni molekuli obično daju hiralan materijal. Međutim, hiralne osobine materijala mogu da daju i nehiralni molekuli, kao na primer banana mezogeni [3].

Hiralnost kvalitativno menja uređenost i osobine, kako nematskih, tako i smektičkih tečnih kristala. Hiralni centar uzrokuje međumolekularne sile koje teže da orijentišu molekule za neki mali ugao jedan u odnosu na drugi. Posledica je razvoj spiralnih struktura u materijalu (sl.3.3).



Slika 3.3: Spiralna struktura kao posledica hiralnosti mezogena u nematskoj
fazi – holesterički tečni kristali

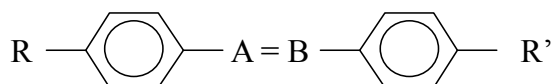
Kod N* direktori leže u ravni slojeva i zaklapaju karakterističan ugao u odnosu na direktore susjednih slojeva. Taj ugao je mali i kao posledica, mnogo slojeva je sadržano u koraku spirale.

Struktura N* je potpuno drugačija od strukture Sm, gde su direktori normalni na smektičke slojeve (SmA) ili sa njima zaklapaju neki ugao (SmC).

U nastavku će se tečno-kristalne faze izložiti detaljnije.

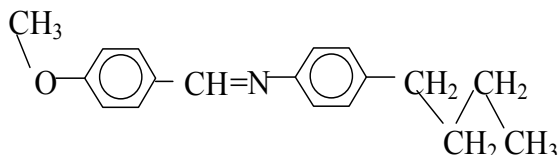
3.1. Nematski (N)

Nematski tečni kristali dobili su naziv po grčkoj reči νημα (konac), zato što molekuli podsećaju na niti. Većina nematskih jedinjenja može da se predstavi opštom strukturnom formulom (sl.3.4). Tipični predstavnici su 4,4-azoksi-anizol (PAA) i 4-n-butil-N-(4-metoksibenziliden)analin (MBBA), koji formiraju nematsku fazu u temperaturnom intervalu 116-136°C, odnosno 22-47°C, respektivno.

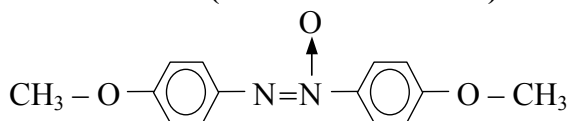


Slika 3.4: Opšta strukturna formula nematika: sadrži dva aromatična prstena u para položaju, povezana dvostrukom ili trostrukom vezom, a R i R' su krajevi ("repovi") molekula.

MBBA (Cr 22°C N 47°C I, $\epsilon_{||}=4.73$ i $\epsilon_{\perp}=4.98$ na 45°C, $\Delta\epsilon=-0.56$ na 25°C, $\Delta n=0.22-0.33$)

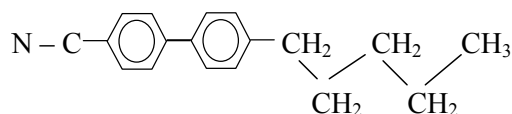


PAA (Cr 116°C N 136°C I)



5CB p-n pentil-p'-cianobifenil (PCB)

(Cr 24°C N 35.3°C I, $\epsilon_{||}=18.7$ i $\epsilon_{\perp}=7.0$ na 25°C, $\Delta\epsilon \gg 0$, $\Delta n=0.18$ na 25°C)



Slika 3.5: Strukturne formule i osnovni podaci nekih često korišćenih nematika: MBBA, PAA i 5CB. Podaci za permitivnost $\epsilon_{||}$ i $\epsilon_{\perp}$ su dati kao ilustracija: postoji rasipanje podataka u literaturi.

U nematskoj fazi ose izduženih molekula pretežno se orijentišu u određenom pravcu, koji zovemo direktor $\mathbf{n}$. Direktor $\mathbf{n}$ je vektorski parametar. U nematskoj fazi intermolekularne sile su ravnomerno raspoređene duž pravca molekula. One se ne menjaju sa translacionim pomeranjem molekula, nego zavise od ugla između molekula. Za pojedinačan molekul, sila se povećava sa povećanjem ugla ξ između njegove ose i direktora. Mera uređenosti nematske faze je data parametrom uređenosti S :

$$S = \langle \langle 3\cos^2\xi - 1 \rangle \rangle / 2$$

Za izotropne tečnosti $S=0$ (odsustvo orijentacione uređenosti), dok je za čvrsta tela $S=1$. Kako temperature raste S opada, a na temperaturi faznog prelaza iz nematske faze u izotropnu tečnost S skokovito pada na 0. Tečni kristali imaju tipične vrednosti $0.5 < S < 0.7$.

Nematska supstancija sadrži u praksi mnoštvo domena proizvoljno orijentisanih, zbog uticaja slučajno orijentisanih (neobrađenih) zidova posude u kojoj se nalazi. Zbog slučajne disperzije svetlosti ona izgleda mutna. U primeni, nematski tečni kristali se zaptivaju u oblast precizno obrađenih površina, koje forsiraju stvaranje jednog domena željene orijentacije.

Izduženi molekuli nematske supstancije mogu da rotiraju oko svoje duge ose ili da se translatorno pomeraju u tri dimenzije.

Nematska faza je **optički jedno-osna** (uniaksijalna). Postoji jedna optička osa i dva indeksa prelamanja materijala: $n_{\parallel}$ za zrak polarizovan paralelno optičkoj osi i $n_{\perp}$ za zrak polarizovan normalno na optičku osu materijala. Razlika $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ je koeficijent anizotropije indeksa prelamanja. Tečni kristali spadaju u materijale sa $\Delta n \neq 0$. Ako polarizovana svetlost upada u sloj tečnog kristala ona će da se rastavi na dva zraka: redovnu i neredovnu komponentu. Redovna komponenta ima polarizaciju normalnu na optičku osu, a neredovna polarizaciju paralelno optičkoj osi. Oba zraka vide različite indekse prelamanja i putuju kroz sloj različitim brzinama. Posle izlaska kroz sloj tečnog kristala javlja se fazno kašnjenje između ta dva zraka. Redovan (ordinaran) zrak vidi indeks prelamanja $n_0 = n_{\perp}$ za sve upadne pravce, dok neredovan (ekstraordinaran) zrak vidi indeks prelamanja $n_e = n_{\parallel} / (n_{\parallel}^2 \cos^2\alpha + n_{\perp}^2 \sin^2\alpha)^{1/2}$, gde je α ugao između optičke ose i upadnog pravca svetlosti. Ako svetlost pada duž optičke ose ($\alpha=0$), oba zraka vide isti indeks prelamanja $n_{\perp}$. Ako svetlost pada normalno na optičku osu ($\alpha=90^\circ$) redovan zrak vidi kao uvek $n_0 = n_{\perp}$, dok neredovan zrak vidi $n_e = n_{\parallel}$.

3.1.1. Reakcija mezogena na spoljašnje električno polje

Molekuli konvencionalnih nematskih supstancija nemaju stalne dipole, ili su oni slabi. Čak, ako su molekuli polarni (sa stalni dipolima) u nematskoj fazi oni su orijentisani slučajno “gore-dole”, jer “paralelnu” orijentaciju mezogena diktiraju intermolekularne sile, a ne električne sile stalnih dipola. Nematska faza je invarijantna prema promeni znaka lokalnog direktora $\mathbf{n}$ u $-\mathbf{n}$ (smer vektora). Makroskopski, nema vektora polarizacije usled karakteristika samog materijala – nema unutrašnjeg polja, ako nema spoljašnjeg električnog polja. Stalni dipoli u nematskoj fazi ne igraju ključnu ulogu u reakciji materijala na spoljašnje električno polje. Kada se primeni spoljašnje polje ono ne može da preorijentiše (obrne) molekule i polarizuje materijal dejstvujući na stalne dipole mezogena, jer su intermolekularne sile koje obrazuju nematsku fazu jače od momenta usled stalnog dipola mezogena. Tako nematski

materijal posle ukidanja spoljašnjeg polja ostaje nepolarisan. Feroelektrična nematska supstancija nije do sada opažena.

U nematskom materijalu spoljašnje polje stvara indukovane dipole mezogena. Interakcija između indukovanog dipola i lokalnog električnog polja dovodi do optimalne orijentacije molekula. U opštem slučaju indukovani dipoli teže da se orijentišu u pravcu električnog polja, tako da je smer dipola (- ka +) suprotan smeru polja. Nematski mezogeni pokazuju različitu polarizabilnost u pravcu duže ose molekula od one u pravcima kraćih osa. Kao posledica sledi dielektrična anizotropija:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} ,$$

gde $\epsilon_{\parallel}$ je (relativna) permitivnost u pravcu paralelnom dužoj osi, a $\epsilon_{\perp}$ permitivnost u pravcima kraćih osa (normalno na dužu osu). Za materijale sa $\Delta\epsilon > 0$ kažemo da imaju pozitivnu anizotropiju permitivnosti, a za $\Delta\epsilon < 0$ je u pitanju negativna anizotropija permitivnosti.

Direktor se pomera u odnosu na električno polje tako da je maksimalna permitivnost u pravcu električnog polja.

Kod nematskih materijala sa $\Delta\epsilon > 0$ molekuli se orijentišu sa dužim osama u pravcu električnog polja, dok kod onih sa $\Delta\epsilon < 0$ poprečno na pravac polja (sl.3.6). Orijentacija nije potpuna jer joj se suprotstavljaju elastične sile u materijalu. Uspostavljeno stanje odgovara ravnoteži između momenta usled indukovanog električnog dipola (uz manji efekat eventualnog stalnog dipola) $\mathbf{M}_d$ i momenta sila elastične deformacije.

Kao posledica, optička osa nematske faze se takođe pomera saglasno pravcu električnog polja. To je osnova rada displeja i ostalih uređaja sa nematskim tečnim kristalima.

U praksi se koriste oba tipa nematskih tečnih kristala: oni sa pozitivnom $\Delta\epsilon$ i oni sa negativnom $\Delta\epsilon$. U klasičnim TN ("twisted-nematic" – uvrnuti nematski) i STN ("super-twisted-nematic" – jako uvrnuti nematski) koriste se oni sa pozitivnom anizotropijom permitivnosti. Nematici sa pozitivnom anizotropijom permitivnosti se upotrebljavaju takođe u displejima sa širokim uglom gledanja u tehnologiji IPS ("in-plane switching" – dejstvo električnog polja u ravni ćelije piksela displeja). U displejima sa širokim uglom gledanja u tehnologiji VA-TFT ("vertically aligned - thin-film-transistor active addressing" – vertikalno orijentisani mezogeni sa aktivnim upravljanjem) se primenjuju oni sa negativnom anizotropijom permitivnosti.

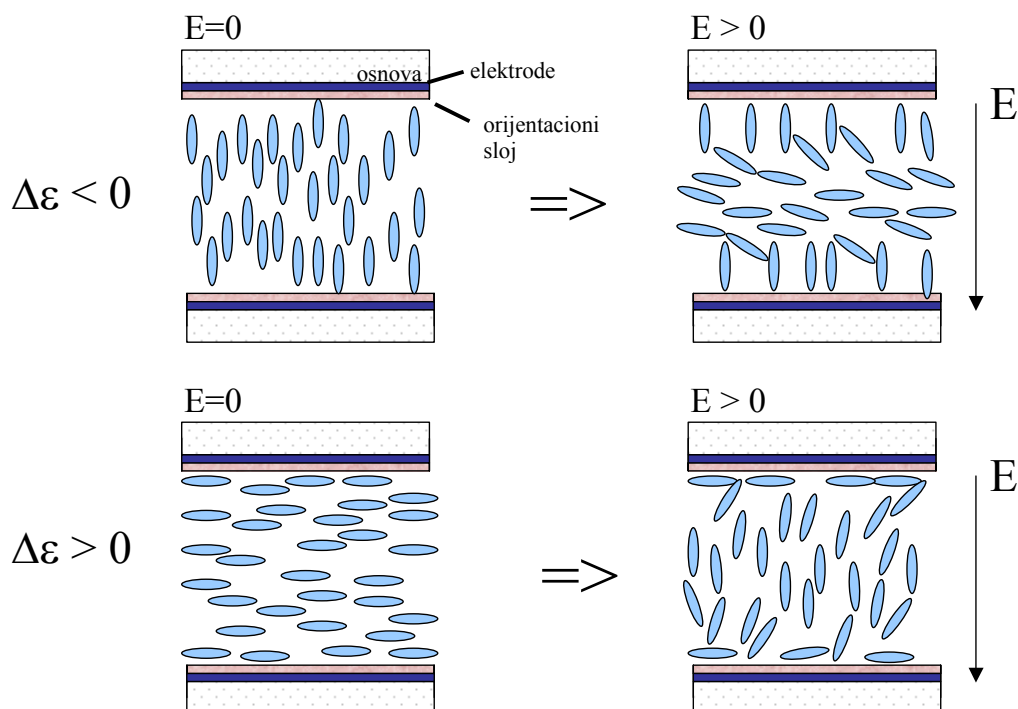
Momenat usled dielektrične anizotropije je dat izrazom

$$\mathbf{M}_d = \Delta\epsilon \epsilon_0 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})(\mathbf{n} \times \mathbf{E})$$

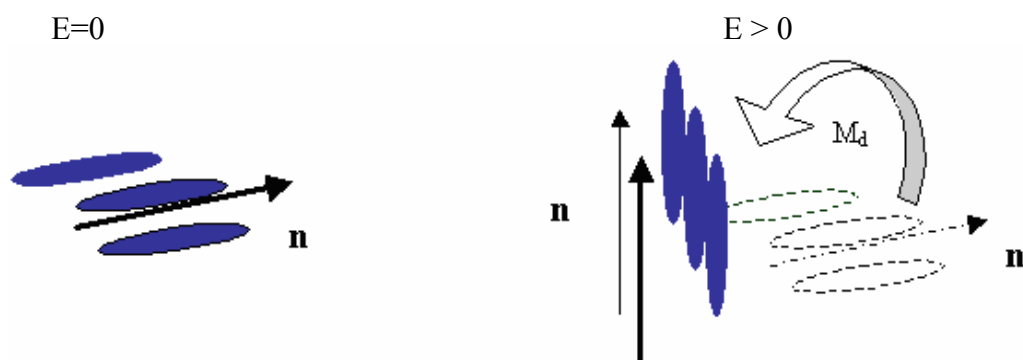
Momenat M_d je 0 za uglove od 0° i 90° između $\mathbf{E}$ i $\mathbf{n}$; maksimalan je za 45° . Za kvazi-statično električno polje (niske frekvencije) primenjuje se $\Delta\epsilon$ za niske f , a za visoke frekvencije spoljašnjeg električnog polja E se primenjuje ϵ za visoke f . Za elektromagnetni talas (ultra visoke frekvencije) uzima se $\Delta\epsilon^{\text{opt}}$. ϵ_0 je permitivnost vakuuma.

U koliko postoji vektor polarizacije u materijalu $\mathbf{P}_s$ (spontana polarizacija od stalnih dipola), indukovani moment je $\mathbf{M}_p = \mathbf{P}_s \times \mathbf{E}$. Taj efekat je slab kod klasičnih nematskih materijala, ali je dominantan kod hiralne smektičke faze C (SmC*) – feroelektrični tečni kristali.

Ukupan momenat $\mathbf{M}$ usled dejstva električnog polja na mezogen je zbir momenta usled dielektrične anizotropije i usled stalnog dipola mezogena, odnosno $\mathbf{M} = \mathbf{M}_d + \mathbf{M}_p$.



Slika 3.6: Ponašanje tečnog kristala sa negativnom i pozitivnom dielektričnom anizotropijom u električnom polju koje je primenjeno normalno na ćeliju



Slika 3.7: Indukcija momenta usled dielektrične anizotropije M_d u nematskoj fazi za $\Delta\epsilon > 0$

3.1.2. Brzina reakcije nematske ćelije

Posle isključenja električnog polja molekuli u nematskoj fazi se vraćaju u prvobitno stanje usled dejstva elastičnih sila. Za TN ćeliju sa ukrštenim polarizatorima (poglavlje 4.1) to vraćanje određuje vreme isključenja (iz zatamnjenog u transparentno stanje). Ono je za TN ćeliju dato sa:

$$t_{\text{off}} = \gamma_1 d^2 / \pi^2 K,$$

gde je d debljina ćelije, $K = K_{11} + (K_{33} - 2K_{22})/4$ efektivni koeficijent elastičnosti i γ_1 rotaciona viskoznost. Vreme isključenja zavisi samo od parametara materijala: smanjuje se sa

povećanjem elastičnosti materijala K i smanjenjem rotacione viskoznosti γ_1 . Vreme uključenja TN ćelije zavisi od tih parametara, ali takođe od električnog polja i anizotropije permitivnosti. Važi:

$$t_{on} = \gamma_1 d^2 / (\Delta\epsilon\epsilon_0 V - \pi^2 K),$$

gde je V napon na tečnom kristalu $V=E*d$, E - električno polje, d - debljina tečno-kristalnog sloja, a ϵ_0 - permitivnost vakuumu. Talasni vektor nematskog "twist"-a (uvrtanja spirale) je π/d . Izrazi za t_{off} i t_{on} su izvedeni uz restriktivne uslove i kvantitativno nisu tačni. Ipak, oni vrlo tačno predviđaju eksperimentalnu činjenicu da t_{on} zavisi od $\gamma_1/\Delta\epsilon$ (jer važi $\Delta\epsilon\epsilon_0 V \gg \pi^2 K$), a t_{off} zavisi od γ_1/K za materijale (smeše) različitih γ_1 , $\Delta\epsilon$ i K [4].

Napon praga za tranziciju Frederiksa (početak promene orijentacije mezogena pod uticajem električnog/magnetnog polja) dat je izrazom:

$$V_c = \pi (K_{11}/(\Delta\epsilon \epsilon_0))^{1/2},$$

gde je K_{11} koeficijent elastičnosti za deformaciju istezanjem.

Nematski tečni kristali se koriste u izradi TN, STN, bistabilnih, IPS, VA i ECB ćelija (diskutovane su u poglavlju 4).

Nematski materijal za TN ćeliju je brži ako je odnos koeficijenta elastičnosti K_{11}/K_{33} veći, viskoznost γ_1 manja, a $\Delta\epsilon$ što veća. Za TV displeje (video signal) su potrebni brzi nematski materijali. TV primena nije bila moguća sa starim nematskim materijalima jer je njihova brzina bila nedovoljna. Naročito je za IPS ćelije potreban mali koeficijent elastičnosti za uvrtnje (twist) K_{22} (K postaje K_{22}). Za displeje u tehnologiji VA, nematski materijali sa negativnom $\Delta\epsilon$ su bili prvobitno prespori. Nedavno su razvijene nove nematske mešavine koje su dovoljno brze za video signal i koje su omogućile sadašnje komercijalne TV displeje VA sa TFT. One sadrže dodatne molekule sa značajnim permanentnim dipolima; ti molekuli daju veći $-\Delta\epsilon$, uz male γ_1 , što pruža bržu reakciju na promenu električnog polja [5].

Tabela I: *Parametri nekih klasičnih i novijih nematskih materijala [4], [6]*

Tip	E7	RO-TN-200	ZLI-1132	RO-TN-403	MLC-7021-100	MLC-7022-000	MLC-7003	MLC-7026-000
Originalni proizvođač	British Drug House	Hoffmann-La Roche	Merck	Hoffmann-La Roche	Merck	Merck	Merck	Merck
$\epsilon_{ } / \epsilon_0$	19.2	26.02	14.5	24.78				
$\Delta\epsilon/\epsilon_0$	13.80	18.44	10.4	19.18	11.0	8.3	11.0	-3.7
Δn	0.2240	0.2755	0.1420	0.2575	0.1147	0.0873	0.0657	0.0822
γ_1	38 mPa s	84 mPa s	29 mPa s	66 mPa s	130 mPa s	100 mPa s	152 mPa s	126 mPa s
Clp	59 °C	65.5 °C	71 °C	82.1 °C	81.0 °C	81.0 °C	80.0 °C	80 °C
$t_{off}(d=10\mu m)$	160 ms	345 ms	125 ms	210 ms				
V_{10}	1.55V	1.36V	1.78V	1.55V	1.23V	1.44V	1.26V	2.1V
Primena	Klasična mešavina	Klasična mešavina	nova mešavina iz 1977 god.	poboljšana mešavina iz 1978 god.	Mali prenosni sistemi	nove TN ćelije	mali Δn za (trans)reflektivne displeje	VA displeji

V_{10} je napon za 10% transparentnosti. On se razlikuje od V_{th} . Clp je "clearing point", odnosno temperatura prelaska u izotropnu (prozračnu) tečnost.

3.2. Smektički (SmA, SmC, SmC_A)

Smektička faza je uređenija tečno-kristalna faza od nematske. Molekuli su grupisani po slojevima, a rastojanje između slojeva je konstantno u materijalu. Za razliku od nematske faze, osim dominantne orijentacije molekula koja definiše direktor $\mathbf{n}$, u smektičkoj fazi postoji i prostorna uređenost (sl.3.1). Molekuli se slobodno kreću u okviru sloja, koji možemo smatrati kao 2D nematski tečni kristal. Intermolekularne sile su dominantne između centara molekula i one otežavaju prelaz molekula iz jednog u susjedni sloj. Raspored molekula po slojevima nije, međutim, strog, nego može da se opiše periodičnom funkcijom gustine centara mase ρ u zavisnosti od koordinate normalne na slojeve z . Jedan takav model je:

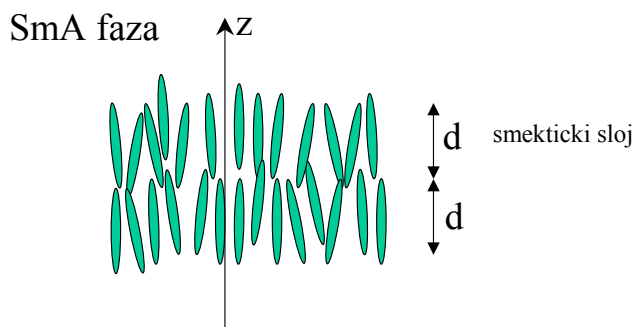
$$\rho(z) = \rho_0 (1 + \Psi \sin(2\pi z/d)),$$

gde je ρ_0 srednja gustina tečnog kristala, Ψ je smektički parameter uređenja, d je debljina smektičkog sloja, a važi za $\Psi < 1$. Za $\Psi = 0$, materijal je nematski; kako Ψ raste, tako molekuli strožije pripadaju jednom sloju, a materijal je uređeniji po slojevima.

Pošto su sile između perifernih krajeva molekula slabe, molekuli u susjednim slojevima praktično ne interaguju; nema korelacije u poziciji molekula između susjednih slojeva. Slojevi skoro slobodno klize jedan po drugom. Termin smektički dolazi od grčke reči “σμηγμα” – sapun.

U smektičkoj A fazi SmA direktor $\mathbf{n}$ je normalan na smektičke slojeve (sl.3.8). SmA je optički jedno-osna (uniaksijalna), poput N faze. Molekuli, takođe, slobodno rotiraju oko svoje duže ose.

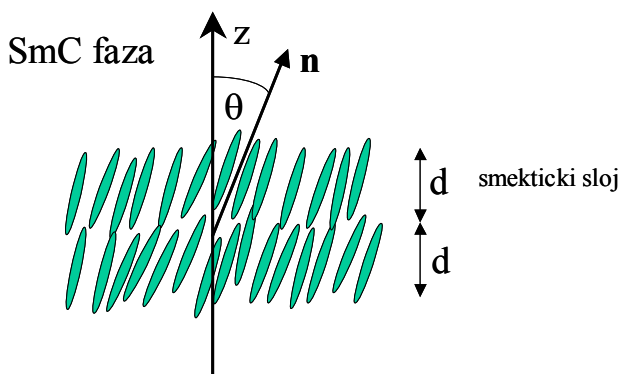
U poređenju sa N fazom, viskoznost SmA je velika.



Slika 3.8: *Prostorna i orijentaciona raspodela mezogena u smektičkoj A fazi*

Sama SmA faza nije našla primenu u elektro-optičkim uređajima. Interesantna je hiralna SmA* faza, koja je SmA faza od hiralnih mezogena. SmA* ima istu uređenost poput SmA faze (direktor je normalan na smektičke slojeve), ali je elektro-optički aktivna. U SmA* fazi se javlja “elektroklinski” efekat: pod uticajem spoljašnjeg električnog polja (koje je paralelno sa smektičkim slojevima) direktor $\mathbf{n}$ se postavlja pod određenim uglom u odnosu na normalu na smektičke slojeve z , a u ravni normalnoj na pravac E . To je izuzetno brz elektro-optički efekat, a biće izložen u delu o SmA*.

Smektička C faza, SmC, je uređenija faza od smektičke A i po tome je bliža čvrstim kristalima. Duže ose molekula su nagnute za određeni ugao θ u odnosu na smektičke slojeve. Ugao nagiba θ je isti za sve smektičke slojeve; direktor $\mathbf{n}$ ima isti pravac u svim smektičkim slojevima (za ceo domen) (sl.3.9). Definiše se ravan nagiba, koju određuje normala na smektičke slojeve i direktor $\mathbf{n}$. Debljina smektičkih slojeva je manja od dužine molekula (manja od one u fazi A). Direktori mogu da rotiraju opisujući kupu čija osnova leži u smektičkom ravni, a osa je normala na smektičke slojeve. Molekuli ne mogu da slobodno rotiraju oko svoje duže ose.

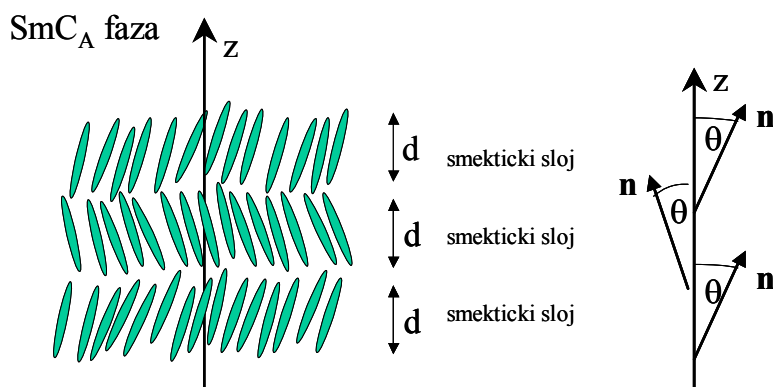


Slika 3.9: Prostorna i orijentaciona raspodela mezogena u smektičkoj C fazi

SmC faza je optički dvo-osna (biaksijalna). U praksi se koristi dosta tačna jedno-osna aproksimacija.

Interesantna je hiralna faza SmC^* , koja je polarna, a pod izvesnim uslovima pokazuje makroskopska feroelektrična svojstva. Kod nje se razvija spirala od smektičkih slojeva, a osa spirale je normala na slojeve. Posmatrajući sloj po sloj direktor $\mathbf{n}$ rotira oko ose spirale. Projekcije direktora $\mathbf{n}$ na smektičke ravni su pod malim uglom za susedne slojeve. SmC^* će biti obrađena detaljnije u poglavlju 3.4.

Kod nekih materijala javlja se smektička tečno-kristalna faza SmC_A , koja je još uređenija od SmC faze. Kod SmC_A faze molekuli alternativno menjaju ugao nagiba θ u susednim slojevima, dok je jedan sloj ekvivalentan smektičkom sloju kod faze SmC. Ako jedan sloj ima ugao nagiba θ , sledeći sloj je nagnut za $-\theta$ i tako redom. Projekcije direktora $\mathbf{n}$ na smektičke ravni imaju isti pravac, a naizmenično menjaju smer po slojevima (sl.3.10).



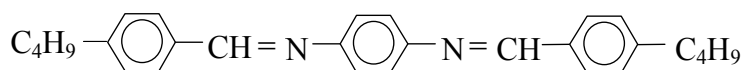
Slika 3.10: Prostorna i orijentaciona raspodela mezogena u alternativnoj smektičkoj C fazi

SmC_A faza sa hiralnim mezogenima poseduje antiferoelektrična svojstva.

Smektička B faza, SmB, za razliku od SmA i SmC, ima savršeno ravne slojeve, periodičnost i čvrstinu čvrstog tela. Ose molekula grupisane unutar slojeva su paralelne, a težišta molekula imaju gusto heksagonalno pakovanje. SmB faza je najuređenija od svih smektičkih mezofaza. Poznate su dve strukture SmB mezofaze: SmB_A kod koje su ose molekula normalne na ravan sloja i SmB_C kod kojih su ose nagnute u odnosu na ravan sloja. Pored navedenih smektičkih mezofaza, postoje i SmD, SmE,...SmI; ukupno 12 podklasa.

Jedan od predstavnika smektičkih materijala je TBBA (4tercbutilcikloheksil-amino-1,4-dimetiliden-cikloheksan). On pokazuje čak tri smektičke mezofaze: SmB, SmC i SmA.

Strukturna formula i temperature faznih prelaza TBBA prikazani su na slici 3.11.

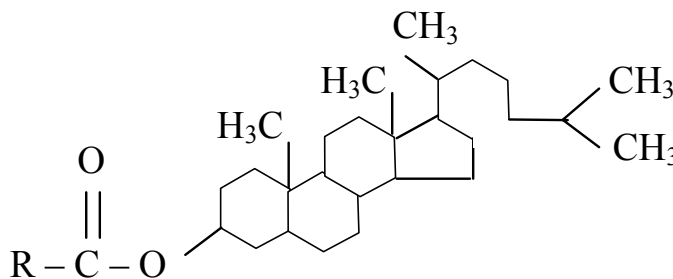


Cr 113°C S_B 144.5°C S_C 172°C S_A 199°C N 235°C I

Slika 3.11: *Strukturna formula i temperature faznih prelaza tečno-kristalnog materijala TBBA (terephthalylidene-bis-(p-butylaniline))*

3.3. Hiralni nematici (N*) i holesterici

Tečni kristali koji poseduju specifičnu prostornu konfiguraciju molekula, koja dovodi do spiralne (helikoidne) strukture materijala, nazivaju se holesterici (sl.3.3). Pojave koje su specifične za holesterike prvobitno su opažene na raznim jedinjenjima holesterola. Molekuli tih jedinjenja se sastoje od holesteričkog jezgra, a ugljovodonični lanac, R-grupa i CH grupe izlaze iz ravni i dovode do zaokretanja molekulskih slojeva za izvestan ugao i obrazovanja spirala u materijalu.



Slika 3.12: *Opšta strukturna formula jedinjenja holesterola, koja pokazuju holesteričku tečno-kristalnu fazu*

U opštem slučaju holesteričnu tečno-kristalnu fazu daju hiralni molekuli (hiralni molekuli su oni koji ne mogu da se transformišu na svoju ogledalsku sliku). Hiralni molekuli obično poseduju nesimetričan atom C (hiralni centar).

Holesterici su se ranije klasifikovali kao posebna grupa tečno-kristalnih jedinjenja. Danas se oni, po mišljenju većine autora, svrstavaju u podklasu nematika, tj. hiralni nematski tečni kristali N* (ekvivalentno - nematoci se mogu smatrati holestericima sa beskonačnim korakom spirale). Optičke karakteristike hiralne nematske ili holesteričke faze se znatno razlikuju od optičkih osobina (nehiralne) nematske faze.

Postoje dva načina dobijanja materijala koji poseduje hiralnu nematsku N* ili holesteričku fazu:

- a) od hiralnih mezogena ili/i
- b) dodavanjem hiralnih dopanta u nehiralne nematske materijale.

Kada se materijal obrazuje od jedinjenja holesterola ili drugih tečnih kristala sa hiralnim mezogenima (slučaj pod a)), sve karakteristike materijala su određene hiralnim mezogenima. Holesteričke smeše za primenu uobičajeno se prave dodavanjem dopanta u obične (nehiralne) nematske materijale biranih svojstava – pristup b). Na taj način se mnoge fizičke karakteristike holesteričke smeše (viskoznost, dvojno prelamanje, koeficijenti elastičnosti, itd.) kontrolišu biranjem nematskog materijala, a hiralna svojstva (korak spirale) se podešavaju hiralnim primesama.

U opštem slučaju, hiralni dopanti nemaju tečno-kristalne faze sami po sebi. Mala koncentracija hiralnog dopanta u nehiralnom tečnom kristalu je dovoljna da proizvede hiralnost cele mezofaze. Tako nematske mešavine za TN i STN ćelije sadrže malu količinu hiralnih dopanta, koji stabilizuju karakterističan “twist” i zajedno sa obrađenom gornjom i donjom površinom stvaraju jedan domen u okviru ćelije.

Hiralni sistem ne treba da bude racemičan, odnosno da sadrži jednake koncentracije desno i levo orijentisanih mezogena. U tom slučaju, premda su mezogeni hiralni, mešavina je nehiralna.

Materijali od hiralnim mezogena – tip a) – imaju tipičan korak spirale reda nekoliko stotina nm. Kod materijala tipa b) biranjem dopanta korak spirale može da se podešava u širokom opsegu od nekoliko desetina μm (slaba hiralnost, za TN i STN ćelije), sve do nekoliko stotina nm (dopanti sa jakim hiralnom aktivnošću). Korak jako zavisi od koncentracije dopanta. Kratke spirale sadrže stotinak molekulskih slojeva, dok duge po nekoliko hiljada.

Spirala, koja se spontano razvija u holesteričkom materijalu, može da bude desno ili levo orijentisana (konvencija je prema desnoj i levoj ruci). Za N* je lokalni direktor $\mathbf{n}$ uvek normalan na pravac spirale. Korak spirale odgovara okretaju direktora za 2π , ali je usled simetrije $\mathbf{n} = -\mathbf{n}$ periodičnost strukture data polovinom koraka (sl.3.3).

3.3.1. Optički efekti

N* tečno-kristalna faza pokazuje jedan specifičan optički efekat: *kružno dvojno prelamanje* (“circular birefringence”). Ako se pravac linearno polarizovane svetlosti poklapa sa osom spirale, levo i desno kružno-polarizovana komponenta će se kretati različitom brzinom kroz tečni kristal, u zavisnosti od toga da li je ona u smeru spirale ili suprotnog smera od smera spirale. Različite brzine kretanja leve i desne (jednake) komponente su posledica

različitih indeksa prelamanja koje one vide: n_{dc} za desnu i n_{lc} za levu³. Kada svetlost prođe duž ose spirale, ona će iz materijala izaći ponovo linearno polarizovana, ali sa pomerenim uglom polarizacije. Ravan polarizacije je pomeren za ugao $\Delta\theta = d\Delta n_c/2 * 2\pi/\lambda$, gde je $\Delta n_c = n_{dc} - n_{lc}$, a d je debljina sloja materijala.

Lokalno, N^* materijal je jedno-osni. Međutim, pravac lokalne optičke ose, poput direktora, spiralno se menja unutar materijala. Posledica je vrlo izražena optička aktivnost N^* materijala, odnosno jaka sposobnost obrtanja ravni polarizacije upadnog zraka pri prolasku kroz materijal. Optička aktivnost je neuporedivo veća do one kod čvrstih tela (na primer 18000°/mm za holesterik, prema 20°/mm za kvarz) [65,67].

U praktičnoj primeni N^* materijala postoje dve karakteristične oblasti talasnih dužina upadne svetlosti od posebnog značaja:

- o talasne dužine λ koje su bliske koraku spirale P ($\lambda \sim P$), i
- o talasne dužine λ koje su mnogo kraće od koraka spirale ($\lambda \ll P$, naročito $\lambda < P\Delta n$).

Odnosno, za dati opseg talasnih dužina λ , postoje dva interesantna izbora N^* materijala:

- oni sa korakom spirale P bliskim talasnoj dužini λ , i
- oni sa korakom spirale P mnogo većim od λ .

Ako je λ bliska P javlja se **karakterističan efekat holesterika: selektivna refleksija** upadne svetlosti. Selektivno je reflektovana kružno-polarizovana komponenta svetlosti čija talasna dužina λ (u tečnom kristalu) odgovara dužini koraka spirale P . Reflektovana talasna dužina ne zavisi od debljine holesteričkog sloja, nego samo od koraka spirale i upadnog ugla u odnosu na osu spirale. Reflektovana je kružno polarizovana komponenta koja odgovara orijentaciji spirale: leva komponenta za levo orijentisanu spiralnu, a desna komponenta za desno orijentisanu. Kružno polarizovana komponenta suprotne orijentacije je propuštena. Takođe su propuštene sve talasne dužine koje ne odgovaraju koraku spirale holesteričkog materijala. Refleksija može da se opiše ekvivalentno Bragovoj (W.L.Bragg) refleksiji na slojevima (poglavlje 6.).

Taj efekat je osnova za konstrukciju reflektivnih holesteričkih displeja, poglavlje 6.

Pretpostavka je da sloj tečnog kristala sadrži mnogo spirala po debljini.

Ako je P korak spirale, λ_0 upadna talasna dužina svetlosti, n_{eff} srednji indeks prelamanja, λ talasna dužina svetlosti u tečnom kristalu, a svetlost pada u pravcu ose spirale, maksimum refleksije nastaje pri

$$\lambda_0 = \lambda * n_{eff} = P * n_{eff}, \text{ odnosno } \lambda = P.$$

Širina reflektovanog spektra $\Delta\lambda$ oko P je data sa

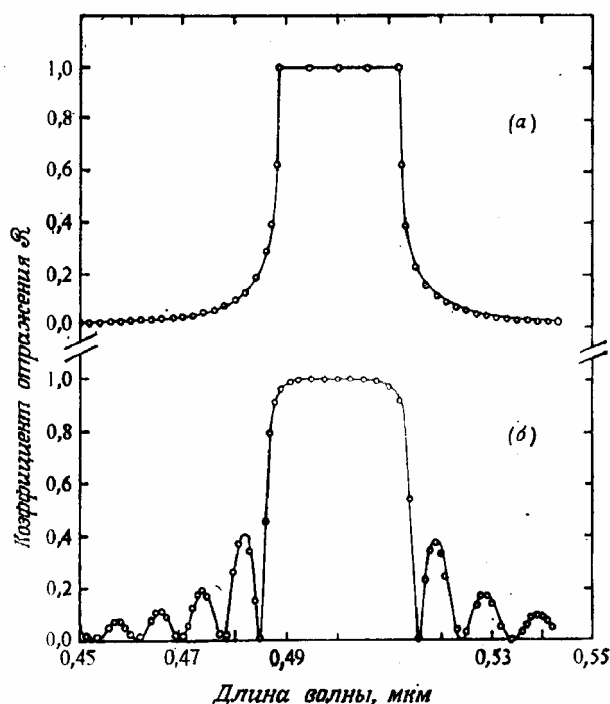
$$\Delta\lambda = P * \Delta n.$$

Za tipične vrednosti $P=500\text{nm}$ i $\Delta n=0.05$, sledi širina reflektovanog opsega od 25nm.

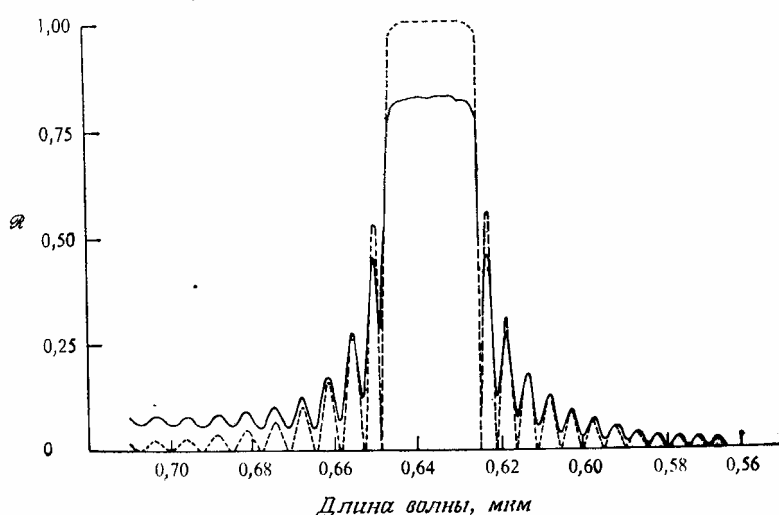
Slike 3.13 i 3.14 pokazuju izračunate i izmerene spektre refleksije holesteričkih tečnih kristala [66].

³ Indeksi prelamanja n_{dc} i n_{lc} zavise od indeksa prelamanja za neredovan ($n_{||}$) i redovan zrak $n_{\perp}$ po [66]: $n_{dc} = n - \Delta n^2 P / 8\lambda$ i $n_{lc} = n + \Delta n^2 P / 8\lambda$, gde je P korak spirale, $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$, a $n = (n_{||} + n_{\perp}) / 2$.

Kako se korak spirale menja sa temperaturom, tako se boja reflektovane svetlosti menja. Povećanjem temperature povećava se ugao između bliskih molekula (rotacija direktora) – usled intenzivnijeg termičkog kretanja; korak spirale se smanjuje, a talasna dužina reflektovane svetlosti opada. Na tom principu rade trake osetljive na temperaturu: boja se menja od crvene do ljubičaste sa povećanjem temperature. Takvi materijali se takođe koriste za pravljenje modernih boja, lakova i tekstila sa specijalnim efektima.



Slika 3.13: Zavisnost koeficijenta refleksije holesterika od talasne dužine upadne svetlosti paralelne osi spirale [66]. a) Polubeskonačna debljina holesterika. b) Sloj holesterika debljine $25P$, gde je P korak spirale. Kružići: tačna teorija. Puna kriva: približna teorija. Parametri računa: $n=1.5$, $\Delta n=0.07$, $\lambda_0=n \cdot P=500\text{nm}$.



Slika 3.14: Eksperimentalna i izračunata zavisnost koeficijenta refleksije holesterika od talasne dužine upadne svetlosti paralelne osi spirale [66]. Puna linija: mereni rezultat za smešu holesterilnonoata, holesterilhlorida i holesterilacetata (21:15:6) na 24°C . Isprekidana linija: račun za $d=21\mu\text{m}$, $P=0.4273\mu\text{m}$.

Ako je **P mnogo veći od λ javlja** se drugi karakterističan efekat kod holesterika: upadna **polarizovana svetlost menja ravan polarizacije prateći spiralu materijala**. Na primer: kod TN ćelije sa $\frac{1}{4}$ P spirale, odnosno uglom uvrtnanja od 90° , upadna svetlost prati uvrtnanje optičke ose materijala i izlazi zakrenute polarizacije za 90° (efekat “twista”).

Taj efekat nastaje samo ako je zadovoljen uslov Mogen (Ch.-V.Mauguin)

$$2\pi/\lambda * \Delta n d \gg \Phi,$$

gde je d debljina sloja N^* , a Φ je ugao uvrtnanja sloja N^* . Linearno polarizovana svetlost talasne dužine λ slediće uvrnutost ćelije i izaći iz sloja kao linearno polarizovana sa rotiranom ravni polarizacije za Φ . Tako N^* sloj deluje kao talasovod. Levi član $2\pi/\lambda * \Delta n d$ je fazna razlika redovnog i neredovnog zraka u sloju tečnog kristala debljine d sa Δn .

Mogenov uslov može se napisati takođe kao $P * \Delta n \gg \lambda$, gde je P korak spirale. Kako je Δn malo, vidimo da je uslov ispunjen za korake spirale P mnogo veće od λ . U tom limitu, obrtnanje ravni polarizacije ne zavisi od koeficijenta anizotropije indeksa prelamanja Δn i razlike dužina optičkih puteva redovnog i neredovnog zraka $d\Delta n$, nego samo od ugla uvrtnanja sloja Φ . Naravno, dvojno prelamanje je uzrok obrtnanja ravni polarizacije.

U opštem slučaju, kada je fazno kašnjenje $d\Delta n/\lambda$ blisko $\Phi/2\pi$, uslov Mogen nije ispunjen i sve talasne dužine ne slede jednako tačno uvrnuće materijala Φ . Transmisija ćelije zavisi od položaja polarizatora, analizatora i ugla zaokreta polarizacije ravni svetlosti. Ugao rotacije polarizacije ravni zavisi od talasne dužine svetlosti λ , debljine sloja d , koeficijenta Δn i ugla Φ . Za paralelne polarizator, analizator i ulaznu orijentaciju mezogena N^* materijala, Guč i Tari (Gooch i Tarry) su izveli izraz za transmisiju ćelije (za ugao $\Phi=90^\circ$) [7]:

$$T = \frac{\sin^2\left(\Phi \cdot \sqrt{1+u^2}\right)}{2(1+u^2)}, \quad u = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d\Delta n}{\Phi}, \quad \Phi = \frac{\pi}{2}.$$

Mogenov limit je u oblasti $u \gg \frac{1}{2}$. Tada $T \rightarrow 0$, odnosno ćelija je tamna. Ako je izlazni polarizator (analizator) pod uglom od 90° u odnosu na ulazni, ćelija je svetla (transparentna) u Mogenovom limitu.

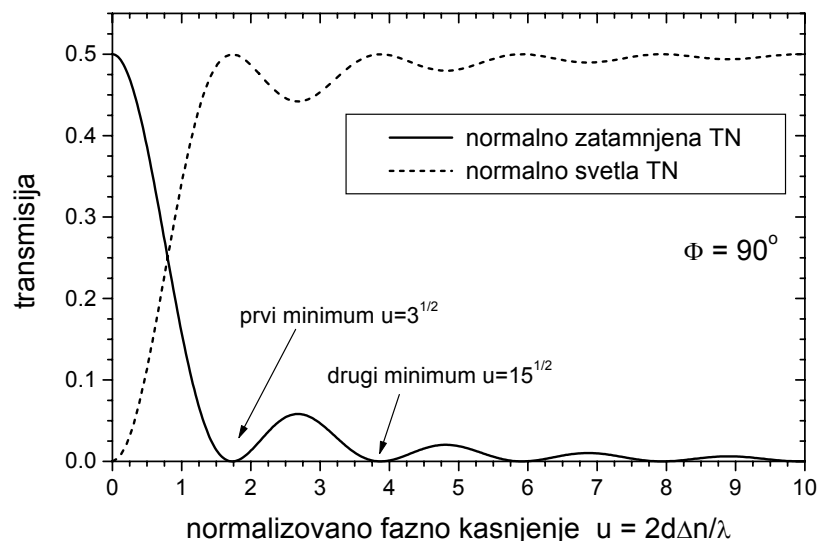
Na tom principu obrću ravan polarizacije TN i STN ćelije.

U opštem slučaju, kada $u=2d\Delta n/\lambda \sim 1/2$, ćelija ne deluje kao običan talasovod i transmisija postaje funkcija parametra u . Slika 3.15 pokazuje transmisiju TN ćelije sa $\Phi=90^\circ$ za paralelne polarizatore (normalno zatamljena) i ukrštene polarizatore (normalno transparentna).

Ćelije koje rade u Mogenovom limitu “idealno” zatamnjuju ili propuštaju svetlost u celom opsegu talasnih dužina vidljivog spektra i nisu osetljive na varijacije debljine d i koeficijenta anizotropije Δn . Te ćelije su, međutim spore usled velike debljine d . Zato se u praksi TN ćelije konstruišu da rade oko prvog ili drugog minimuma (sl.3.15). Tako je TN ćelija idealno zatamnjena ili svetla za jednu biranu talasnu dužinu λ , dok su ostale talasne dužine nešto slabije zatamnjene ili propuštene. Debljina d se obično podešava prema λ oko 550nm (oko sredine vidljivog dela spektra). Primer:

za $\Delta n=0.1$ i $\lambda=550\text{nm}$, sledi debljina TN ćelije za

- prvi minimum $d=4.7\mu\text{m}$,
- drugi minimum $d=10.7\mu\text{m}$.



Slika 3.15: Transmisija TN ćelije sa uglom uvrnuća od 90° u funkciji faznog kašnjenja u (Guč-Tarijeva jednačina). Maksimalna transmisija iznosi 50% usled polarizatora.

3.4. Hiralni smektički (SmC^* , SmA^* , SmC_A^*)

Smektički tečni kristali koji poseduju hiralne molekule (bez rotaciono-translacione simetrije) imaju strogu uređenost po smektičkih slojevima, poput onih sa nehiralnim molekulima SmA i SmC . Rastojanje između slojeva je određeno, a slojevi se ponašaju kao 2D tečnost.

Hiralne Sm faze mogu da se dobiju ili

- o od hiralnih mezogena, ili
- o od nehiralnih mezogena uz dodatak hiralnih primesa (dopanta).

Kao kod N^* faze, dopanti sami nemaju tečno-kristalnu fazu u opštem slučaju. Hiralni dopanti sami daju hiralne efekte u Sm^* fazi, ali je ključan efekat njihov uticaj na nehiralne mezogene osnovnog materijala. Dopanti prouzrokuju hiralne perturbacije na osnovnim mezogenima. U narednim poglavljima ćemo pojedinačne Sm^* faze detaljnije objasniti.

3.4.1. Elektroklinski efekat u SmA^*

U SmA fazi direktor je normalan na smektičke slojeve. Ako su molekuli hiralni, dobijamo SmA^* fazu kod koje je direktor takođe normalan na smektičke slojeve. To je konvencionalan model SmA^* faze. SmA^* je optički jedno-osna. Kod SmA^* faze ne javlja se spirala poput SmC^* (poglavlje 3.4.2). Ipak, za razliku od SmA faze, usled hiralnosti molekula, SmA^* faza je elektro-optički aktivna.

Usled slobodne rotacije molekula oko duže ose, efektivna polarizacija (spontana polarizacija P_s) materijala je 0 u svakoj tački kod SmA^* faze. Ako primenimo spoljašnje

električno polje E paralelno smektičkih slojevima, usled brze reakcije dipola hirlnih molekula sa E , doći će do stvaranja P_s u pravcu E i predominantne orijentacije molekula tako da oni zaklope ugao θ sa normalom na smektičke slojeve. Taj efekat se zove elektroklinski ("electroclinic") efekat i vrlo je brz. Ravan nagiba je takva da je E , odnosno P_s , normalan na nju (sl.3.16). Ugao nagiba direktno zavisi od polja E i može da se poljem moduliše:

$$\theta = e_c E,$$

gde e_c je elektroklinski koeficijent. Za slaba polja e_c je konstantan.

Koeficijent e_c zavisi od temperature [37], a po teoriji prelaza Landau-a važi:

$$e_c = c / \alpha(T-T_c),$$

gde je c konstanta elektroklinske sprege, $\frac{1}{2}\alpha(T-T_c)$ prvi koeficijent Landau-a u razvoju slobodne energije u red, a α koeficijent osetljivosti koji kontroliše nagib molekula.

Veličina $A = \alpha(T-T_c)$ je moduo elastičnosti za ravan nagiba. Konstanta sprege c je veza između stvorenog ugla θ i time spontane polarizacije P_s

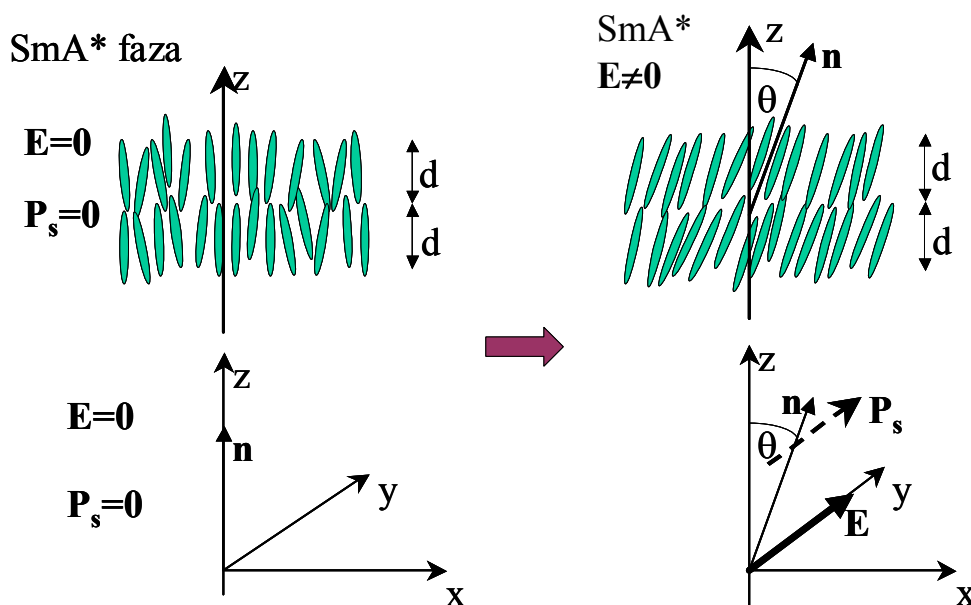
$$P_s = c \cdot \theta.$$

Važi $c = \chi_{\perp} \mu_p$, gde je $\chi_{\perp} = \epsilon_{\perp} - \epsilon_0$ dielektrična susceptibilnost normalno na C_2 (polarizacionu) osu, a μ_p je piezoelektrični moduo. Tako je stvorena (indukovana) polarizacija $P_s = \chi_{\perp} \mu_p \theta$.

Koeficijent e_c može da se napiše kao

$$e_c = \chi_{\perp} \mu_p / A.$$

Elektroklinski efekat je piezoelektrični analogon u tečnim kristalima.



Slika 3.16: Elektroklinski efekat

(P_s je u pravcu E . Pri promeni smera E , P_s takođe menja smer. Tako, pri primeni naizmeničnog električnog polja ugao nagiba periodično se menja od θ ka $-\theta$ i natrag.)

Elektroklinski efekat je najbrži elektro-optički efekat pronađen u tečnim kristalima. Diskutovane su primene za vremena modulacije reda čak $1\mu s$. Vremenska konstanta odziva ugla θ na polje E je data sa

$$\tau_{\theta} = \gamma_{\theta} / A,$$

gde je γ_0 rotaciona viskoznost (θ – ugao uvrtnja oko kraće ose), a $A=\alpha(T_c-T)$ odgovarajući moduo elastičnosti za tu rotaciju. Brzina odziva elektroklinskog efekta zavisi od temperature, ali ne i od polja E .

Vremenska konstanta τ_0 sledi iz jednačine rotacionog kretanja oko kraće ose

$$\gamma_0 \frac{d\theta}{dt} + A \cdot \theta = 0,$$

čije je rešenje $\theta(t) = \theta(0) [1 - \exp(-t/\tau_0)]$.

Odredimo transmisiju ćelije usled elektroklinskog efekta za svetlost koja pada u pravcu koji je paralelan smektičkim slojevima, sa linearnom polarizacijom u ravni normalnoj na smektičke slojeve: ako je izlazni analizator pod uglom 90° , transmisija ćelije menja se po izrazu

$$T = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d \cdot \Delta n}{2}\right),$$

gde je ugao između optičke ose i ulaznog polarizatora jednak uglu otklona $\theta(E)$, a d debljina sloja. Primenjuje se električno polje u pravcu polarizovane svetlosti. Osim intenziteta, izlazna svetlost menja i fazu u odnosu na ulaznu, u funkciji napona na ćeliji. Za slaba električna polja E modulacija T sa E je linearna. Za $\theta=0$ (nema polja), sledi $T=0$ (ulazna svetlost je polarizovana u ravni optičke ose, a izlazni polarizator je blokira). Maksimalna transmisija je moguća za $\theta=45^\circ$, jer je tada ravan polarizacije svetlosti rotirana za 90° . Praktično se, nažalost, sa elektroklinskim efektom postiže znatno manji ugao. Ako se ćelija moduliše sa bipolarnim naponom (pozitivnim i negativnim), a polarizator orijentiše u ravni jednog od nagnutih stanja, može se dobiti 2x veći ugao modulacije nego kada se moduliše samo sa unipolarnim naponom (na primer pozitivnim) (efektivni θ za promenu intenziteta postaje 2θ).

Korišćenjem elektroklinskog efekta moguće je električnim poljem modulisati dvojno prelamanje u vrlo kratkom intervalu vremena. To omogućava na primer realizaciju aktivnih optičkih filtra sa brzom analognom kontrolom (sve do $20\mu s$) [8], [9]. Takvi aktivni optički filtri sa smektičkim materijalima su oko 100x brži od onih sa nematskim [9].

Kao primer primene navodimo jedan usko-pojasni optički filter diskutovan u [8]. SmA* faza materijala ZLI4237100 upotrebljena je za refleksiju karakteristične talasne dužine sa uskim propusnim opsegom (takvi filtri su u elektronici poznati kao klinasti (“notch”) filtri). Ostatak spektra propušten je praktično bez slabljenja.

Napomenimo, da usled primene električnog polja i nagiba molekula, smektički slojevi postaju tanji nego u SmA* fazi bez polja. Tako može da se uoči kako periodično spoljašnje električno polje uzrokuje periodičnu lokalnu deformaciju slojeva. Na pr. za tečni kristal TK-C101 (sa tranzicijom SmA* $56^\circ C$ SmC*; proizvodnja Chisso) pokazana je reakcija deformacija u vremenima $1\mu s$ i $6\mu s$ za bipolarno električno polje ([11], [12] - 2002 god.). Temperatura eksperimenta je bila $T_c + 1K = 57^\circ C$.

Deformacija smektičkih slojeva (smanjenje debljine) u elektroklinskom efektu je karakteristična za konvencionalan model SmA* faze gde je direktor normalan na slojeve. Mnogi SmA* materijali se eksperimentalno tako ponašaju. Neki materijali, međutim, ne pokazuju smanjenje debljine smektičkih slojeva u elektroklinskom efektu. Postoje razne teorije koje objasnjavaju ovu pojavu. Jedna od njih je teorija Devrija (A. de Vries). On je pretpostavio da su molekuli već nagnuti za određeni ugao u odnosu na normalu na slojeve, ali da je projekcija direktora na smektičku ravan slučajno raspodeljena (za SmC* je projekcija u određenom pravcu za jedan sloj). Kada se primeni E polje dolazi do favorizovane orijentacije direktora

(njegove projekcije), usled favorizovane polarizacije, ali se debljine slojeva ne menjaju. Složeniji model i alternativno objašnjenje je diskutovano u [13].

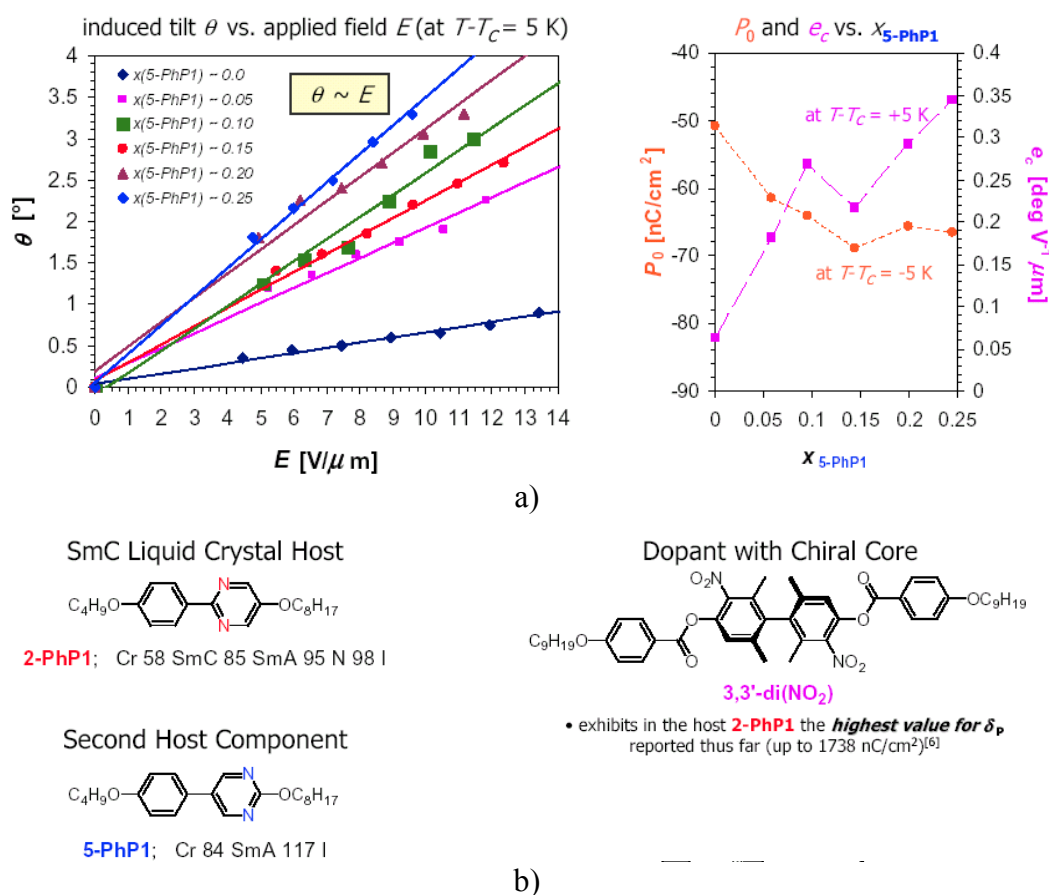
Prilikom prelaza SmC^* u SmA^* , sa povećanjem temperature korak spirale se povećava. Neki istraživači smatraju da korak spirale divergira na temperaturi prelaza, a neki da spirala kvalitativno nestaje pri konačnom koraku.

Uočeno je da materijali sa velikim e_c u SmA^* fazi pokazuju velik θ u SmC^* fazi.

Primer nekih novih SmA^* materijala

Organosiloksan SmA^* - TsiKN65 – je primer čistog materijala (sa hiralnim mezogenima jedne vrste) koji ima jedan od najvećih koeficijenata $e_c \sim 6^\circ \text{V}^{-1} \mu\text{m}$ (pri $T-T_c=5\text{K}$). Noviji rezultati za mešavine nehiralnih SmA mezogena i hiralnih dopanta daju e_c oko $0.1 - 0.4^\circ \text{V}^{-1} \mu\text{m}$ [10]. Karakteristike nekih uspešnih materijala iz [10] su reprodukovane na slici 3.17. Ti materijali su razvijeni da bi imali velik e_c i potreban temperaturni opseg rada za moguću primenu za upravljanje svetlosnim snopom u komunikacionim sistemima.

2-PhP1/5-PhP1/(–)-3,3'-di(NO_2) (4 mol% [7])



Slika 3.17: a) Elektroklinska karakteristika dvokomponentne smeše sa dodatkom dopanta sa hiralnim jezgrom (smeša postaje hiralna). Parametar $x_{5\text{-PhP1}}$ predstavlja udeo druge komponente; b) Sastav dvokomponentne (nehiralne) smeše sa dodatkom dopanta sa hiralnim jezgrom. Dopant prouzrokuje hiralne perturbacije na molekulima osnovne komponente. Moć polarizabilnosti dopanta δ_p je najveća do sada objavljena [10].

3.4.2. Osobine masivnog materijala SmC*

Mejer (R.B.Meyer) je 1975 god. postulirao da SmC faza sa hiralnim molekulima mora da iskaže lokalnu spontanu polarizaciju u smektičkoj ravni (paralelno sa njom), normalno na ravan nagiba. Ravan nagiba čine normala na smektički sloj, z i direktor $\mathbf{n}$. Vektor polarizacije $\mathbf{p}_m$ je normalan na direktor. Pretpostavka je izvedena na osnovu čisto simetrijskih razmatranja i važi za sve smektičke faze sa nagnutim molekulima (ugao $\theta \neq 0$). U smektičkoj fazi SmC* postoje samo dve operacije simetrije (sl.3.18):

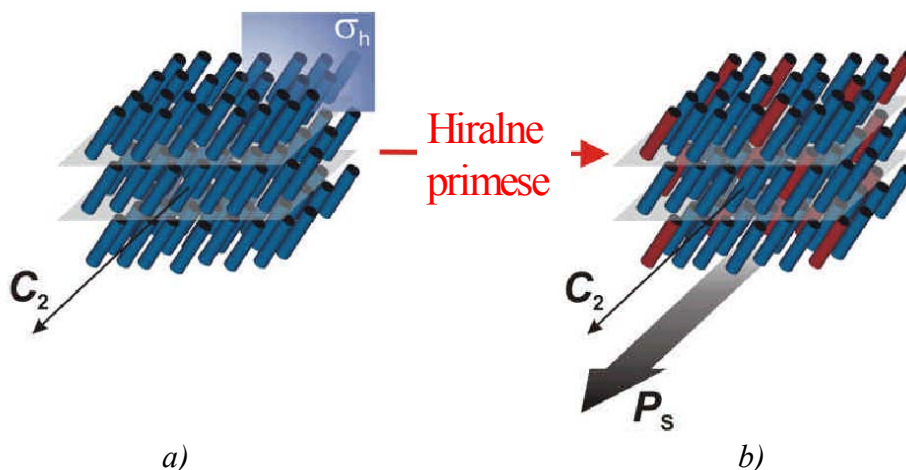
- I. osna simetrija reda 2 oko normale na ravan nagiba molekula, između smektičkih nivoa i
- II. osna simetrija reda 2 oko normale na ravan nagiba molekula, na $d/2$ smektičkog sloja (d – debljina smektičkog sloja).

Ostale strukturne simetrije ne postoje. Osa rotacija drugog reda se označava sa C_2 . Za razliku od SmC faze sa nehiralnim molekulima, u SmC* ne postoji ogledalska simetrija u ravni nagiba molekula σ_h , jer su molekuli hiralni (ne mogu da se transformišu u svoju sliku, po definiciji).

Pravac C_2 je pravac ose rotacija i duž tog pravca ne postoji ni jedna ogledalska ravan u SmC* fazi. Zato, iako mogu da rotiraju oko svoje ose, molekuli se statistički predominantno orijentišu tako da je njihov (stalan) dipol usmeren u pravcu C_2 (sl.3.18).

Oba smera vektora $\mathbf{P}_s$ su moguća u pravcu C_2 : po definiciji, $\mathbf{P}_s$ je pozitivna kada je u smeru vektorskog proizvoda ose $\mathbf{z}$ (normale na slojeve) i direktora $\mathbf{n}$, a negativna suprotnog smera (sl.3.18).

Praksa je pokazala da je vrlo mala promena hiralne-konstitucije mezogena osnovnog materijala, ili promena tipova i koncentracije dopanata dovoljna da jako promeni smer i intenzitet spontane polarizacije.



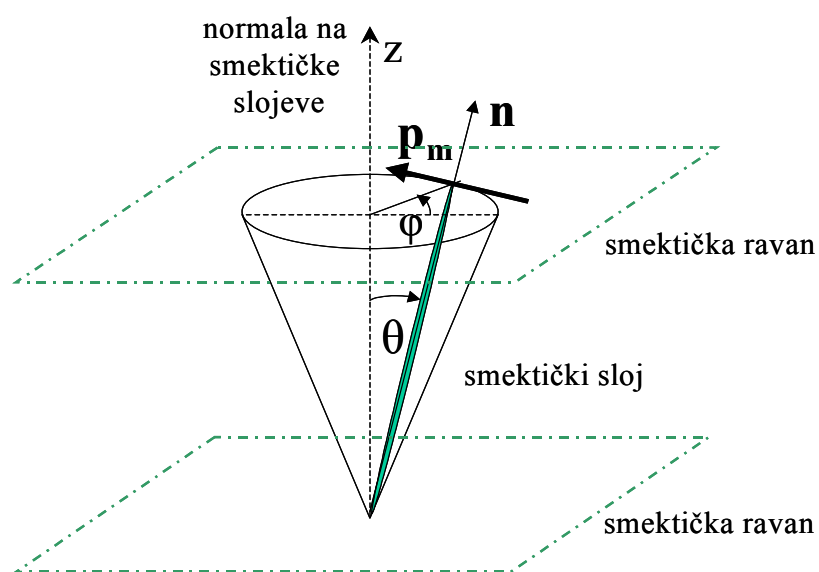
Slika 3.18: a) Osa rotacije C_2 i ravan simetrije σ_h u SmC fazi; b) posle dodavanja primesa u SmC* fazi.

Prvo SmC* jedinjenje DOBAMBC:



sintetizovano je 1975 god. i pokazalo je feroelektrične osobine[14]. Karakteristična spirala je uočena u masivnom materijalu. Pod uticajem spoljašnjeg električnog polja spirala je nestajala, a opažena je i domenska optička slika, koja je menjala znak pri promeni znaka električnog polja.

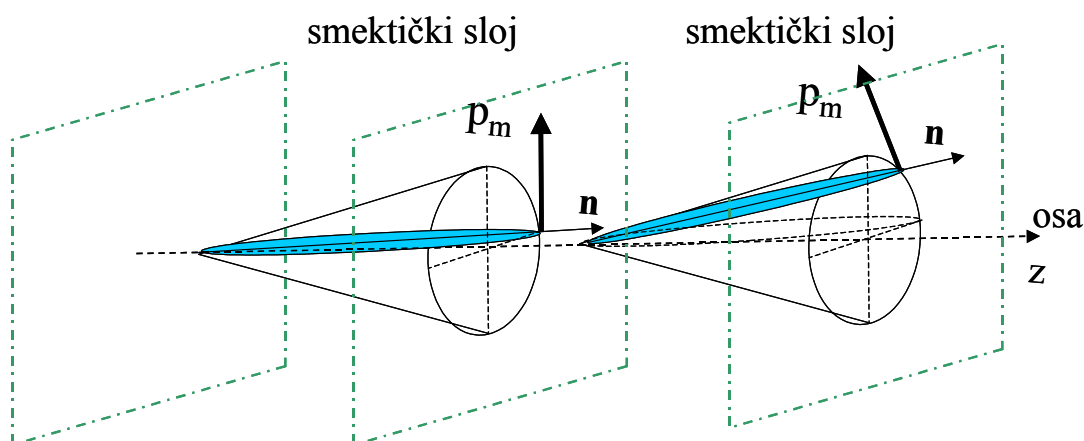
Simetrijska razmatranja za C_2 i polarizacija $\mathbf{P}$, strogo važe za jedan smektički sloj. Skup svih smektičkih slojeva međutim nije orijentisan u istom smeru. U SmC^* fazi molekuli u susednim smektičkim slojevima teže da zauzmu neki ugao jedan u odnosu na drugi. Molekuli u istom sloju imaju isti ugao θ u odnosu na normalu na slojeve i isti pravac direktora $\mathbf{n}$ (sl.3.19). Tako se u SmC^* fazi stvara “super” spirala, pri čemu direktor $\mathbf{n}$ rotira u prostoru prolazeći normalom kroz smektičke slojeve (sl.3.21). Direktor rotira po površini tkz. smektičke kupe, slika 3.19. Osnovu kupe čini krug u smektičkoj ravni čiji je poluprečnik dat projekcijom direktora na smektičku ravan, a visina kupe je debljina smektičkog sloja. Ugao kupe je 2θ .



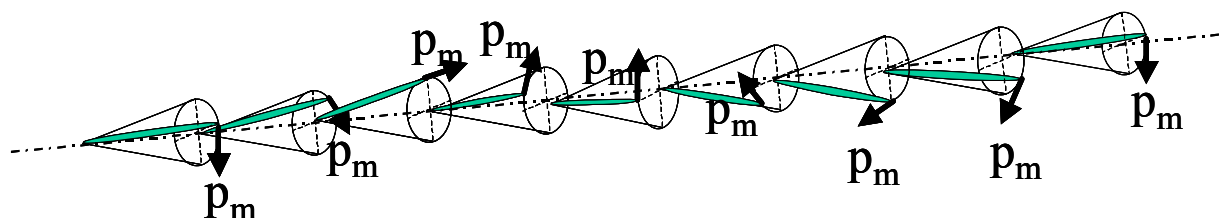
Slika 3.19: Šematski prikaz SmC^* faze: $\mathbf{n}$ – direktor, $\mathbf{p}_m$ – polarizacija jednog molekula, θ - ugao nagiba, ϕ - azimutni ugao. Svi mezogeni istog smektičkog sloja imaju isto $\mathbf{p}_m$, a svi smektički slojevi imaju isto θ .

Osa spirale je normala na slojeve. Razlika u azimutu direktora ϕ između susednih slojeva je mala, reda veličine 1° u praksi (azimut direktora ϕ je ugao projekcije direktora u smektičkoj ravni), slika 3.20. Definiše se korak spirale p_0 , za obrt azimuta direktora od 360° . Usled malog koraka azimuta direktora između susednih slojeva, korak spirale tipično sadrži mnogo smektičkih slojeva (od oko 100 do nekoliko hiljada).

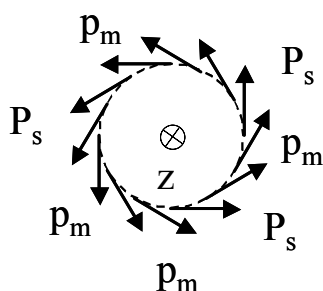
Usled obrtanja direktora oko (duž) ose spirale, osa rotacije C_2 i vektor polarizacije smektičkog sloja $\mathbf{P}_s$ (odnosno $\mathbf{p}_m$) rotiraju u prostoru, opisujući pun krug za jedan korak spirale (slike 3.21 i 3.22). Važi da je $\mathbf{p}_m$ uvek normalan na osu spirale (z). Makroskopska neto polarizacija je 0, za masivan materijal koji sadrži slobodno razvijene spirale. Zato se takvi materijali često zovu helielektrični, umesto feroelektrični.



Slika 3.20: Rotacija direktora po površini smektičke kupe u SmC^* fazi: azimut φ direktora $\mathbf{n}$ i vektora polarizacije $\mathbf{p}_m$ je pomenen za mali ugao za susedne smektičke slojeve. Ugao θ je isti za sve slojeve.

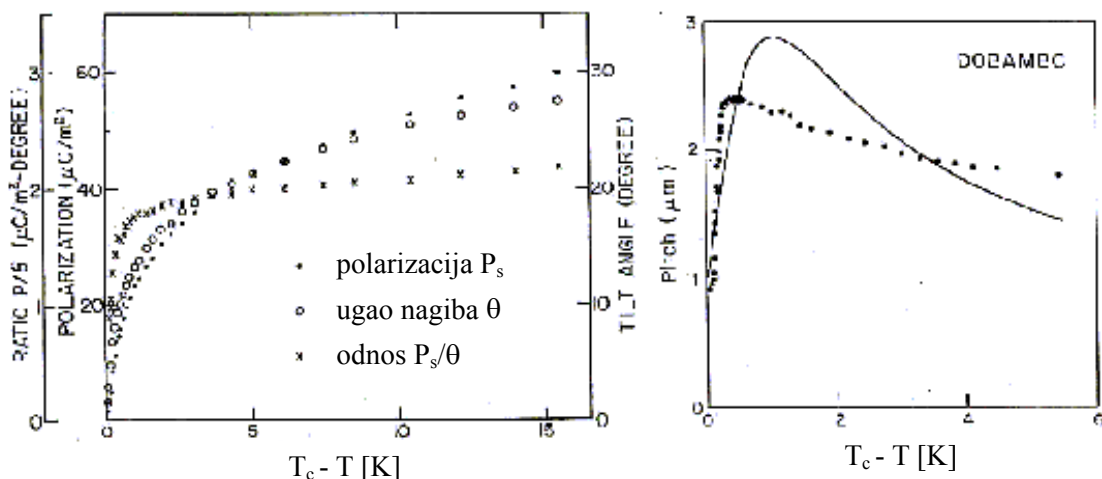


Slika 3.21: Rotacija direktora $\mathbf{n}$ i vektora polarizacije $\mathbf{p}_m$ u smektičkim slojevima SmC^* materijala duž koraka spirale (spirala je desno orijentisana, a p_m je negativan).



Slika 3.22: Rotacija vektora polarizacije smektičkog sloja duž ose spirale z u SmC^* sa spontano razvijenom spiralom. Makroskopska polarizacija je 0.

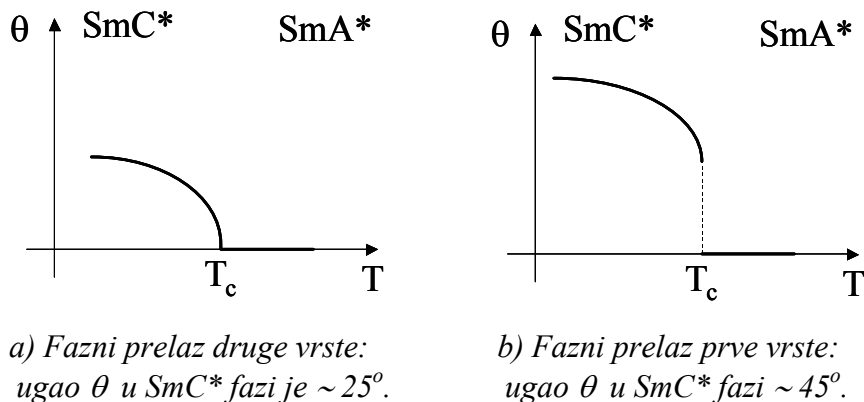
Kod čvrstih kristalnih feroelektričnih materijala dipoli molekula stvaraju snažno unutrašnje polje koje kumulativno reorijentiše ostale molekule utičući na njihov dipol. Tako se pri padu temperature ispod Kirijeve T_c feroelektrični materijal (domeni) naglo polarišu. Kod SmC^* tečnih kristala spontana polarizacija takođe raste ispod temperature prelaza u SmC^* fazu (sl.3.23), ali je početni mehanizam spontane polarizacije diktiran intermolekularnim silama koje organizuju SmC^* fazu, a nije posledica same polarizacije.



Slika 3.23: Prikaz odnosa P_s/θ , P_s i koraka spirale u materijalu DOBAMBC: P_s - spontana polarizacija, θ - ugao nagiba, T_c - temperatura $SmA \rightarrow SmC^*$ faznog prelaza. Pri niskim temperaturama P_s saturira na $\sim 60 \mu C/m^2$.

Tipični materijali imaju fazni prelaz druge vrste, gde pri smanjenju temperature ugao nagiba SmC faze, θ , počinje neprekidno da raste od 0 posle prelaza $SmA^* \rightarrow SmC^*$ ([15]) (sl.3.24). Ti materijali imaju θ obično do 25° . Pri faznom prelazu prve vrste ugao nagiba θ se pri smanjenju temperature skokovito menja od 0 u fazi SmA^* ka nekoj početnoj vrednosti u SmC^* fazi. Pri daljem smanjenju temperature ugao θ raste i saturira u SmC^* fazi. Ovo ponašanje je ostvareno u nekim novim materijalima sa velikim θ (45°) [16,17].

Interesantno je da eksperimentalni rezultati i teorijska razmatranja daju za direktan prelaz $I \rightarrow SmC^*$ takođe fazni prelaz prve vrste [18].



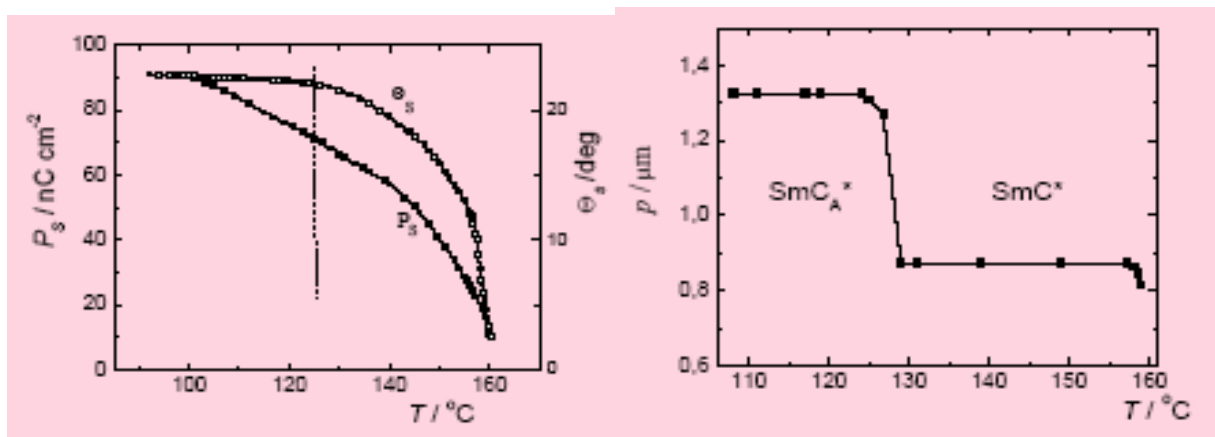
a) Fazni prelaz druge vrste: ugao θ u SmC^* fazi je $\sim 25^\circ$.

b) Fazni prelaz prve vrste: ugao θ u SmC^* fazi $\sim 45^\circ$.

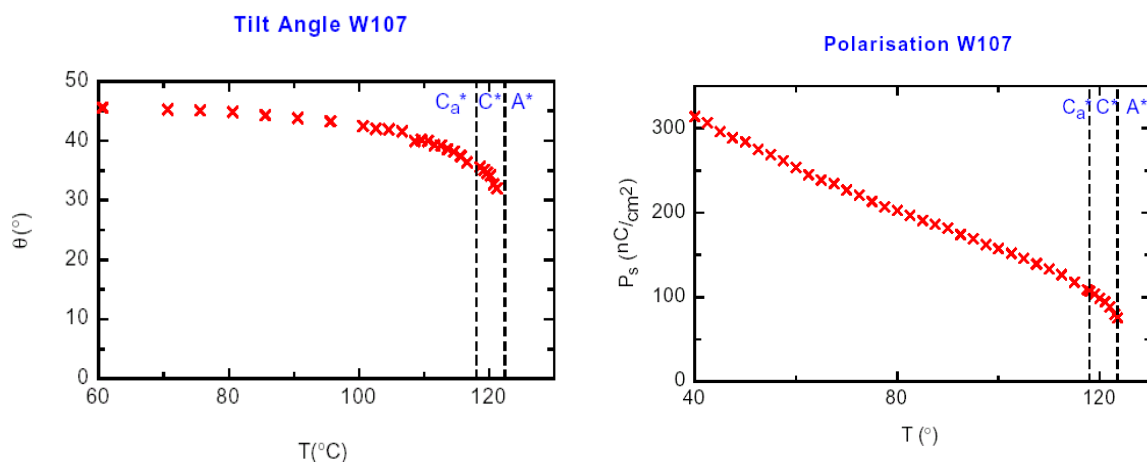
Slika 3.24: Fazni prelazi $SmA^* \rightarrow SmC^*$: a) druge i b) prve vrste.

Primeri SmC^* materijala

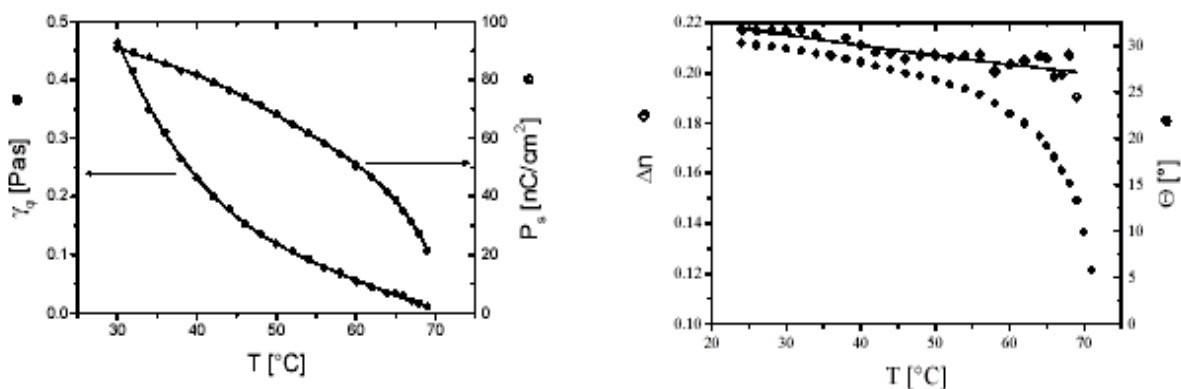
Kao primer navodimo klasičan materijal DOBAMBC (sl.3.23). Ugao θ raste od 0 posle faznog prelaza. Odnos P_s/θ je skoro konstantan u SmC^* fazi. Primeri karakteristika nekih novih materijala su dati na slikama 3.25, 3.26, 3.27 i 3.28. Napomenimo da je materijal na slici 3.26 razvijen prevashodno za specijalnu primenu u antiferoelektričnoj fazi SmC_A^* , gde ima ugao θ od 45° .



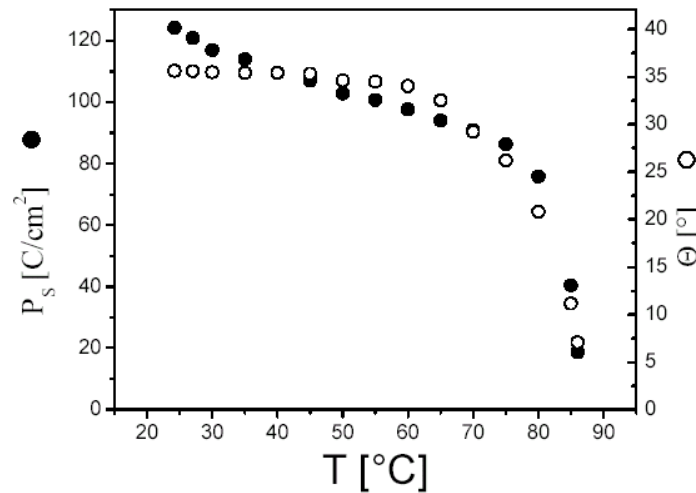
Slika 3.25: Zavisnost ugla nagiba θ , spontane polarizacije P_s i koraka spirale od temperature hiralnog feroelektričnog i antiferoelektričnog materijala: derivat [1]benzotieno[3,2-b][1]benzotiofena označen sa 7H-oct [19]. Korak spirale ima skok na prelazu iz feroelektrične u antiferoelektričnu fazu.



Slika 3.26: Zavisnost ugla nagiba θ , spontane polarizacije P_s i koraka spirale od temperature feroelektričnog i antiferoelektričnog materijala W107 sa velikim uglom θ i $SmA^* \rightarrow SmC^*$ faznim prelazom prve vrste [16], koji karakteriše nagli skok θ na 32° [16].



Slika 3.27: Zavisnost spontane polariacije P_s , kružne viskoznosti γ_ϕ , indeksa dvojnog prelamanja Δn i ugla nagiba θ od temperature u feroelektričnom tečnom kristalu FLC-1TUD [20].



Slika 3.28: Zavisnost spontane polariacije, P_s [nC/cm^2] i ugla nagiba, θ od temperature u materijalu FLC- 13TUD u SmC^* fazi [20].

3.4.3. Reakcija SmC^* na spoljašnje električno polje

U SmC^* materijalu molekuli reaguju na spoljašnje električno polje E kao u nematskom materijalu, putem:

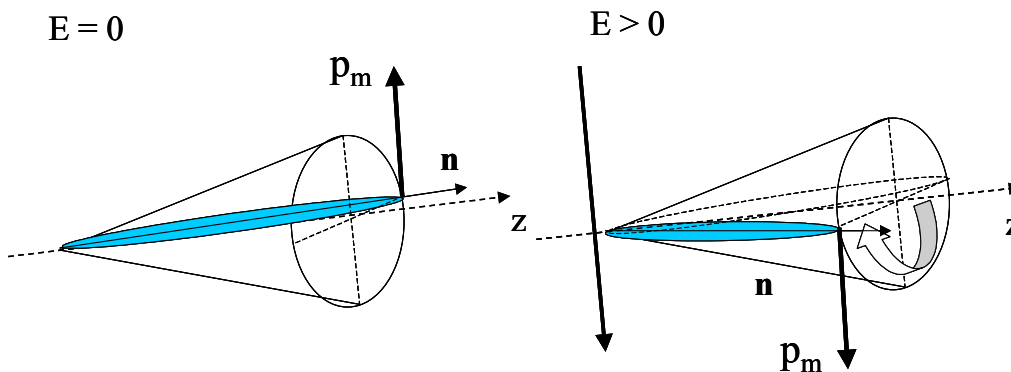
- 1) momenta uzrokovano dielektričnom anizotropijom $\Delta\epsilon$,

$$\mathbf{M}_d = \Delta\epsilon \epsilon_0 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})(\mathbf{n} \times \mathbf{E})$$

- 2) momenta usled stalnih dipola hirlnih molekula $\mathbf{p}_m$.

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{p}_m \times \mathbf{E}.$$

M_p je mnogo snažniji od M_d u SmC^* materijalima. Spoljašnje električno polje preorijentiše molekule SmC^* materijala preko M_p mnogo snažnije i brže nego kod nematskih materijala preko M_d . Momenat M_p je najači kada je ugao između $\mathbf{p}_m$ i $\mathbf{E}$ jednak 90° . Preorijentacija prestaje kada je $\mathbf{p}_m$ u pravcu (smeru) $\mathbf{E}$. Vektor $\mathbf{p}_m$ je lokalna polarizacija $\mathbf{P}_s$.



Slika 3.29: Odgovor mezogena (smektičkog sloja) na primenjeno spoljašnje električno polje E

Brzina orijentacije molekula je data vremenskom konstantom:

$$\tau = \gamma_{\varphi} / (P_s E)$$

gde je γ_{φ} ekvivalentna kružna viskoznost za azumut φ . Kružna viskoznost je vezana za projekciju direktora $\mathbf{n}$ na smektičku ravan $\mathbf{c}$ i zavisi od ugla nagiba θ po: $\gamma_{\varphi} = \gamma_{\varphi}^{\max} \cdot \sin^2 \theta$, odnosno raste do maksimuma kada θ raste do 90° (najveća je kada molekul rotira oko kraće ose). Za materijal sa malim uglom θ , γ_{φ} je mala, a reakcija brža.

Kod SSFLC (površinski stabilisani SmC*) ćelije, električno polje, E , kontroliše brzinu u oba slučaja: pri uključenju i isključenju. Brzina elektro-optičkog efekta (modulacije transmisije ćelije) proporcionalna je $1/E$ pri umerenim poljima. Kod TN ćelije sa nematskim materijalima, brzina zavisi od $1/E$ u uključenju, a pri isključenju se ne kontroliše električnim poljem.

Procenimo brzine uključenja za feroelektričnu SSFLC i TN ćeliju na osnovu sopstvenih parametara materijala:

- za tipične vrednosti $P_s = 100 \mu\text{C}/\text{m}^2$, $\gamma_{\varphi} = 100 \text{mPas}$ sledi

$$\tau [\text{s}] = 500 / E [\text{V}/\text{m}] \text{ za SSFLC, što daje } \tau = 250 \mu\text{s} \text{ za } E = 2 \text{V}/\mu\text{m},$$

- za TN ćeliju sa $\Delta\epsilon = 10$, $d = 5 \mu\text{m}$ i $\gamma_1 = 100 \text{mPas}$ sledi

$$t_{\text{on}} [\text{s}] = \gamma_1 d / \Delta\epsilon \epsilon_0 * 1/E, \quad t_{\text{on}} = 5700 / E [\text{V}/\text{m}], \text{ što rezultuje u } t_{\text{on}} = 2.8 \text{ms} \text{ za } E = 2 \text{V}/\mu\text{m}.$$

Tako je elektro-optički odziv uređaja sa SmC* bar za jedan red veličine brži od uređaja sa nematskim materijalima. Međutim, isključenje TN ćelije traje mnogo duže:

$$t_{\text{off}} = \gamma_1 d^2 / \pi^2 K. \text{ Za tipičnu vrednost } K = 10 \text{pN} \text{ sledi}$$

$$t_{\text{off}} = 25 \text{ms}.$$

Suprotno TN, kod SSFLC t_{off} je istog reda veličine kao t_{on} .

Tako je brzina SSFLC ćelije za zbir $t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$ bar 50 puta veća do TN ćelije u ovom primeru. U praksi su ćelije sa SmC* od 10 do preko 100x brže od nematskih ćelija.

Iz relacije $\tau = \gamma_{\varphi} / (P_s E)$ sledi da je brži materijal sa većim P_s i manjim γ_{φ} . Suviše visok P_s , međutim, podstiče stvaranje defekata prugaste teksture ("chevron" defekata) u SSFLC ćeliji, tako da se praktičan kompromis traži među materijalima sa umereno visokim P_s .

Nezavisno od konfiguracije ćelije sa SmC* materijalom, kada se primeni spoljašnje električno polje E , svi mezogeni materijala trenutno reaguju sa njim preko stalnog dipola. Momenat M_p (i u slaboj meri momenat M_d) uzrokuje prostornu preorijentaciju (rotaciju) mezogena do novog ravnotežnog stanja (stacionarnog stanja). Usled promene srednjeg položaja direktora, menja se orijentacija optičke ose materijala. Polarizovana svetlost prolazeći kroz ćeliju menja ravan polarizacije u funkciji primenjenog električnog polja, usled optičke anizotropije. Zbog ukrštenih polarizatora na ulazu i izlazu ćelije menja se transmisija ćelije $T(V)$ (transmisija u funkciji napona). To je opšti princip rada svih tipova ćelija sa SmC*. Ćelije se razlikuju po organizaciji mezogena u stanju bez spoljašnjeg polja (po stabilnim stanjima koje su nametnute graničnim uslovima), po graničnim uslovima, pravcu spoljašnjeg električnog polja u odnosu na stabilna stanja i po položaju polarizatora prema njima.

U Tabeli II prikazani su literaturni podaci za neke feroelektrične tečne kristale [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27].

Tabela II: Podaci za neke feroelektrične tečne kristale

Materijal	proizvođač	Faze [temperatura u °C]	P_s	θ	γ	Primedba
DOBAMBC	-	I 117 SmA* 95 SmC* 63 SmI* - X X 75 SmC* ...	42 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 50 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	22° 26°	-	pri 90°C pri 80°C
FELIX 016-100	Hoechst	-	105 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	27.15°	60 mPa s	Na 25°C
Felix 015/000	Hoechst	SmX 11 SmC* 71 SmA 83 N 86-83 I	90 - 100 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	24°	60 mPa s	Na 25°C; korak 100 μm
ZLI 4237-100	Merck	-	200 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	24.5°	185 mPa s	Na 20°C
ZLI 4237-000	Merck	-20 SmC* 63	70 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	26°	70 mPs s	na sobnoj T; Dugačak korak spirale > 40 μm
W399	FLCMRC	X 0 SmC* 68 SmA* 94 I	4250 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	33.5°	-	na 25°C; eksperimentalni nelinearni materijal u razvoju za NLO
CS-1011	Chisso Corp.	-	130 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	22°	[690 mPa s]	na 25°C; korak 5 μm ; γ izračunat iz $\tau=1054 \mu\text{s}$
CS-1015	Chisso Corp.	I 78 N* 68 SmA 57 SmC* -17 X	66 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	-	-	$\Delta n=0.14$
CS-1025	Chisso Corp.	X -3 SmC* 62 SmA 84 N 90 I	164 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	21°	40 mPs s	na 25°C; korak 10 μm
FLC-422	Lebedev Fiz. Institut Moskva	X 10 SmC* 58 SmA 80 I	1000 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	23.5°	70 mPs s	na 25°C
PBH-132	T.U. Darmstadt	X 20 SmC* 87 SmA 100 N 101 I	1300 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	35°	400 mPs s	na 25°C; korak 200 nm
W107	MUT Varšava	X 38 SmCa* 118.4 SmC* 122.4 SmA* 132 I	80 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 314 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	33° 45°	-	u SmC* na 120°C u SmCa na 40°C
DOF-0009	Dainippon Ink & Chem.	X -20 SmC* 52 SmA* 70 N* 76 I	245 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	21.6°	19 mPa s	γ izračunat iz $t_{on}(10-90\%)=28 \mu\text{s}$
FLC-1TUD	LFI Moskva TUD	I 97 N* 96 SmA* 72 SmC* (< -20°C) X	920 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	28°	550 mPa s	pri 25°C, Lebedev Fizički Institut Moskva i T.U. Darmstadt
FLC- 13TUD	LFI Moskva TUD	X 35 SmC* 85 SmA* 96 I	1200 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	33°	740 mPa s	pri 25°C, Lebedev Fizički Institut Moskva i T.U. Darmstadt
FLC 5679	Hoffmann- LaRoche	X 5 SmC* 60 SmA 62 I	1000 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	-	-	korak 0.35 μm
SCE 8	Merck	I 100 N 79 SmA* 59 SmC*	51 $\mu\text{C}/\text{m}^2$	19°	648 mPs s	$\Delta n=0.16$, $\delta\epsilon=0.30$, $\Delta\epsilon=-2.0$ (100 kHz)

$\gamma=\gamma_\phi$ - kružna viskoznost c-direktora za azimut ϕ (projekcije direktora **n** na smektičku ravan),

X - kristalna faza, I - izotropna faza, P_s - spontana polarizacija (data je absolutna vrednost; znak nije naznačen).

3.4.4. Osobine masivnog SmC_A^*

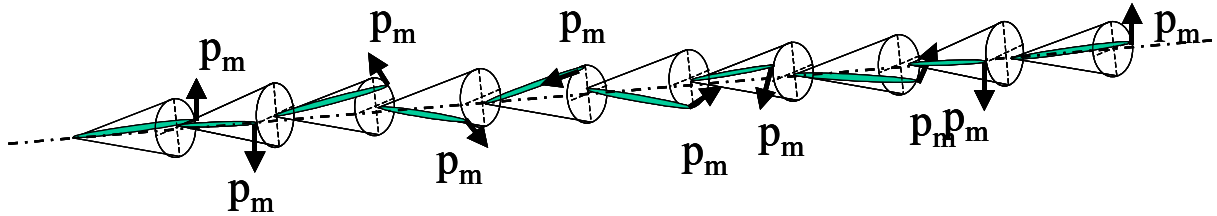
Jedno specifično ponašanje materijala nazvanog MHPOBC u smektičkoj fazi u SSFLC ćeliji je otkrio Čandani (A.Chandani) sa kolegama 1988 god [41]. Za razliku od SmC^* SSFLC, koja ima dva stabilna stanja u P–E karakteristici, za taj materijal oni su opazili tri karakteristična stanja, sa pragovima i histerezisom. Dodatne studije su pokazale da se nedvosmisleno radi o novoj fazi koja dolazi pri manjim temperaturama od SmC^* i nazvali su je SmC_A^* [42]. Fazni prelazi materijala MHPOBC su:

Cr 84°C SmC_A^* 118.4°C Sm_γ^* 119.2°C SmC^* 120.9°C SmC_α 122.0°C SmA^* 148.0°C I

gde je SmC_A^* antiferoelektrična faza, a Sm_γ^* je ferielektrična faza.

Inače, fazni prelaz SmC_A^* - Sm_γ^* - SmC^* se uobičajeno javlja. Samo neki materijali koji imaju SmC^* fazu pokazuju prisustvo SmC_A^* faze.

Analogno SmC i SmC^* fazi, kod hiralne SmC_A faze direktor u smektičkim slojevima teži da zauzme određeni (mali) ugao u odnosu na susedne smektičke slojeve. Međutim, kod hiralne SmC_A faze očuvan je naizmenični položaj ugla direktora u susednim slojevima (sl.3.30). Tako je razlika azimuta direktora u dva susedna smektička sloja jednaka $180^\circ + \delta\varphi$, gde 180° dolazi usled naizmenične prirode ugla θ u SmC_A fazi, a $\delta\varphi$ je posledica hiralnosti. Obrazuje se spirala u pravcu ose normalne na smektičke slojeve. Periodičnost je zadovoljena za pola koraka spirale. Vektor polarizacije praktično se potire već za dva susedna smektička sloja, nezavisno od postajanja spirale. Makroskopska polarizacija SmC_A materijala je 0, bez prisustva spoljašnjeg električnog polja.



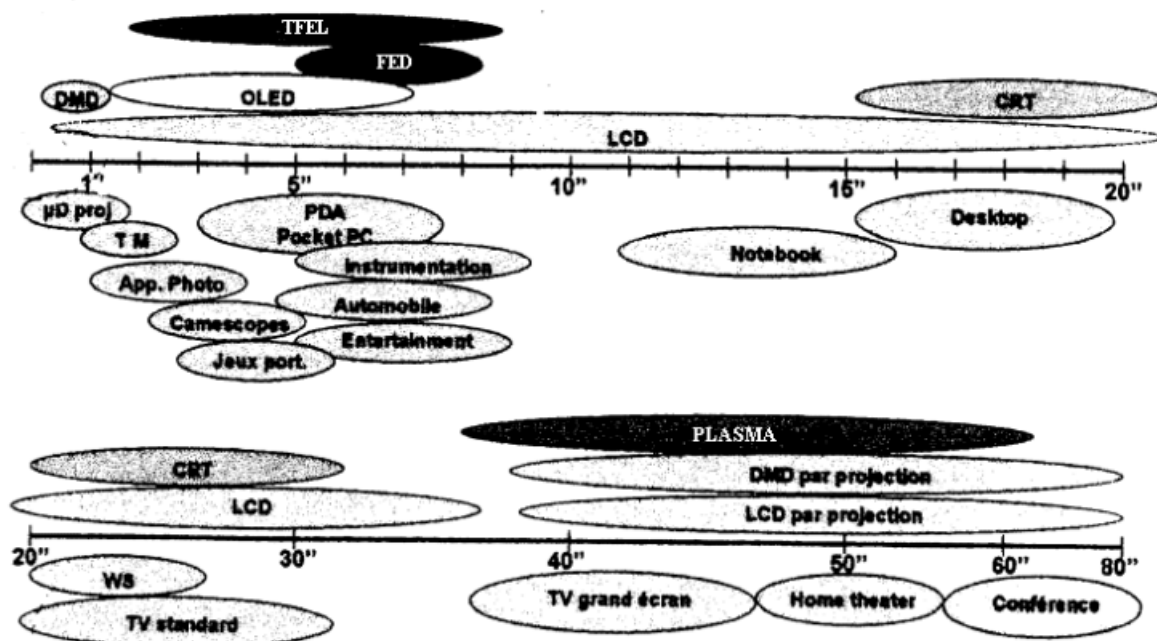
Slika 3.30: Rotacija direktora $\mathbf{n}$ i vektora polarizacije $\mathbf{p}_m$ u smektičkim slojevima SmC_A^* materijala. Rezultantna mikroskopska polarizacija je 0, već za dva susedna smektička sloja.

EKSPERIMENTALNI DEO

4. Displeji na bazi tečnih kristala

Elektronski pokazivači informacija čiji je osnovni material tečni kristal (LCD – liquid crystal display) mogu da se klasifikuju na razne načine. Mogu se podeliti po: tipu tečnog kristala koji se koristi (nematični, smektički, holesterični), metodama za upravljanje (adresiranje), optičkim efektima, tipovima supstrata: kruti i fleksibilni, potrebne energije za rad i održanje slike itd. Takođe, principi rada displeja sa tečnim kristalima su različiti: obrtanje ravni polarizacije, dinamičko rasejanje, apsorpcija primesama ili rad na bazi Bragove refleksije.

Oblasti primene displeja su velike. Različite tehnologije koriste se za displeje različitih dimenzija. Na slici 4.1 ilustrovane su tehnologije za displeje čija je dijagonala u rasponu od dva centimetra do dva metra, kao i tipične oblasti primene.



Slika 4.1: Tehnologije displeja za različite dimenzije (dijagonale) displeja: od 1" (2.5cm) do 80" (2m). Naznačene su tipične oblasti primene displeja različitih dimenzija i tehnologija.

U oblasti malih displeja dominiraju:

OLED – organske LED (light emission diode), za svetle emisijne displeje,

TFEL – elektroluminescentni displej u tankom filmu,

FED – displej sa emisijom poljem,

DMD – reflektivni displeji sa matricom od mikro-elektro-mehaničkih ogledala (MEMS).

Tipične primene malih displeja su za mikro-displeje u projektorima, kamere, foto-aparati, igračke, merni instrumenti i pokazivači.

Displeji sa tečnim kristalima se koriste u različitim izvedbama od najmanjih do najvećih veličina. Kod malih dimenzija dominiraju pasivni displeji, a kod srednjih i velikih aktivni.

CRT – katodna cev se koristi još uvek za računarske stonove monitore i sobne televizijske ekrane. Napomenimo da je kvalitet slike kod kvalitetnih klasičnih katodnih cevi još uvek iznad displeja sa tečnim kristalima.

Tipične primene displeja srednje veličine od 25-80cm su laptopovi, stoni računari, terminali i displeji radnih stanica (WS).

Veliki displeji prave se u “plazma” tehnologiji, ili se velika slika dobija projektorom. Različiti projektori koji koriste tečne kristale su konstruisani.

Tipične primene velikih displeja (preko 1m dijagonale) su kućni bioskopi i konferencijske sale.

U ovom poglavlju daćemo princip rada klasične TN ćelije i opisati opštu konstrukciju realne TN ćelije u displejima. Navešće se više modifikacija TN ćelije u cilju povećanja refleksivnosti TN displeja koji radi u refleksivnom režimu.

Izložićemo razne metode klasifikacije displeja, a potom ćemo kratko opisati način rada, osobine i primenu nekih tipova displeja sa tečnim kristalima.

4.1. Princip rada klasične TN ćelije

Između dva sloja polarizujućeg staklenog supstrata nalazi se sloj tečnih kristala. Na supstrate se sa unutrašnje strane postavlja specijalan sloj za orijentaciju (obično polimer) koji je izbrazdan mikroskopskim kanalima u koje uležu molekuli prvih slojeva tečnog kristala. Na taj način forsira se određen pravac molekula. Ako su ove obrađene površine pod izvesnim uglom, unutar tečnog kristala se obrazuje spiralna struktura (sl.4.2). Molekuli koji se nalaze između prvog i poslednjeg sloja postepeno se uvrću i otuda naziv twisted (uvrnut). Koriste se nematski tečni kristali. U idealnim uslovima oni bi obrazovali spiralu i sami, ali im se u praksi dodaju hiralne primese koje prave holesteričan materijal i stabilizuju spiralu (twist).

Na gornjem i donjem supstratu nalaze se elektrode (tipično indijum-kalaj-oksidi / ITO / InSnO_3 ili poluprovodni polimeri). Elektrode su transparentne za svetlost. Sloj tečnog kristala i provodne elektrode obrazuju kondenzator na čije krajeve se dovodi napon.

Polarizovana svetlost koja dolazi do prvog sloja prati uvrtnje molekula, odnosno tečni kristali obrću ravan polarizacije svetlosti. To omogućuje svetlosti da nesmetano prolazi kroz drugi polarizujući filter (sl.4.2), ako su ulazni i izlazni polarizator podešeni pod pravim uglom. Ova pojava je diskutovana u delu o hiralnim nematskim materijalima u poglavlju 3.3.

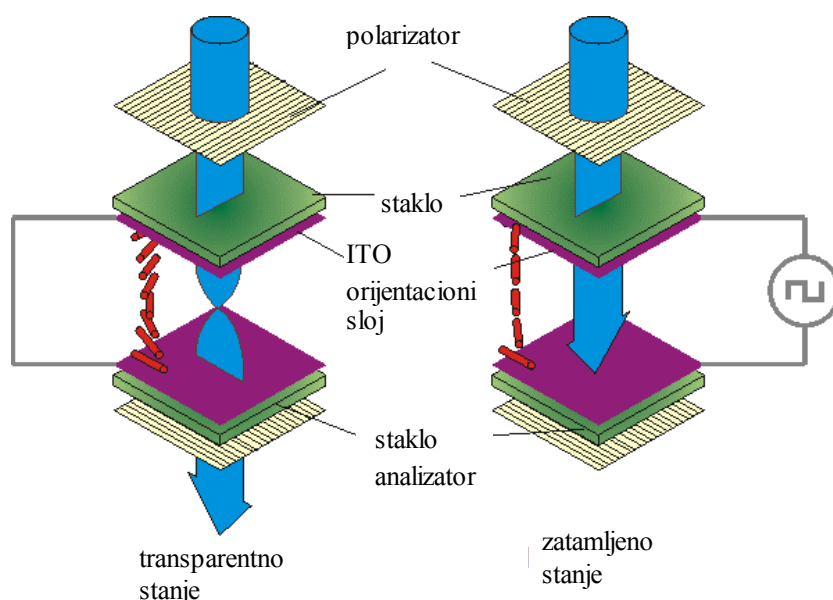
Kada se na elektrode dovede dovoljno visok napon, mezogeni menjaju svoj položaj iz uvrnutog u normalan, usled efekta Frederiksa. Oni više nisu u stanju da obrću ravan polarizacije svetlosti, te svetlost više ne može da prođe kroz drugi polarizujući filter (postavljen pod pravim uglom u odnosu na prvi). Tada se vidi crna površina (sl.4.2). Ova površina odgovara obliku elektrode, odnosno tankom sloju provodnika (ITO) nanetom na odgovarajućim mestima prednje staklene ploče. U slučaju da se formira cifra potrebno je sedam segmentnih elektroda postavljenih kao na slici 4.5 i sedam izvora napona. Za formiranje slova neophodno je 14 segmentnih elektroda. Matrična forma elektroda (na obe pločice se formiraju provodne trake, koje ukrštene obrazuju mrežu piksela slike) omogućuje nam crtanje grafika ili pomeranje figura duž apcise i ordinate (sl.4.5).

Na ovom principu radi većina ćelija sa tečnim kristalima. Varijacije su u uglu pod kojim su zaokrenuti pravci orijentacije molekula gornjeg i donjeg supstrata, odnosno u ukupnom uglu zaokretanja direktora mezogena od gornje do donje ploče. Ako je ugao veći od 180 stepeni govorimo o STN ćeliji (super-twisted-nematic).

Napon praga TN ćelije dat je izrazom

$$V_{th} = \pi/2 ((4K_{11}+K_{33}-2K_{22})/(\Delta\epsilon \epsilon_0))^{1/2} \quad (\text{ekvivalentan } K \text{ je } K_{11}+(K_{33}-2K_{22})/4),$$

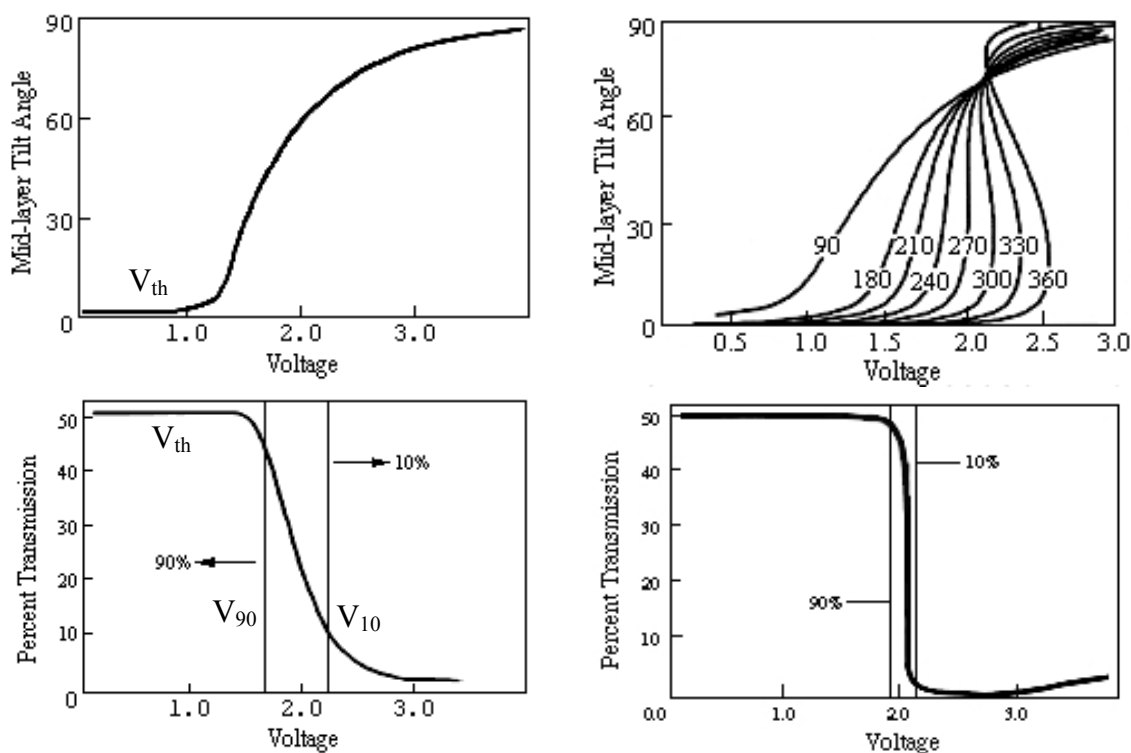
gde V_{th} definiše minimalan napon potreban da bi direktori “twista” počeli da menjaju pravac. To se vidi kao mala promena transmitivnosti (prozračnosti) ćelije (u logaritamskoj skali). Naponi koji se redovno definišu za jednu ćeliju su V_{10} i V_{90} i oni odgovaraju 10% i 90% maksimalne transmisije. Za ćeliju koja je transparentna bez napona (“normally-white”), napon pri kome počinje zatamnjenje je V_{90} i on je veći od V_{th} (napona praga). Ekvivalentno, napon V_{10} je veći od V_{th} za normalno zatamljenu ćeliju (“normally-black”).



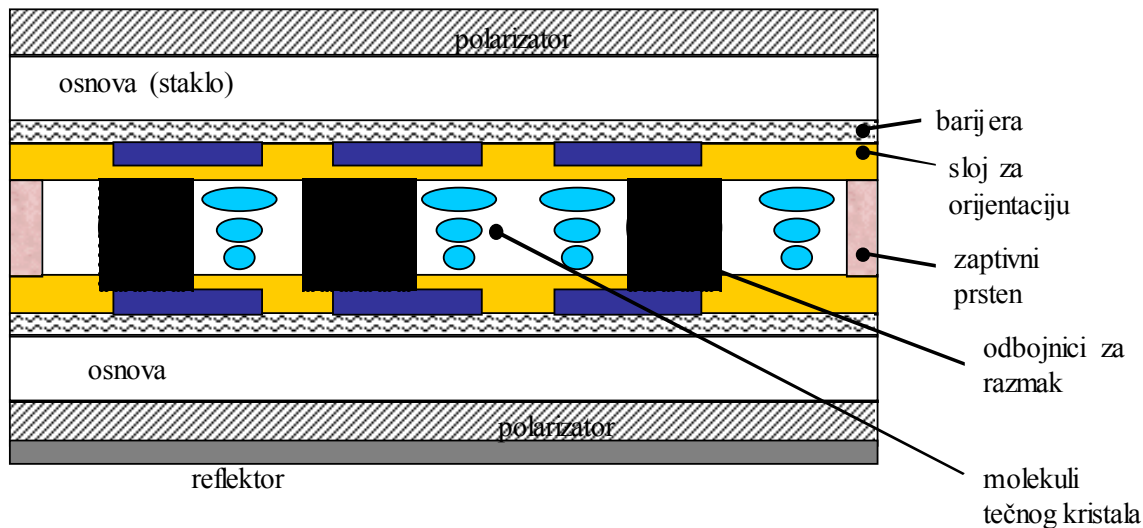
Slika 4.2: Princip rada TN ćelije. Ulazni i izlazni polarizatori su paralelni pravcu orijentacije supstrata, a ugao zakretanja je 90° . U opštem slučaju njihovi pravci i ugao zakretanja su različiti.

Tipične karakteristike TN i STN ćelija su prikazane na slici 4.3 (ćelije su transparentne bez napona, tkz. “normally-white” ćelije). Označeni su napon praga V_{th} i naponi V_{10} i V_{90} .

STN ćelija ima znatno strmiju karakteristiku, usled mnogo jačeg ugla zaokreta N^* sloja. Međutim, STN ćelija unosi hromatska izobličenja svetlosti: daje žućkasto u transparentnom stanju i tamno plavo u zatamljenom stanju, usled izraženog dvojnog prelamanja. Za indikatore taj efekat nije velik problem, ali za kolor displeje slike jeste. Rešenje je stavljanje kompenzacionih filmova u STN ćeliju ili korišćenje dve STN ćelije u seriji. Svetlost prolazi kroz dve STN ćelije koje imaju isti ugao uvtanjanja ali suprotne orijentacije. Tako se efekti neravnomernih faznih pomeraja za različite frekvencije svetlosti potiru pri prolasku svetlosti kroz obe ćelije. Ovakva ćelija se zove double super-twisted-nematic (DSTN) ćelija i našla je primenu u prvobitnim pasivnim displejima računarskih monitora.



Slika 4.3: Zavisnost transmisije i ugla zaokreta srednjeg sloja mezogena (prema normali ćelije) od primenjenog napona na TN i STN ćeliji.



Slika 4.4: Tehnička konstrukcija reflektivne TN ćelije.

TN ćelija koja je šematski prikazana na slici 4.2 je transmisijnog tipa. Realna transmisijna ćelija ima pozadinski izvor svetlosti. Konstrukcija realne TN ćelije, ali za reflektivni režim rada pokazana je na slici 4.4. Ona je ekvivalentna transmisijnoj ćeliji, izuzev reflektora na donjem supstratu. Izvor svetlosti je okolina. Svetlosni zrak prolazi dva puta kroz ćeliju jer se reflektuje o pozadinski reflektor.

Tipična debljina polarizatorskog filma je oko $200\mu\text{m}$, a staklenog supstrata u opsegu $100\mu\text{m}$ - 1.1mm . Staklo za supstrat nije obično, nego siromašno jonima i vodom (obično bor-silikatno staklo – BSG). Reflektor je tanak $100\mu\text{m}$. Transparentne ITO electrode su debljine $10\text{-}50\text{nm}$. Sloj za orijentaciju je, takođe vrlo tanak, reda $10\text{-}100\text{nm}$ (dugački polimerski lanci, obično polyimid). Između supstrata i ITO, odnosno sloja za orijentaciju, postavljena je barijera od oko 100nm , obično od SiO_2 , čija je uloga da izoluje ITO i tečni kristal od primesa u staklu i od okoline. Čelija se sa strana zaptiva slojem epoksi smole (lepka) koji se nanosi serigrafskom štampom, u debljini $5\text{-}10\mu\text{m}$, a koji se posle spajanja gornjeg i donjeg supstrata očvršćava pečenjem (na primer, na 160°C) ili UV zračenjem. Konstantno rastojanje supstrata (debljina sloja tečnog kristala) se održava umetanjem staklenih kuglica ili vlakana tačno određenog prečnika (oko $5\mu\text{m}$) pre spajanja supstrata. Tečni kristal se ubacuje usisavanjem vakuumom i/ili korišćenjem kapilarnog efekta kroz mali otvor u zaptivnom prstenu.

Način rada i uslovi za tamno i svetlo stanje **reflektivne TN ćelije** na slici 4.4 su ekvivalentni transmisionalnoj ćeliji na slici 4.2. Obe ćelije imaju dva polarizatora. Reflektivnost klasične TN reflektivne ćelije na slici 4.4 je vrlo mala (oko 3-4%) usled:

- gubitka intenziteta na polarizatorima, naročito ulaznom,
- gubitka pri refleksiji i
- gubitka usled prolaska kroz jednu ćeliju slike a refleksije kroz drugu ćeliju, koji nastaje kao posledica velikog rastojanja između sloja tečnog kristala i reflektora (među-interakcija piksela – “pixel cross-talk”).

Kod reflektivnog kolor TN displeja gubitak reflektivnosti je takođe usled:

- apsorpcije svetlosti u kolor filtrima i
- pojačanog “cross-talk” efekta.

Postoje više konstrukcija **TN ćelije za reflektivni režim rada**, koje pokazuju znatno **povećanu reflektivnost**. Spominjemo samo nekoliko:

- a) *TN ćelija sa ugrađenim reflektorom i uglom uvrnuća od 90°* . Reflektor se nanosi na donji supstrat, na površinu uz sloj tečnog kristala. Na reflektor se nanosi izolacioni sloj, ITO i sloj za orijentaciju. Tako je reflektor uz samu ćeliju, pa je minimizovan “cross-talk” efekat. Na žalost, usled ulaznog polarizatora reflektivnost je ograničena na oko 7% (za ćeliju sa rednim kolor filtrima) [63].
- b) *TN ćelija sa ugrađenim reflektorom, uglom uvrnuća od 45° i $\lambda/4$ filmom*. Film za kašnjenje od $\lambda/4$ se postavlja na gornji supstrat, ispod polarizatora. Polarizator na gornjem supstratu je ujedno i analizator. U uvrnutom stanju (bez električnog polja) sloj tečnih kristala okreće ravan polarizacije za 45° , a posle refleksije za još 45° u drugom prolasku zraka. Film za fazni pomeraj unosi ukupno kašnjenje od $2 \times 45^\circ = 90^\circ$. Reflektovani zrak prolazi kroz analizator. Ako je primenjeno električno polje, usled efekta Frederiksa svetlost ne menja ravan polarizacije u sloju tečnog kristala, te je ukupan zaokret ravni polarizacije dat dejstvom filma za kašnjenje (90°). Polarizator apsorbuje svetlost i ćelija je tamna. Takav displej daje reflektivnost do oko 14% [63].
- c) *MTN (mixed-mode-twisted nematic) reflektivna ćelija*. Ćelija je reflektivna. Sastoji se od jednog ulaznog polarizatora na gornjem supstratu, filma za $\lambda/4$ kašnjenje, sloja u režimu rada MTN (mešoviti režim rada uvrnutog nematika) i reflektora na donjem supstratu. Sloj tečnog kristala radi u oblasti $d \cdot \Delta n$

ispod prvog minimuma Guč-Tarija (ugao uvrtnja je oko $70-90^\circ$, slično TN). Čelija daje efekat obrtanja ravni polarizacije (ne prati u potpunosti “twist”), uz fazno kašnjenje, [44].

d) *MTN čelija sa ugrađenim reflektorom.*

Čelija se sastoji od MTN čelije, a reflektor je nanet na donji supstrat uz sloj tečnog kristala radi smanjenja “cross-talk” efekta.

Za još veće poboljšanje reflektivnosti potrebno je da se primene koncepti čelija displeja bez polarizatora.

4.2. Tipovi displeja: klasifikacije i osobine

Po metodi upravljanja displeje sa tečnim kristalima delimo na:

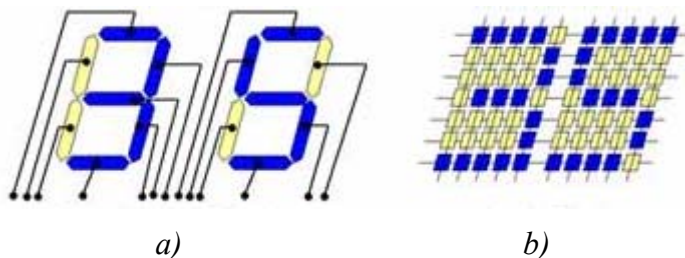
- displeje sa segmentima
- displeje sa matricom (pikseli ili zrna slike)

Kod displeja sa **segmentima** elektrode su napravljene (nacrtane) u obliku slike koja treba da bude prikazana. Kada se na segment dovede napon, segment postaje ili taman ili svetao. Moguće je segmente grupisati i tako koristiti isti deo površine displeja za pokazivanje različitih informacija, kao na primer: - i +, ili 7-segmentna konfiguracija za pokazivanje svih 10 brojeva u indikatorima (0 do 9), kao i nekih slova. Sedam-segmentna konfiguracija se sretala skoro u svim mernim indikatorima i kalkulatorima, počev od prvih displeja sa tečnim kristalima. Displeji sa segmentima se prave sa TN čelijama, uz moguć dodatak optički aktivnih slojeva i kolor filtra radi poboljšanja optičkih osobina displeja.

Displeji sa **matricom** mogu da budu

- o pasivni
- o aktivni

Kod displeja sa matricom elektrode se prave u obliku pruga na gornjoj i donjoj ploči displeja. Gornje i donje elektrode su ukrštene i u preseccima definišu zrna slike (piksle). Broj piksela (rezolucija) je određen proizvodom broja donjih i gornjih elektroda (kolone x vrste). Piksel je pobuđen, ako su i gornja i donja elektroda pobuđene.



Slika 4.5: Prikaz informacije u: a) displeju sa segmentima; b) u matičnom displeju.

Displej sa segmentima ima male mogućnosti za pokazivanje informacije ali se pubuđuje direktno i po želji stalno. Displej sa matricom ima mogućnost da se svakim zrnom slike posebno upravlja, ali to upravljanje može da bude samo putem adresiranja u vremenskom multipleksu⁴ (usled ograničenog broja kontakta) (sl.4.5).

Kod **pasivnih** displeja pikseli se pobuđuju za kratko vreme, sa mnogo dužom periodom signala od vremena same pobude. Pikseli treba da drže informaciju o stanju za vreme neaktivnog dela periode, sve dok se ponovo ne pobude. Za vreme neaktivnog dela, oni se ometaju naponima kojima se adresiraju drugi pikseli slike (neželjena pojava). Posledica toga je ograničenje razlike napona u uključenom i isključenom stanju $V_{on} - V_{off}$ koju je moguće postići sa pasivnim upravljanjem. Za to, takozvano multipleksno adresiranje, taj odnos opada sa porastom broja redova u displeju N . Za $N > 10$ odnos V_{on}/V_{off} je manji od 1.4, a za $N > 100$ on pada na 1.1. Realne ćelije displeja sa tečnim kristalima imaju mekanu (sporo-promenljivu) karakteristiku transmisije u funkciji napona na ćeliji. Pri V_{off} ćelija treba da bude na primer crna, dok za V_{on} ona treba da propušta svetlost (bela). Kako transmisija nije oštra funkcija napona, kontrast (odnos svetlog i tamnog stanja ćelije) je ograničen kod pasivnog upravljanja. Kod matrica sa velikim brojem redova N , usled malog odnosa V_{on}/V_{off} , kontrast postaje veoma loš.

Pasivni displeji sa malom matricom prave se sa TN ćelijama. Meka karakteristika TN ćelije: transmisija u funkciji napona, nije problem za male matrične displeje. Za veće matrične displeje mora da se upotrebi STN ćelija. Kod STN ćelije je dizajnirani ugao urvtanja hiralnog nematskog materijala veći od 180° (tipičan ugao je oko 210°). Ćelija ima mnogo oštriju promenu transmisije sa promenom napona kada napon pređe prag pobuđivanja ćelije. STN ćelija standardno se koristi za pasivne matrične displeje srednje veličine. Veći kolor displeji za računarske ekrane i televizore nije moguće napraviti sa pasivnim upravljanjem i STN ćelijama.

Ograničenje STN i TN ćelija usled multipleksiranja kod pasivnih displeja prevazilazi se:

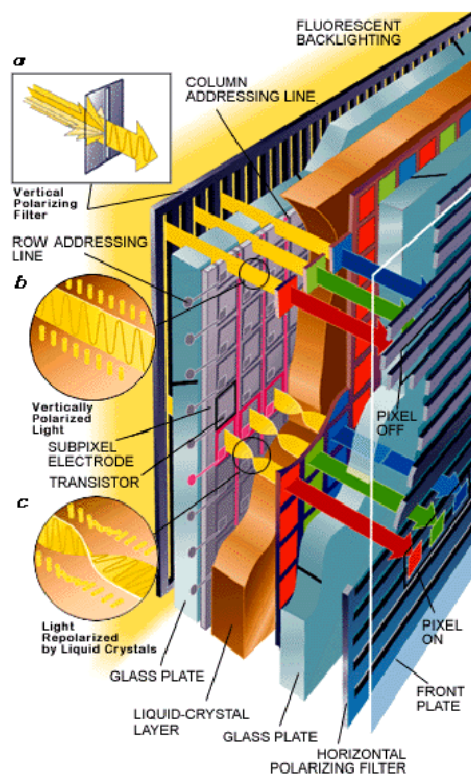
- korišćenjem bistabilnih ćelija u pasivnim displejima, ili
- aktivnim displejima.

Aktivni displeji sa tečnim kristalima imaju osnovnu strukturu poput pasivnih matričnih displeja, ali svakim pikselom se upravlja aktivnom elektronskom komponentom. Kao aktivna komponenta se koristi MOS transistor u tankom filmu od polisilicijuma ili amorfnog silicijuma. Umesto da se piksel slike direktno adresira, adresira se MOSFET koji ga pobuđuje dovodeći visok napon na piksel. Kada piksel nije direktno adresiran, MOSFET izoluje kapacitet koji čuva informaciju o stanju ćelije i samu ćeliju od signala kojima se adresiraju drugi pikseli. Uticaj drugih piksela je mali i svaki piksel može da čuva i pokazuje svoje stanje prilično stabilno dok ne bude ponovo adresiran. Tako nema ograničenja u vezi male razlike $V_{on}-V_{off}$, kao kod pasivno adresiranih displeja, kada je broj redova velik. Aktivnim upravljanjem mogu da se naprave veliki displeji za računarske monitore i pokretne slike (TV).

⁴ Multipleksiranje je postupak u elektrotehnici kojim se signali sa više ulaza kombinuju u jedan izlaz. Ako je to kombinovanje tako da se svakom ulaznom signalu dodeljuje jedan interval vremena u izlaznom signalu, tada govorimo o vremenskom multipleksu. Ako se kod matričnog displeja selektuju redovi jedan za drugim, a informacija o stanju ćelija upisuje istovremeno u svim kolonama, tada su stanja po redovima multipleksirana, a svaka kolona predstavlja jedan multipleksiran izlazni signal. Redni broj adresiranog reda je tkz. selektor.

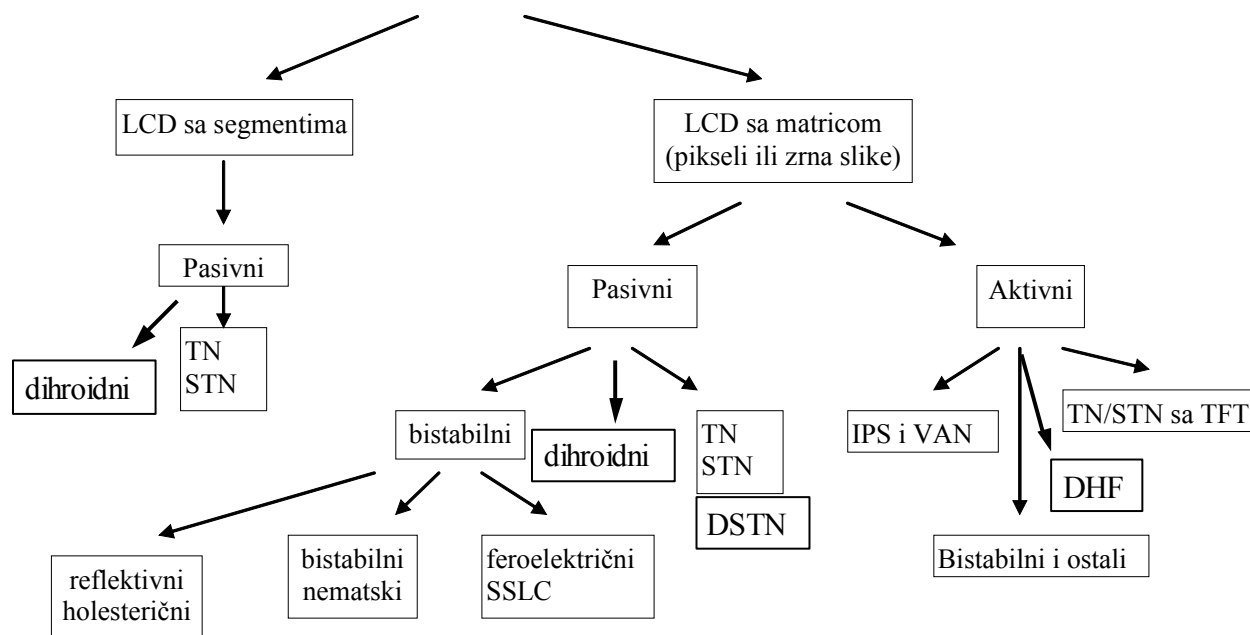
U tehnologiji izrade se pobuđujući MOSFET-ovi prave na sloju amornog ili polisilicijumskog sloja koji je integrisan sa tečno-kristalnim panelom, po celoj površini panela. Ovi displeji su poznati kao LCD-TFT (tečno-kristalni displeji sa tranzistorima u tehnologiji tankog filma – thin-film-transistors). Broj pobudnih TF MOSFET-ova je jednak broju piksela slike, što za sliku rezolucije 1280x1028 sa tri potpiksela (3 osnovne boje) daje 3.95 miliona TF tranzistora, od kojih skoro svi moraju da rade. Zato ta tehnologija zahteva mikroelektronske procesne uslove. Aktivni displeji su bolji, ali skuplji od pasivnih. Kvalitet displeja sa TFT u polisilicijumskom filmu je bolji od onih u filmu od amornog silicijuma, ali su polisilicijumski paneli skuplji i teže se prave za velike panele. Jednostavno, pokretljivost elektrona u polisilicijumu je veća od one u amornom silicijumu. Naravno, idealno bi bilo da se aktivan upravljački deo sa MOSFET-ovima pravi u monokristalnom silicijumu, ali bi ti displeji bili mali i vrlo skupi.

Na slici 4.6 prikazana je standardna realizacija klasičnog kolor displeja sa aktivnim upravljanjem na bazi TN ćelije. Displej radi u transmisivnom (prozračnom) režimu rada. Svaki piksel se sastoji od tri podpiksela sa tri osnovna kolor filtra integrisana u matricu (plavo B, zeleno G i crveno R). Boje se stvaraju po aditivnom principu u oku, odnosno mozgu. Svaki podpiksel je kontrolisan sopstvenim MOS tranzistorom.



Slika 4.6: Konstrukcija kolor TN displeja sa aktivnim upravljanjem.
 "Fluorescent backlighting" – pozadinsko osvetljenje (fluorescentno)
 "Column addressing line" – elektroda za adresiranje kolona
 "Row addressing line" – elektroda za adresiranje vrsta
 "Vertical polarizing filter" – ulazni vertikalni polarizator
 "Horizontal polarizing filter" – izlazni horizontalni polarizator
 "Subpixel electrode" – elektroda za selekciju subpiksela
 "Transistor" – MOS tranzistor u tankom filmu
 "Glass plate" – staklena ploča supstrata
 "Liquid-crystal layer" – sloj tečnog kristala
 "Front plate" – prednja zaštitna ploča

Vrste displeja sa tečnim kristalima:



Displeje sa tečnim kristalima možemo da klasifikujemo

po svetlosti koja donosi pokazanu informaciju na:

- reflektivne
- transmitivne i
- transreflektivne.

Po broju polarizatora: - sa dva polarizatora

- TN ćelija
- STN ćelija i DSTN
- IPS ćelija (“in-plane-switching”),
ćelija sa prekidanjem u ravni
- VAN i VMD/MVA ćelije (“vertically aligned
nematic” i “vertical multidomain”), ćelije sa
vertikalnom orijentacijom i više domena
- ECB (“electrically-controlled birefringence”),
dvojno prelamanje kontrolisano E-poljem
- Feroelektrični sa SSFLC (“surface-stabilized
ferroelectric”), površinski-stabilisan
feroelektrični tečni kristal
- Bistabilne ćelije sa nematikom
- DHF (“deformed-helix-ferroelectric”),
feroelektrici u režimu deformisane spirale

- sa jednim polarizatorom

- reflektivne TN ćelije sa filmom za kašnjenje
- MTN ćelija (“mixed-mode twisted nematik”),
mešoviti režim rada uvrnutog nematika
- dihroidna ćelija (“guest-host”), gost-domaćin
ćelija Hajlmajera

- bez polarizatora

- ćelija na principu dinamičkog rasejanja (DSM)
- pleohroidna/dihroidna holesterička ćelija Vajt i Tejlora (White i Taylor)
- PDLC ćelije, polimer-disperzovani tečni kristali
- CT ćelije (“cholesteric textures”), teksture holesterika

Po krutoći na: - klasične čvrste

- fleksibilne (savitljive). Fleksibilni displeji mogu da se prave sa
 - osnovom od tankog stakla (obloženom dvostrano polimerom), ili
 - plastičnom osnovom.

Po uglu gledanja displeji su: - uskougaoi
- širokougaoi.

Bistabilne ćelije imaju osobinu da zadrže optičko stanje posle isključenja napona pobuđivanja. One su idealne za konstrukciju pasivnih displeja, jer ne postavljaju ograničenje za multipleksiranje. Kako posle promene stanja ne moraju da se pobuđuju do nove promene stanja, one, idealno gledano, troše malu energiju. Sa tim ćelijama je moguće da se, primenom raznih tehnoloških rešenja, podražava gradacija sive boje, ali to zahteva ili komplikovanu konstrukciju piksela slike ili dinamički režim rada u vremenskom multipleksu. Intenzivan dinamički rad povećava, međutim, potrošnju displeja.

Postoje različite konstrukcije bistabilnih ćelija sa različitim tečno-kristalnim materijalima, vrlo različitim osobinama i različitim (potencijalnim) oblastima primene. Neke trajno zadržavaju stanje, a neke samo određeno vreme. Vodeći predstavnici bistabilnih ćelija su:

- Površinski-stabilisani feroelektrične ćelije (SSFLC) sa hiralnim smektičkim tečnim kristalima (SmC*),
- Bistabilne nematske ćelije,
- Ćelije sa holesteričkom teksturom (CT).

a) SSFLC ćelije su vrlo brze. One su najbrže ćelije sa tečnim kristalima, sa vremenima prebacivanja koja se 10-100 puta kraća od najbržih nematskih ćelija (STN, TN, IPS i VMD). Posle isključenja napona trajno zadržavaju optičko stanje. Ove ćelije su detaljnije obrađene u Poglavlju 5.

b) Bistabilne nematske ćelije sadrže nematski tečni kristal koji može da se samoorganizuje u dva stabilna stanja između dve površine ([45,64]). Ta dva stanja su optički različita: na primer, stabilno paralelno stanje i stabilno uvrnuto (twisted) stanje. Primenom dovoljno visokog impulsa napona na ćeliju tečni kristal se prebacuje iz jednog u drugo stanje. Posle ukidanja napona, on ostaje u tom stanju bez potrebe za spoljašnjom naponskom pobudom. Dva stanja se postižu na različite načine, primenom različitih graničnih uslova. Za razliku od TN ćelija gde jaki granični uslovi onemogućavaju molekule blizu sloja za orijentaciju da

reaguju na polje, kod bistabilnih nematiskih ćelija, granični uslovi su slabi i pri promeni pobudnog napona dolazi do “razbijanja” orijentacije.

c) Ćelije sa holesteričkom teksturom su naročito pogodne za izradu kolor displeja. Za prikaz slike u boji oni se prave sa tri ćelije integrisane jedna iznad druge. Svaka ćelija sadrži holesterički tečni kristal koji odbija samo deo spektra u određenoj boji: plava, zelena ili crvena, a ostali deo spektra propušta. Princip rada je zasnovan na Bragovoj refleksiji, koja je karakteristična za holesteričke tečne kristale. Ovi displeji omogućuju gradaciju sive boje, zadržavajući dugo vremena upisano stanje. Imaju odličnu reflektivnost, ali su spori. Sa sadašnjim razvojem tehnologije oni ne mogu da se koriste za pokretne slike, ali su odlični za prikaz statičke poruke. Ovaj tip displeja, sa prikazom procesa izrade i nekim eksperimentalnim rezultatima dat je detaljnije u Poglavlju 6.

Osim ovih tečno-kristalnih ćelija, postoje druge vrste displeja koji su skoro bistabilni, a koji nisu zasnovani na tečnim kristalima. Navedimo neke interesantne predstavnike koji u treći sa tečnim kristalima trenutno prednjace:

- Elektroforetički displeji,
- E-ink ćelije (sa kapsuliranim elektroforetičkim materijalom),
- Ćelije sa kapljicom ulja (electro-wetting efekat),
- Mikro-elektro-mehanički displeji (MEMS – “micro-electro-mechanical-systems”) i mikro-elektro-optičko-mehanički-sistemi (MEOMS – “micro-electro-optical-mechanical-systems”).

Ovi displeji zadržavaju informaciju neko vreme nakon upisa stanja, posle koga moraju da se osveže.

Vrlo mnogo komercijalnih uređaja je realizovano koristeći navedene tipove displeja bez tečnih kristala.

U nastavku ćemo kratko opisati još neke ćelije:

Dinamičko rasejanje na tečnim kristalima (DSM – “dynamic scattering mode”) je prvi elektro-optički efekat koji je iskorišćen za konstrukciju displeja sa tečnim kristalom. Efekat se sastoji u turbulentnom kretanju molekula tečnog kristala kada se na ćeliju dovede napon. Kada napon pređe neku kritičnu vrednost javlja se turbulentno kretanje, koje stimulišu dodate provodne primeše (jonski molekuli – soli ili neki drugi dopanti). Efekat prestaje posle izvesnog vremena, ali se javlja ako se primeni novi naponski impuls. Ako se na ćeliju dovede naizmeničan napon ili periodični impulsi efekat rasejanja je stalan. Usled haotičnog kretanja mezogena (nematski materijali) direktor je nasumice raspodeljen u prostoru i svetlost se rasejava, te ćelija postaje mlečno-bela. U uslovima bez napona ćelija je transparentna. Koriste se nematski materijali sa negativnom anizotropijom permitivnosti $\Delta\epsilon$. Molekuli se prvobitno orijentišu tako da pri primeni električnog polja teže da se zaokrenu za 90° , ali ih pri tome ometaju jonizovani molekuli koji teže da se kreću prema elektrodama. Ovi uslovi dovode do turbulencije. Prilikom rada kroz ćeliju teče struja reda $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$, dok je specifična otpornost tečno-kristalnog materijala sa primesama reda 10^8 - $10^{10}\Omega\text{cm}$. Sloj nematskog tečnog kristala u DSM ćeliji je relativno debeo (reda $20\mu\text{m}$). Efekat dinamičkog rasejanja je “spor”, u opsegu od nekoliko desetina do stotina ms. Ćelije sa dinamičkim rasejanjem su se koristile u prvim tečno-kristalnim displejima sa 7-segmentnim indikatorima (komercijalno, na primer u satovima i kalkulatorima – Sharp), ali su kasnije dosta istisnute sa TN i STN ćelijama. Pored sporosti ćelije, razlog za to je i potrošnja električne energije pri radu, kao i kratak radni vek. Prednost DSM ćelije je širok ugao gledanja. DSM ćelije mogu da rade u transparentnom i reflektivnom modu.

ECB (“electrically-controlled birefringence”) ćelije

ECB ćelije koriste efekat promene efektivnog indeksa prelamanja, koje vidi zrak svetlosti na putu kroz ćeliju. Proporcionalno električnom polju menja se orijentacija molekula i efektivni indeks prelamanja usled dvojnog prelamanja $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$. Posledica je promena talasne dužine svetlosti koja je propuštena kroz ćeliju. ECB ćelije mogu da se koriste kao reflektivne (sa jednim polarizatorom) i imaju odličnu reflektivnost u poređenju sa TN i STN ćelijama. ECB ćelije ne trebaju kolor filter i ne gube na njima intenzitet svetlosti. Nije moguće da se dobije gradacija intenziteta. Takođe, opseg boja koji je moguće postići sa ECB ćelijom je vrlo mali. Zato se one ne koriste za displeje sa punim opsegom boja, nego više za prikazivanje kolor simbola i natpisa, u reflektivnom režimu rada. Sa ECB ćelijama se, takođe, realizuju naponski kontrolisani promenljivi optički filtri. Materijali koji se koriste u ECB ćelijama treba da imaju velik $\Delta \epsilon$ i Δn . Interesantno je da je efekat dvojnog prelamanja, koji izaziva neželjene kolor efekte u STN ćeliji, upravo iskorišćen za rad ECB ćelije.

IPS (“in-plane switching”) ćelije

Kod TN i STN ćelija nematski mezogeni su u ravni panela displeja kada nema električnog polja i tada je ćelija obično svetla. Kada se primeni električno polje mezogeni se orijentišu normalno na ravan panela i ćelija je zatamnjena. Za normalan upadni zrak zatamnjenje je potpuno, jer on vidi samo redovan indeks prelamanja i ravan polarizacije nije zaokrenuta. Zraci sa strane, međutim, vide dvojno prelamanje i njihova ravan polarizacije je delimično rotirana. Tako oni prolaze u malom intenzitetu kroz analizator, dajući slabo zatamnjenje. Zato klasične TN i STN ćelije imaju slab kontrast sa strane, pa nisu pogodne za TV i kompjuterske displeje. IPS ćelija je jedna od novijih ćelija sa nematskim materijalima, koja pruža veći ugao gledanja. Kod IPS ćelije mezogeni ostaju uvek u ravni displeja pri promeni jačine električnog polja. Tako posmatrač vidi iz raznih uglova gledanja tečno-kristalni sloj sličnih optičkih svojstava, odnosno kontrast (svetlo/tamno) zavisi slabo od ugla gledanja.

Kod IPS ćelije primenjuje se električno polje u pravcu paralelnom sa graničnim površinama ćelije. Koriste se tipično nematici sa pozitivnom anizotropijom permitivnosti: $\Delta \epsilon > 0$. Pri primeni električnog polja mezogeni teže da se usmere u pravcu polja svojom osom najveće permitivnosti, pa se i orijentacija optičke ose menja. Pri svim poljima optička osa ostaje u ravni ćelije (paralelna graničnim površinama) – slika 4.7.

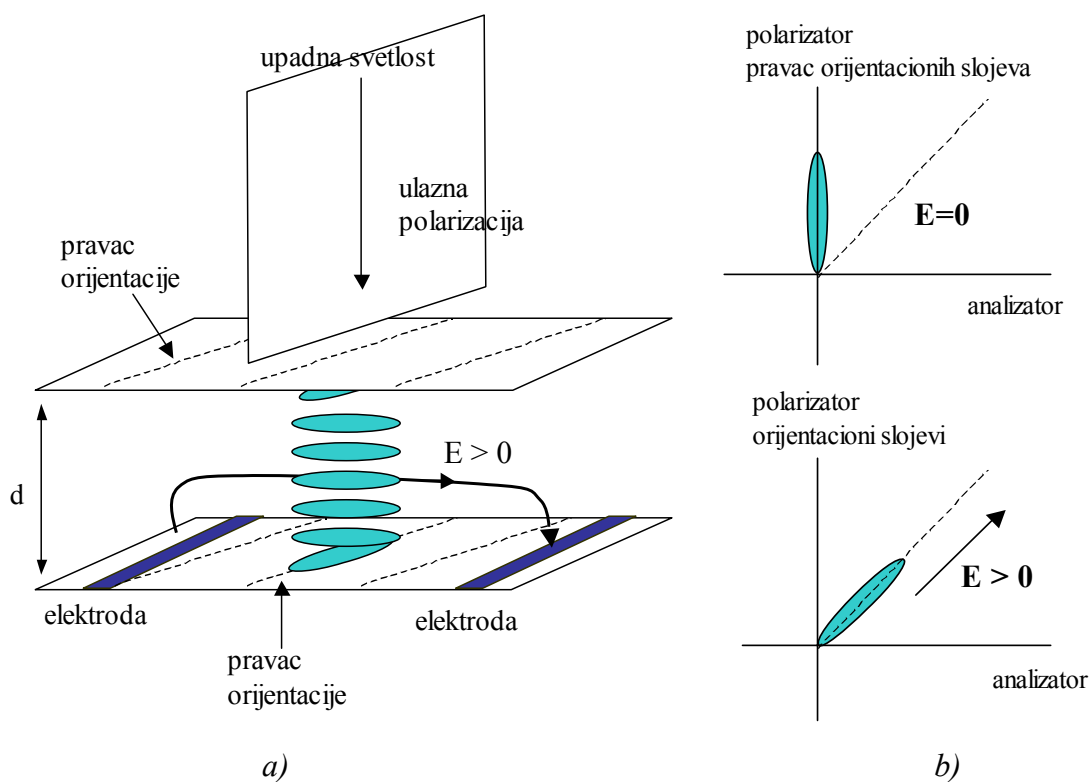
Električno polje u ravni ćelije se ostvaruje postavljanjem provodnih elektroda u obliku trake na jedan substrat displeja (gornju ili donju ploču; sl.4.7). Napon doveden na elektrode izaziva električno polje, koje je normalno na elektrode u neposrednoj njihovoj blizini. Između elektroda, električno polje je praktično paralelno ravni ćelije, jer je debljina ćelije mnogo manja od rastojanja između elektroda (prostor između elektroda definiše jedan subpiksel slike).

Ugao zaokreta mezogena zavisi od jačine električnog polja. Kod IPS ćelije nema uvrnuća nematskog sloja. Svi mezogeni imaju istu orijentaciju, koja se menja primenom elektrodnog polja (sem molekula uz gornju i donju graničnu površinu). Gornja i donja površina ćelije su paralelno orijentisane.

Ulazni polarizator se obično orijentiše paralelno pravcu orijentacije mezogena bez spoljašnjeg polja (pravac orijentacionih slojeva). Izlazni polarizator je ukršten pod 90° , pa je ćelija zatamnjena. U tom slučaju ulazni zrak je polarisan u ravni optičke ose, vidi indeks prelamanja za neredovan zrak, pa nema obrtanja ravni polarizacije.

Pod uticajem električnog polja mezogeni se zaokreću, a sa njima i optička osa. Ulazni zrak vidi dvojno prelamanje, te dolazi do zaokretanja ravni polarizacije. Maksimalan intenzitet

propuštene svetlosti nastaje pri zaokretu od 45° , ako su polarizator i analizator pod 90° . Zato se elektrode postavljaju tako da je stvoreno električno polje pod uglom od 45° u odnosu na položaj mezogena kada nema polja.



Slika 4.7: Princip rada IPS ćelije sa nematikom: a) pogled u ravni ćelije; b) Pogled u pravcu upada svetlosti.

Transmisija ćelije može da se opiše u idealizovanom slučaju sledećim modelom:

$$T = \sin^2(2\varphi) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d \cdot \Delta n}{2}\right),$$

gde je $\varphi(E)$ ugao otklona optičke ose usled dejstva električnog polja, a d – debljina ćelije.

IPS ćelija i nematski materijali za nju su od trenutka njenog pronalaska (Hitachi, 1996 god. [61]) do današnje masovne primene u TV ekranima prošli više stepenica usavršavanja u cilju:

- povećanja brzine rada do brzine neophodne za video signal u realnom vremenu,
- minimizacija nejednake transmisije različitih boja iz raznih uglova gledanja,
- povećanja kontrasta,
- smanjenje cene displeja.

Danas, IPS ćelija konkurentno nastupa na tržištu u odnosu na VA (“vertical alignment”) ćelije i plazma displeje.

5. Čelije sa feroelektričnim tečnim kristalima (SmC*)

U odnosu na smektičke faze sa nehiralnim molekulima, smektičke faze sa hiralnim molekulima imaju kvalitativno nove osobine. Tako SmA* poseduje optičku aktivnost, a nagnute faze (n.pr. SmC*) su polarne i u nekim slučajevima makroskopski feroelektrične ili antiferoelektrične.

Te osobine su iskorišćene za izradu raznih elektrooptičkih naparava:

- o brzih optičkih filtra,
- o modulatora (upravljača) pravca svetlosti,
- o ćelija displeja.

Slobodno razvijanje spirale u SmC* materijalu može da se omete :

- (a) primenom električnog polja (komponenta polja normalna na osu spirale ima uticaj), ili
- (b) nametanjem graničnih uslova (uticajem površinskih sila na materijal male dimenzije).

U oba slučaja se, usled makroskopskog nerotiranja vektora polarizacije smektičkih slojeva, javlja makroskopska polarizacija materijala $\mathbf{P}_s$. Oba efekta se koriste u konstrukciji elektrooptičkih ćelija sa SmC* i u nastavku će se izložiti detaljnije.

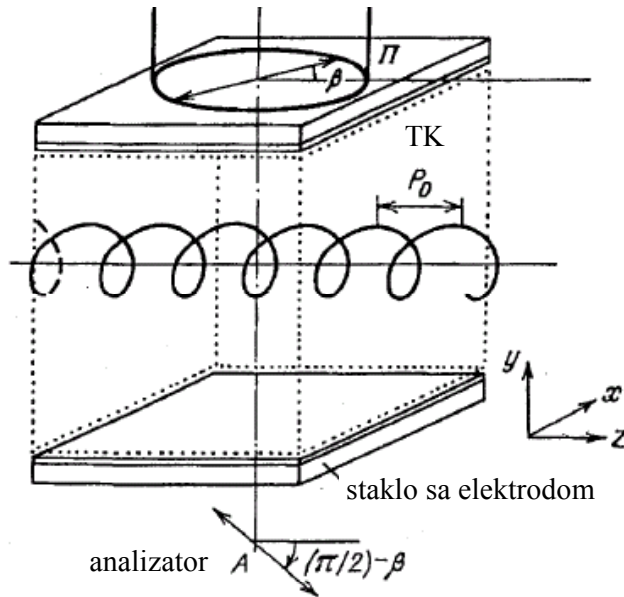
5.1. Deformisana spirala (DHF)

Primena električnog polja $\mathbf{E}$ normalno na osu spirale u SmC* fazi, stvara moment usled lokalne polarizacije $\mathbf{p}_m \times \mathbf{E}$ i deformiše spiralnu tako da $\mathbf{p}_m$ teži da bude u pravcu polja. Javlja se rezultatna polarizacija duž koraka spirale [28].

Smektički slojevi u ćeliji sa SmC* u režimu rada sa deformisanom spiralom su normalni na granične površine, koje deluju kao elektrode napona. Da bi se dobila čista spiralna struktura, efekat orijentacionih površina treba da je slab [26]. Debljina sloja mora da je mnogo veća od koraka spirale $d \gg p_0$. Osa spirale je paralelna sa graničnim površinama. Polarizovana svetlost upada normalno na graničnu površinu (sl.5.1).

Pri jakim poljima $E > E_c$ (E_c je kritično polje) spirala se razmota: u svim slojevima je $\mathbf{P}_s$ kolinearan sa smerom polja $\mathbf{E}$, direktori svih slojeva su isto orijentisani i ostvaren je maksimalan odklon efektivnog direktora jednak parametru materijala θ_0 . Ako je primenjeno slabo polje, spirala se deformiše, a posle ukidanja polja polarizacija nestaje i spirala se relaksira. Ako je primenjeno jako polje, tako da je spirala razmotana, posle ukidanja polja spirala se relaksira u debelom materijalu $d \gg p_0$, dok se u tankom materijalu $d \sim p_0$ javljaju histerezis i anomalni efekti [26].

Za slaba polja $\mathbf{E}$ reakcija na polje je brza i proporcionalna je polju. Efektivni direktor zaokreće se u pravcu polja, što omogućuje kontinualnu gradaciju dvojnog prelamanja (rotacije ravni polarizacije svetlosti kroz ćeliju). To je osnova rada ćelije displeja sa režimom rada u “**deformisanoj spirali**” (“**deformed helix mode**”).



Slika 5.1: Čelija sa SmC* u režimu rada sa deformisanom spiralom. Polarizator je pod uglom β u odnosu na osu spirale z, a analizator je ukršten sa polarizatorom pod 90° . Korak spirale je mali $p_0 \ll d$, gde je d debljina sloja. Otvor zraka svetlosti i talasna dužina su mnogo veći od koraka spirale. Primenjeno E polje je u pravcu koordinate y.

Kritično polje E_c pri kome dolazi do razmotavanja spirale dato je sa

$$E_c = \pi^4/4 \cdot K_{\parallel} / (P_s p_0^2)$$

gde je p_0 korak slobodne spirale (bez polja), $K_{\parallel} (=K_{22})$ koeficijent elastičnosti za deformaciju uvrćanjem, a P_s spontana polarizacija pri uglu materijala θ_0 :

$$P_s = \chi_{\perp} \mu_p \theta_0.$$

Kritičan napon iznosi $V_c = E_c \cdot d$, gde je d debljina sloja, $\chi_{\perp} = \epsilon_{\perp} - \epsilon_0$ je dielektrična susceptibilnost, a μ_p piezoelektrični moduo. Pri primeni polja manjeg od kritičnog $E < E_c$ spirala se deformiše: ugao θ menja se duž koraka spirale (bez polja θ je isti za svaki smektički sloj)

$$\theta(z) = \theta_0 \cdot (1 + k \cdot \alpha \cdot \cos(2\pi \cdot z/p_0)),$$

gde je k jedna konstanta materijala, a α perturbacija usled polja E . Usled primene polja E korak spirale se produžava ($p > p_0$), a rotacija direktora po azimutu φ dobija deformisan oblik

$$\varphi(z) = \frac{2\pi}{p_0} \cdot z + \alpha \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{p_0} z\right).$$

Perturbacija α dolazi kao posledica polja E :

$$\alpha = \pi^2/16 \cdot E/E_c$$

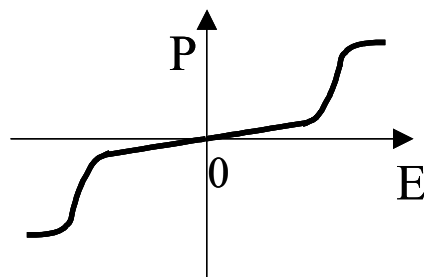
gde je E_c kritično polje. Perturbacija α je proporcionalna polju E . Za mala polja $E \ll E_c$, važi $\alpha \ll 1$. Ovi izrazi su izvedeni minimizacijom funkcionala slobodne energije sistema (SmC* spirala sa primenjenim poljem) [28].

Effektivna polarizacija usrednjena duž z ose (po jednom koraku spirale) postaje približno

$P = \alpha/2 \cdot (1-k^2 \cdot \beta) \cdot P_s$, sa $P_s = \chi_{\perp} \mu_p \theta_0$ odnosno: $P = \pi^2/16 \cdot (1-k^2 \cdot \beta)/2 \cdot P_s \cdot E/E_c$. Važi $P \sim E$.

Ovaj izraz važi za slaba polja $E \ll E_c$.

Pri jačim poljima $E \leq E_c$ izrazi postaju složeniji: P nelinearno raste sa E , a zatim saturira na P_s kada se spirala razveže, slika 5.2.



Slika 5.2: Šema P - E karakteristike SmC^* materijala u režimu deformisane spirale.

Za upadnu svetlost polarizovanu u ravni normalnoj na orijentacione površine, dvojno prelamanje materijala periodično se menja duž ose spirale, u saglasnosti sa periodičnom orijentacijom direktora. Ako je talasna dužina svetlosti λ i širina snopa mnogo veća od koraka spirale, ukupan efekat dobija se usrednjavanjem duž koraka spirale. Ako je λ slične dužine kao korak spirale, u transmitovanoj svetlosti uočava se trakasta struktura, koja je vrlo karakteristična za DHF [26].

U zavisnosti od ugla između ose spirale z i polarizatora, može se dobiti da je promena transmisije linearno srazmerna polju E ili srazmerna E^2 [28]. Ako je polarizator pod uglom β u odnosu na osu z , tada je za $E=0$ efektivni ugao optičke ose jednak β (srednja vrednost $\cos \varphi$ je 0). Pri $E > 0$ i $E < 0$ efektivni ugao optičke ose se smanjuje ili povećava (srednja vrednost $\cos(\varphi)$ je >0 ili <0), što moduliše transmisiju sloja. Usrednjavanjem po z može da se izvede promena transmisije $T = I/I_0$ (I_0 je upadni intenzitet) pri bipolarnoj pobudi sa $\pm E$ [28]

$$\Delta T = T(E) - T(-E) \approx 2 \theta_0 \alpha \sin(4\beta) \sin^2(\pi d \Delta n / \lambda) (2\theta_0^2 + k - 1).$$

I) Za $\beta = \pi/8$ (22.5°), sledi $\Delta T = 2 \theta_0 \alpha \sin^2(\pi d \Delta n / \lambda)$;

ΔT je proporcionalno polju E (linearan režim).

II) Za $\beta = 0$, upadna svetlost je u pravcu z ose. Može da se pokaže da je

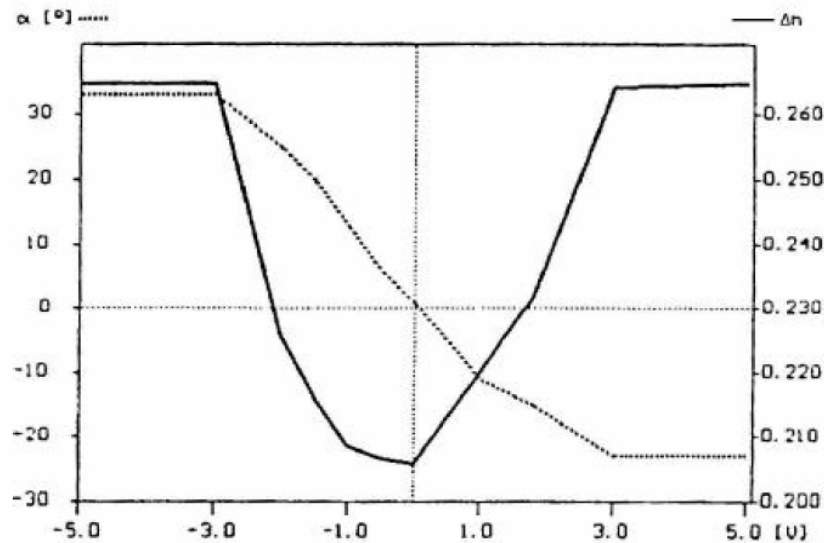
$\Delta T = T(E) - T(E=0) \sim \theta_0^2 \alpha^2$, odnosno ΔT je srazmerno E^2 .

Makroskopski može da se meri efektivni ugao zakretanja direktora DHF sloja ξ kao zaokret optičke ose. Za homogeni sloj debljine d sa Δn važi

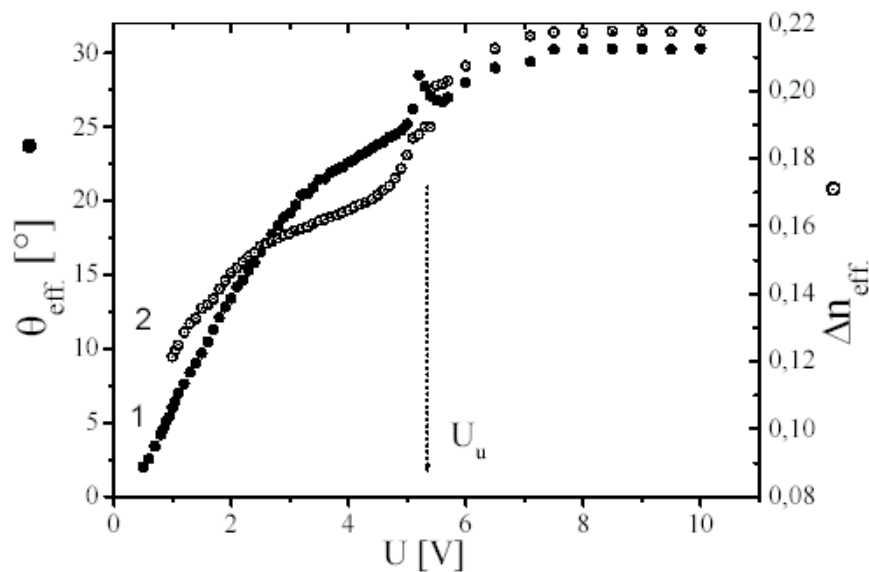
$$T = \sin^2(2(\beta + \xi)) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d \cdot \Delta n}{2}\right).$$

Analizator je normalan na polarizator, a ugao između ose z i polarizatora je β . Izvodi se veza $\xi = \theta_0/2 \cdot \alpha$, pri slabim poljima. Pri jakim poljima ta proporcionalnost prestaje da važi, a kada se spirala razveže, ξ je limitiran na θ_0 .

Slika 5.3 pokazuje jedno od prvih merenja makroskopskog ugla zakretanja ξ u [26], a slika 5.4 jedno novije merenje [29].



Slika 5.3: Zavisnost efektnog ugla zakretanja optičke ose ξ (označen α na slici) (...) i neto promene indeksa prelamanja (—) od napona (električnog polja) na DHF ćeliji [26]. Parametri: tečni kristal FLC 5679 (Hoffmann-LaRoche), $p_o = 0.35 \mu\text{m}$, $d = 6 \mu\text{m}$, 25°C (SmC^* faza).



Slika 5.4: Zavisnost efektnog ugla zakretanja optičke ose (kriva 1) i neto promene indeksa prelamanja (kriva 2) od napona na DHF ćeliji [29]. Parametri: tečni kristal u SmC^* fazi FLC-1TUD na 24°C (Tabela II), debljina ćelije $d = 6.8 \mu\text{m}$, izvor svetlost $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Brzina odziva DHF data je za slaba polja izrazom

$$\tau = \gamma_\varphi p_o^2 / (4\pi^2 K_{||}) .$$

Pri jačim poljima, blizu E_c , korak spirale p raste i deformacija spirale usled polja se usporava [28]. Samo razmotavanje spirale je vrlo spor efekat: u opsegu desetina-ms ili čak sekundnom-opsegu za polja E blizu E_c . Sporo razmotavanje spirale je potpuno suprotno brzom odzivu DHF pri slabim poljima, koje je u μ s-opsegu (redovno ispod 1ms) [26].

Za displeje u režimu DHF koriste se SmC* materijali sa vrlo malim korakom spirale (0.2-0.5 μ m); manjim od talasne dužine upotrebljene svetlosti (vidljivog spektra). Dobri materijali su sa velikim $\theta = 30-45^\circ$ i velikom spontanom polarizacijom $P_s = 1000 - 2000 \mu\text{C}/\text{m}^2$.

Debljina sloja SmC* materijala je mnogo veća od koraka spirale (suprotno SSFLC).

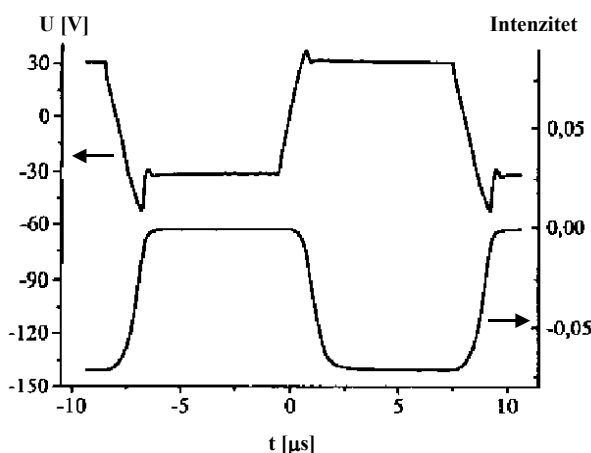
Prednosti displeja sa DHF: velika brzina, širok ugao gledanja.

Nedostaci: slab kontrast, zahteva aktivno adresiranje (skupa tehnologija tranzistora u tankom filmu – TFT), kontrola defekata, uniformnost na velikoj površini (prednost je što je film deblji nego kod SSFLC).

DHF tip displeja je još u eksperimentalnoj fazi, mada je kompanija Rolik (ROLIC Techn. GmbH, Švajcarska) pokušala da ga komercijalizuje.

Značajnija je primena režima rada deformisane spirale za aktivno upravljanje pravcem svetlosnog snopa i aktivne optičke filtre u komunikacionim linkovima sa optičkim vlaknom, kao i za modulaciju intenziteta svetlosti u optoelektronici uopšte ([31,39]). U toj oblasti komercijalni uređaji su demonstrirani i primenjeni. Interesanta je primena za holografiju u realnom vremenu [30].

Ako se primeni jako električno polje i visoka frekvencija ($E > 10\text{V}/\mu\text{m}$ i $f > 10\text{kHz}$), elektro-optički odziv DHF ćelije (sa materijalom malog koraka $p_0 \ll d$) postaje praktično nezavisan od temperature. Vrlo kratka vremena odziva ispod 1 μ s su pokazana [31], što daje mogućnost primene za brze prekidače svetlosti u optičkim linkovima.



Slika 5.5: Elektro-optički odziv DHF ćelije u VF režimu na trapezoidalnu naponsku pobudu [31].

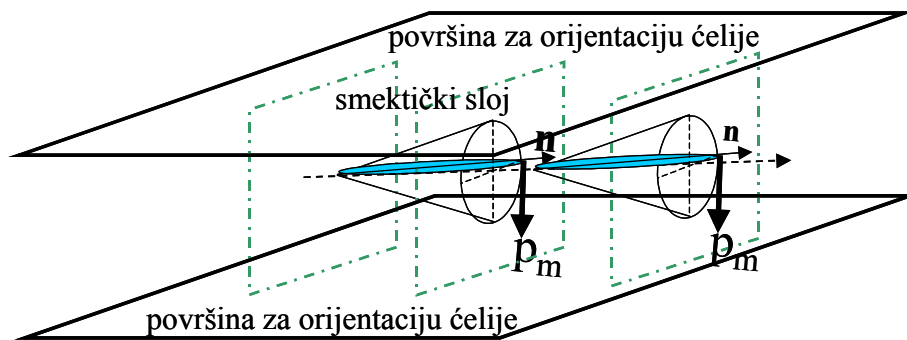
Za razliku od elektroklinskog efekta, ovaj visoko-frekventni (VF) režim rada DHF, daje punu modulaciju transmisije sa jednom ćelijom (za elektroklinski efekat koriste se dve ćelije jer je realan ugao otklona mali) u širokom temperaturnom opsegu. Na slici 5.5 dat je primer elektro-optičkog odziva DHF ćelije u VF režimu na trapezoidalnu naponsku pobudu iz rada [31].

Tečni kristal: FLC-451A (Lebedev Fizički Institut Moskva), debljina $1.8\mu\text{m}$, frekvencija 70kHz (period $14.3\mu\text{s}$), amplituda napona 30V , talasna dužina 630nm . Brzina odziva je: $t_{0.9}=0.86\mu\text{s}$ i približno je konstantna u opsegu $20\text{--}80^\circ\text{C}$.

5.2. Površinski-stabilisani SmC^* (SSFLC)

Ako se SmC^* materijal unese između dve uske površine, usled graničnih uslova, spirala se razmotava. Ako je debljina sloja porediva sa korakom spirale, pošto mezogeni interaguju sa površinama, doći će do stvaranja domenske strukture bez spirale, tkz. **“površinski stabilisanih feroelektričnih tečnih kristala” SSFLC (“surface stabilized ferroelectric liquid crystal”)**. Smektički slojevi su u idealnom slučaju organizovani u strukturu knjiga, “bookshelf”, normalno na paralelne granične površine (kao knjige koje stoje uspravno na polici biblioteke). Umesto spiralne prostorne rotacije direktora po smektičkih slojevima, SSFLC ima samo dva stabilna stanja direktora $\mathbf{n}$ i vektora polarizacije $\mathbf{P}_s$. Ta dva stanja su ista za sve smektičke slojeve jednog domena, slika 5.6. Dva stabilna stanja su simetrična u odnosu na normalu na smektičke slojeve (normala je paralelna površinama) i zaklapaju uglove $-\theta$ i θ prema normali. Direktori u dva stabilna stanja su paralelni površinama (azimutni ugao $\varphi = 0^\circ$ i 180°). Normala na smektičke slojeve je u pravcu orijentacije koju su diktirale površine: obe površine diktiraju istu orijentaciju (ili samo jedna diktira, a druga ne). U idealnom slučaju, oba stabilna stanja su energetske ekvivalentna.

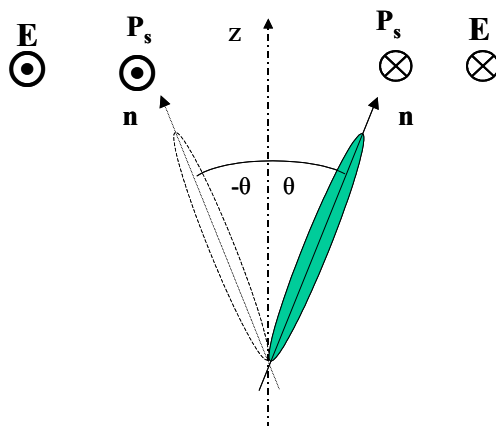
Vektor $\mathbf{P}_s$ je normalan na granične površine i ima isti smer za jedan domen, a smer mu se menja prelazeći iz jednog domena u drugi. Sistem se makroskopski ponaša kao feroelektrik.



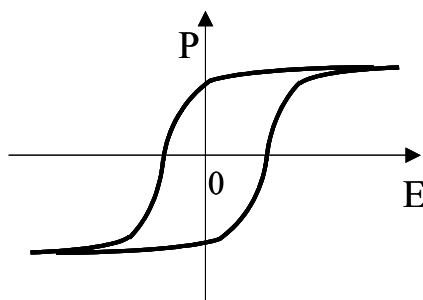
Slika 5.6: SSFLC ćelija sa SmC^* materijalom. U idealnom slučaju smektički slojevi su normalni na granične površine za orijentaciju. Svi mezogeni u svim smektičkim slojevima zauzimaju isti položaj; vektori $\mathbf{p}_m$ su kolinearni dajući jedinstveni $\mathbf{P}_s$ (na slici je $P_s < 0$).

Pri primeni spoljašnjeg električnog polja $\mathbf{E}$, svi mezogeni se usled polarnog momenta $\mathbf{M}_p$ jednoobrazno prebacuju u stanje (ili ostaju u stanju) koje daje $\mathbf{P}_s$ u pravcu $\mathbf{E}$. Posle ukidanja spoljašnjeg polja mezogeni ostaju u tom stanju, dajući makroskopsku polarizaciju ćelije. Prebacivanje u drugo stanje sa suprotnim vektorom polarizacije $\mathbf{P}_s$ se ostvaruje primenom spoljašnjeg električnog polja $\mathbf{E}$ suprotnog smera (sl.5.7). Posle ukidanja polja, domen trajno ostaje u novom stanju. To je karakteristično bistabilno ponašanje feroelektrika (sl.5.8).

Prebacivanje iz jednog u drugo stabilno stanje usled polarnog momenta M_p ponekad se zove Klark-Lagerval-ov (Clark-Lagerwall) efekat. On je analogon prelazu Frederiksa kod TN ćelije, koji se ostvaruje putem dielektričnog momenta M_d . Kako je M_p mnogo jači od M_d , efekat Klark-Lagervala je mnogo brži, dajući brzine prekidanja SSFLC u μs -opsegu, za razliku od TN i STN ćelija koje rade u opsegu ms. Do preorijentacije dolazi po celoj dubini sloja istovremeno, uključujući i mezogene uz same orijentacione površine. Zato granične sile koje nameću orijentacione površine u SSFLC treba da budu dovoljno jake da onemoguće stvaranje spirale i da orijentišu mezogene, a istovremeno dovoljno slabe da ne bi ometale preorijentaciju mezogena uz površinu.



Slika 5.7: Dva stabilna stanja mezogena u SSFLC ćeliji.

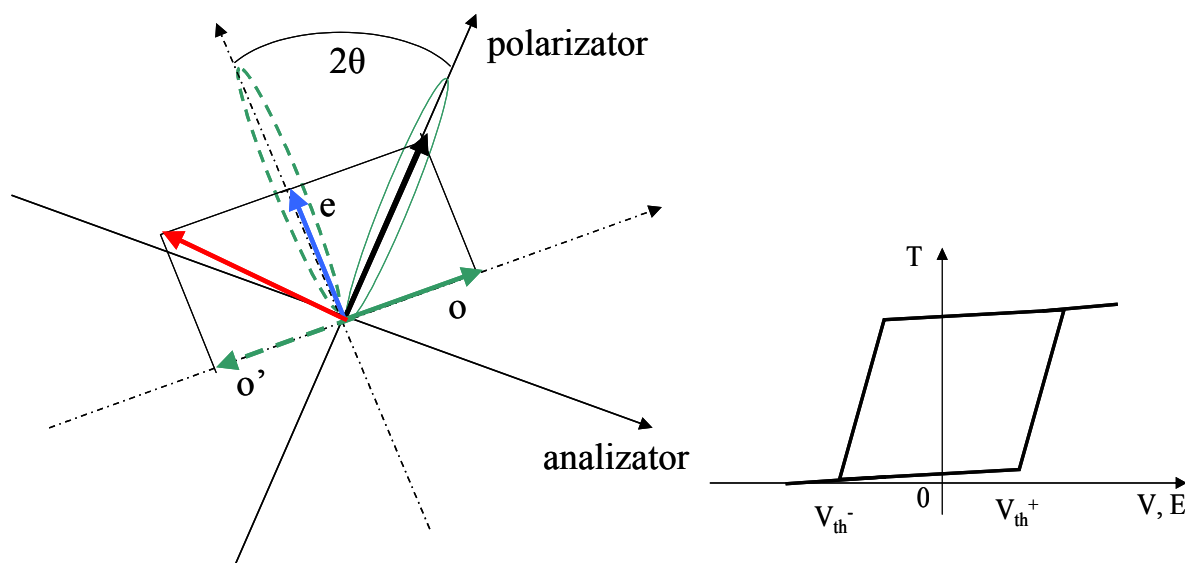


Slika 5.8: P - E karakteristika SSFLC ćelije pokazuje histerezis. Kao kod svakog feroelektričnog čvrstog materijala mogu da se definišu zaostala polarizacija $P(E=0)$ i koercitivno polje E_c koje daje $P(E_c)=0$.

Posmatrajući multidomensku strukturu SSFLC ćelije, primenom spoljašnjeg električnog polja E uočava se širenje i skupljanje domena, u zavisnosti da li je njihova P_s u smeru polja E ili u suprotnom. Blohovi (F.Bloch) zidovi sa antiparalelnom orijentacijom dipola u susednim molekulima, razdvajaju domene suprotne orijentacije. Blohovi zidovi putuju prema unutrašnjosti domena čiji je P_s suprotan smeru E . Pri dovoljno jakom polju, za dovoljno dugo vreme preorijentacije, svi domeni će se orijentisati u pravcu E . Ako je SSFLC ćelija adresirana fiksnim spoljašnjim tovarom, domeni će se orijentisati do te mere da P_s depolarizuje tovar stavljen na ćeliju. Tako će na jednoj multidomenskoj površini veći deo površine biti orijentisan u stimulisanoj smeru, a manji ostati u suprotnom. Odnos površina zavisi od primenjenog napona (i predistorije). To daje jednu mogućnost za makroskopsku gradaciju transmisije u, inače, po prirodi bistabilnoj SSFLC ćeliji [32].

$$T = \sin^2(2 \cdot 2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{d \cdot \Delta n}{2}\right),$$

gde je ugao između optičke ose i ulaznog polarizatora jednak uglu odklona 2θ , a d debljina sloja. Primenjuje se električno polje u pravcu polarizovane svetlosti. Izlazna svetlost iz tečno-kristalnog sloja menja fazu i ravan polarizacije. Analizator selektuje linearno polarizovanu projekciju. Na slici 5.10 opisan je elektro-optički efekat SSFLC ćelije. Maksimalna transmisija je za $d \cdot \Delta n = \lambda/2$ i $\theta = \pi/8$. To je uslov za debljinu ćelije i izbor materijala.



Slika 5.10: Optička aktivnost SSFLC ćelije

Objašnjenje optičke aktivnosti SSFLC ćelije (sl. 5.10): Neka je ulazna svetlost polarizovana u ravni jednog stabilnog stanja (crni vektor $\mathbf{n}$ na sl.5.10). Svetlost vidi samo indeks prelamanja za neredovan zrak (n_e) i izlazi iz ćelije u istoj ravni polarizacije. Kako je analizator pod uglom 90° , transmisija ćelije je 0. Ako je direktor $\mathbf{n}$ prebačen u suprotno stabilno stanje (pod uglom 2θ) ulazni zrak vidi medium sa dvojnog prelamanjem: komponenta zraka u pravcu direktora se prostire kao neredovan zrak kroz indeks prelamanja n_e (plava projekcija e), a komponenta normalna na direktor se prostire kao redovan zrak koji vidi redovan indeks prelamanja n_o (zelena projekcija o). Za pozitivan koeficijent dvojnog prelamanja važi $\Delta n > 0$, odnosno $n_e > n_o$, pa je prostiranje normalne komponente brže od paralelne. Na izlazu iz tečno-kristalnog sloja, nastaje fazna razlika između dve komponente (zelene i plave): $2\pi \cdot d \Delta n / \lambda$. Rezultujući zrak je suma te dve komponente i u opštem slučaju je eliptično polarizovan. Ako je optička debljina sloja $d \Delta n$ jednaka $\lambda/2$, izlazni redovan zrak (o') je tačno u kontrafazi prema ulaznom (o), a rezultujući zrak je linearno polarizovan (crveni vektor). Njegova projekcija na analizator biće propuštena kroz ćeliju. Transmisija je potpuna ako je $2 \cdot 2\theta = \pi/2$, $\theta = 22.5^\circ$.

Na slici 5.10 je takođe prikazana optička transmisija u funkciji primenjenog napona (E polja). Označeni su pragovi za preorijentaciju pri pozitivnom i negativnom naponu, V_{th}^+ i V_{th}^- .

Za viskozni momenat koji je dominantan u odnosu na elastični momenat, brzina prebacivanja je određena vremenskom konstantom⁵:

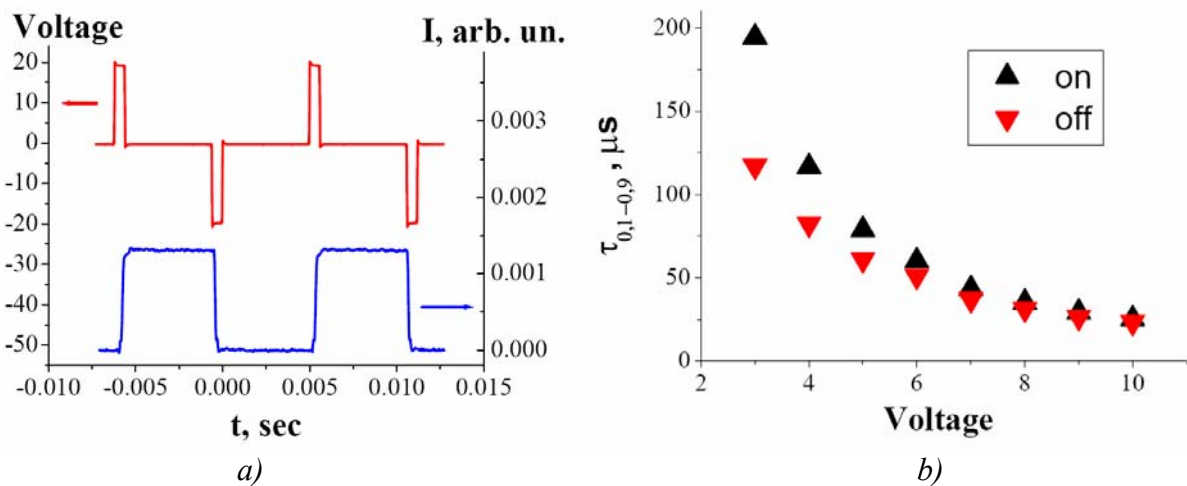
$$\tau = \gamma_{\varphi} / (P_s E) .$$

Tako je vreme preorijentacije proporcionalno $1/E$ u oblasti umerenih polja, kako za uključenje, tako i za isključenje ćelije. U oblasti jakih polja dielektrični momenat postaje značajan usled E^2 . U početku rotacije dielektrični momenat se opire dipolnom momentu, što uzrokuje vreme kašnjenja kod SSFLC. Kasnije, dielektrični momenat potpomaže rotaciju.

Rad ćelije je suštinski bistabilan. Nisu moguća stabilna međustanja između dva krajnja položaja direktora. To daje prednosti za pasivno adresiranje displeja:

- o postoji prag za prekidanje,
- o nije potreban napon za održavanje stanja.

Bistabilna prekidačka karakteristika demonstrirana je na slici 5.11.



Slika 5.11: a) Bistabilna modulacija intenziteta svetlosti sa SSFLC ćelijom sa SmC* materijalom FLC-455 ($P_s=2100\mu\text{C}/\text{m}^2$ na 23°C , faze Cr 6°C SmC* 78°C SmA* 90°C I) (Lebedev Institut za Fiziku, Moskva) [33]. Debljina sloja $1.5\mu\text{m}$. Primenjena je foto-orijentacija tečnog kristala u ćeliji. Ostvaren je contrast od 1500:1. b) Promena brzine uključenja i isključenja ćelije sa primenjenim naponom rada.

⁵ Brzina elektro-optičke modulacije SSFLC ćelije je određena brzinom preorijentacije molekula iz jednog u drugo stabilno stanje, koja je opisana jednačinom:

$$\gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + K_{\perp} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = E \cdot P_s \sin \varphi + \Delta \epsilon_{\text{eff}} \cdot \epsilon_o \cdot E^2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

Koordinata y je normala na orijentacione površine. Član $E \cdot P_s \sin(\varphi) = E \cdot P_s \cdot \cos(90^\circ - \varphi)$ je momenat usled stalnog dipola M_p , (u stabilnim stanjima $\varphi=0$ ili 180°). Momenat indukovano dipola usled dielektrične anizotropije je dat članom $\Delta \epsilon_{\text{eff}} \epsilon_o \cdot E^2 \sin(\varphi) \cos(\varphi)$, sa efektivnom dielektričnom anizotropijom $\Delta \epsilon_{\text{eff}} = \Delta \epsilon \cdot \epsilon_o \cdot \sin^2 \theta - \delta \epsilon$. Veličina $\delta \epsilon$ je dielektrična biaksijalnost, a $\Delta \epsilon$ dielektrična anizotropija. $\delta \epsilon$ je važna za SmC* materijale. Rotacija je u polukrug po smektičkoj kupi, a momenat viskoznosti je dat sa $\gamma_{\varphi} \cdot \partial \varphi / \partial t$, pri ekvivalentnoj kružnoj viskoznosti za azimut φ : $\gamma_{\varphi} = \gamma_{\varphi}^{\text{max}} \cdot \sin^2 \theta$ ($\gamma_{\varphi}^{\text{max}}$ je kada molekul rotira oko kraće ose). $K_{\perp}$ je koeficijent elastičnosti. Za SmC* je tipično: $\Delta \epsilon \cdot \epsilon_o \cdot \sin^2 \theta \cdot E \ll P_s$. Primer: $\Delta \epsilon=4$, $\theta=22.5^\circ$, $P_s=200\mu\text{C}/\text{m}^2$, pri jakom polju $E=10\text{V}/\mu\text{m}$ ($100\text{kV}/\text{cm}$), sledi $39 \times \Delta \epsilon \epsilon_o \sin^2 \theta E^2 = E \cdot P_s$.

U početku rotacije dielektrični momenat se opire dipolnom momentu usled $\delta \epsilon > 0$ (kada je ϵ u pravcu C_2 dominantna), što uzrokuje vreme kašnjenja kod SSFLC. Kasnije, dielektrični momenat potpomaže rotaciju.

Postoji minimalno vreme za preorijentaciju: $\tau_{\text{min}} = \gamma_{\varphi} \cdot \Delta \epsilon_{\text{eff}} \sin^2 \theta / P_s^2$.

Usled bistabilne prirode rada javljaju se određene mane:

- o nije moguća gradacija transmisije jednog domena – ćelije (skale sivog).
- o ćelija ne može da se upotrebi za analognu modulaciju svetlosnog snopa.

Tipični tečni kristal za SSFLC ćeliju ima dugačak korak spirale p_0 . Ćelija je tanka – obično oko 1-2 μm .

Različiti displeji na osnovu SSFLC su intenzivno razvijani u poslednje dve decenije, ali osim manjih primera nisu našli masovnu komercijalnu primenu do sada.

U idealnom slučaju SSFLC je vrlo pogodna za konstrukciju displeja.

Prednosti SSFLC displeja su:

- velika brzina,
- vrlo dobar kontrast,
- širok ugao gledanja,
- pasivno adresiranje,
- velik procenat iskoristljivosti ćelije (optički-aktivan deo zauzima velik deo površine ćelije; nema MOSFETa i kapaciteta koji su zamračeni u aktivno-adresiranim ćelijama),
- minimalna optička interakcija između susednih ćelija,
- minimalna električna interakcija sa ostalim ćelijama u matrici,
- relativno mali radni napon (tipično oko 5V/ μm).

Ćelije SSFLC displeja mogu da se naprave vrlo male površine, tako da je rezolucija vrlo visoka. Ćelije od 5 x 5 μm^2 su lako ostvarljive. Displeji mogu da budu vrlo malih dimenzija, što se koristi za projekcione sisteme, displeje u okularima kamera i displeje u naočarima (za virtuelnu realnost, vojne primene i sl.). Takvi uređaji su komercijalizovani.

Kao primer navodimo mali displej jedne od trenutno vodećih firmi za feroelektrične-tečno-kristalne naprave: “LightView 311k Digital Display Module” od Displaytech-a [34]. Displej tipa LDM-0311-D1 ima rezoluciju 432 x 240 (vertikalno x horizontalno), 5.2 x 3.9mm² površinu, kolor-sekvencijalni režim, rezoluciju boje 24-bit (16.7 miliona boja), kontrast 100:1, radnu snagu samo 0.175W, radnu temperaturu od -10 do 70°C, frekvenciju slika 100Hz, težinu celog modula 2.2g, max belu osvetljenost 350cd/m², veličinu ćelije 12 x 16.2 μm^2 (uključujući 0.5 μm razmak između ćelija – piksela).

Brzo puštanje ili zamračivanje svetlosti je idealna osobina SSFLC za realizaciju modernih kolor sekvencijalnih displeja. Za te displeje vreme uključenja i isključenja ćelije treba u zbiru da bude najviše nekoliko ms (max oko 16/3 $\approx$ 5ms).

Zbog velike brzine rada i male površine SSFLC moguće je stvoriti utisak sive gradacije putem tehnika vremenskog ili površinskog multipleksa. Tako mogu da se prevaziđu ograničenja usled bistabilnosti u analognim primenama. SSFLC displeji sa oba sistema su demonstrirani.

Nažalost, više efekata postavljaju ozbiljne probleme u realizaciji SSFLC displeja:

1. chevron strukture, cik-cak defekti, pouzdana orijentacija na velikoj površini,
2. ostali defekti, na velikoj površini,
3. tolerancija debljine SSFLC u masovnoj proizvodnji.
4. osetljivost na mehanički udar i temperaturni šok: dezorijentacija, stvaraju se defekti.
5. povećanje viskoznosti γ_ϕ na niskoj temperaturi; značajno smanjenje brzine rada.
6. akumulacija pokretnih jona (nečistoća) na površinama ćelije koja je pod naponom duže vremena i pojava zamrzavanja slike (pojava obrisu prethodne statičke slike).

Usled 1, 2 i 3 prinos u proizvodnji je mali, a proizvodnja je manufakturna. Uprkos teškoćama firma Canon je komercijalizovala prvi displej na bazi SSFLC 1995 god, slika 5.12 (na žalost, proizvodnja je obustavljena 1999 god.).



Slika 5.12: Kolor SSFLC displej firme Kenon (Canon) FLCD 15C01 (1995 god.). Karakteristike: rezolucija 1280x1024 (SXGA). Dijagonala 14.8" (38cm), kontrast 40:1, osvetljenost 80cd/m², 4 sub-piksela (crvena, zelena, plava, bela), brzina odziva po liniji 80μs (na sobnoj temperaturi), ćelija 1.1μm.

Slično SmA* materijalima, SmC* materijali u SSFLC konfiguraciji su naročito atraktivni za primenu u profesionalnim komunikacionim sistemima, kao brzi prekidači svetlosti između talasovoda. Tu visoki zahtevi u proizvodnji i krajnja cena nisu veoma bitni u poređenju sa performansama sistema. SSFLC omogućavaju konstrukciju malih prekidačkih optoelektronskih matrica koje su: male potrošnje, brzine prekidanja reda μs i pogodne za tkz. integrisane optičke sisteme [35,36].

Metode upravljanja displejom sa SSFLC matricom

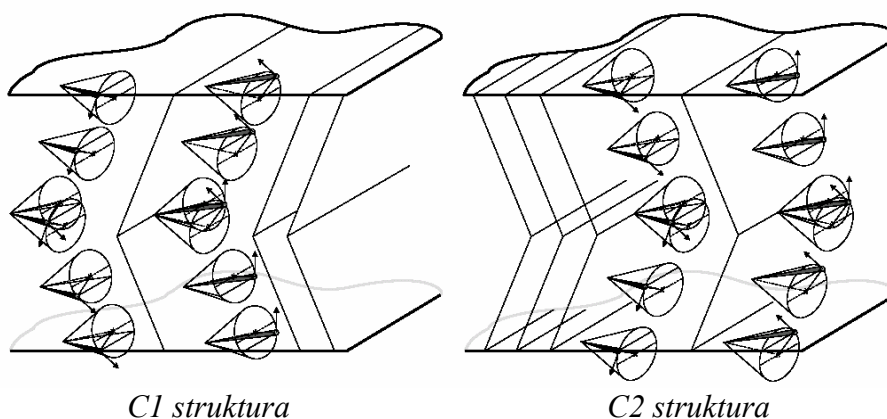
Iako se, na prvi pogled, usled postojanja praga i jednostavnog bistabilnog rada, upravljanje SSFLC ćelijom čini jednostavno, realna naponska pobuda SSFLC ćelije u pasivnom matričnom displeju je dosta složena. Razne metode impulsnog upravljanja su razvijene i patentirane. Naponske šeme upravljanja iskorišćavaju specifičnosti relativno komplikovanog procesa prekidanja (preorijentacije) mezogena u SSFLC. Na primer: ćelija se pobudi samo kratko, a preorijentiše se spontano dok se druge ćelije adresiraju; ili, parazitni impulsi preslušavanja ("cross-talk") ne smatraju se problemom, nego se upotrebljavaju za

predpobuđivanje direktora usled dielektričnog momenta M_d (pri $\delta\epsilon > 0$) u cilju poboljšanja kontrasta i slično. Jednosmerna (DC) komponenta pobude treba da je uvek 0V za svaku ćeliju (usled degradacije). Naročito je izazovno da se postigne što brže vreme adresiranja, uz dobar kontrast, da bi se moglo u toku jedne slike video signala da adresira što više linija (veća rezolucija). Adresiranje treba da omogući pouzdan rad u širokom temperaturnom opsegu rada displeja (varijacije parametara materijala), za dopuštene tehnološke varijacije parametara displeja.

5.2.2. Realan SSFLC

Umesto stvaranja idealne strukture knjiga (“bookshelf”), gde su smektičke ravni normalne na gornju i donju orijentacionu površinu, SSFLC ima tendenciju organizacije u strukturu prelomljenih pruga (“chevron”⁶), gde smektički slojevi zaklapaju ugao (manji od 90°) sa gornjom i donjom orijentacionom površinom (sl.5.13). Čak i da nije stvorena struktura pruga, smektički slojevi u strukturi knjiga redovno zaklapaju neki ugao različit od pravog ugla sa orijentacionim površinama. To znači da osa na slojeve i stabilna stanja nisu paralelni sa orijentacionim površinama, niti da vektor $\mathbf{E}$ deluje strogo u pravcu $\mathbf{p}_m$, odnosno $\mathbf{P}_s$. Prugasta struktura je posledica smanjenja debljine sloja usled nagiba molekula pri hlađenju iz SmA u SmC* fazu, kao i lokalne varijacije debljine sloja (ćelije). Kod strukture pruga smektički sloj je podeljen po dubini ćelije na dva podsloja sa različitom orijentacijom smektičke normale (ose). Ose nisu paralelne sa graničnim površinama, ni međusobno. U okviru smektičkih podslojeva, molekuli se jednobrazno nalaze u jednom od dva stabilna stanja na odgovarajućim smektičkim kupama, pod karakterističnim uglom θ u odnosu na svoju osu. Podslojevi su u opštem slučaju različitih debljina, zaklapaju neki ugao δ , a odeljeni su tkz. granicom strukture pruga. Ugao strukture pruga (“chevron angle”) nije mali; tipična vrednost je oko 10° .

Tehnološki je teško kontrolisati stabilnost i reproduktabilnost strukture pruga i njenog ugla. Na naglim prelazima materijala iz C_1 u C_2 tip strukture pruga uočavaju se karakteristični cik-cak defekti i svetlosni defekti u crnom polju.



Slika 5.13: Struktura pruga (“chevron”) u SSFLC. Razlikujemo dve konfiguracije: C_1 sa $\delta > 0^\circ$ i C_2 sa $\delta < 0^\circ$.

⁶ “Chevron” je oznaka » čina na uniformama.

Pri primeni električnog polja (polje je normalno na orijentacione površine) mezogeni se kao i kod strukture knjiga preklapaju između dva stabilna stanja. Efektivni ugao preklapanja optičke ose je, međutim, manji od 2θ (2θ je kod strukture knjiga). Kako svetlost pada normalno na granične površine, efektivna rotacija optičke ose postaje zavisna od ugla strukture pruga, δ . Taj ugao zavisi od lokalne debljine ćelije, uniformnosti materijala i orijentacije. Posledica je tehnološka nejednakost transmisije po površini, odnosno neravnomerna bela boja i defekti u crnom polju. Tipična proizvodna tolerancija debljine SSFLC ćelije je: $1.50\mu\text{m} \pm 50\text{nm}$. Praktičan pristup dobijanju stabilnog SSFLC sa strukturom pruga je primena orijentacionih površina koje nameću značajan nagibni ugao prema površini (ugao između mezogena i orijentacione površine po vertikali).

Postoji razlika u smeru rotacije molekula po smektičkoj kupi iz jednog u drugo stabilno stanje pri prebacivanju: rotacije su u suprotnom smeru za dva podsloja strukture pruga. Za svaki podsloj rotacija ide po energetski lakšem i kraćem putu. Na granici strukture pruga, tendencije rotacije su suprotne, što zahteva dodatnu energiju i povećava prag za prekidanje. Kao posledica strukture pruga histerezis P-E karakteristike se povećava. Napomenimo da se izrazi za M_p i M_d dosta usložnjavaju za strukturu pruga sa orijentacionim uglom nagiba u odnosu na jednostavan SSFLC sa strukturom knjiga.

5.3. Uvrnuti smektički režim (TSM) i kontinualna rotacija direktora (CDR)

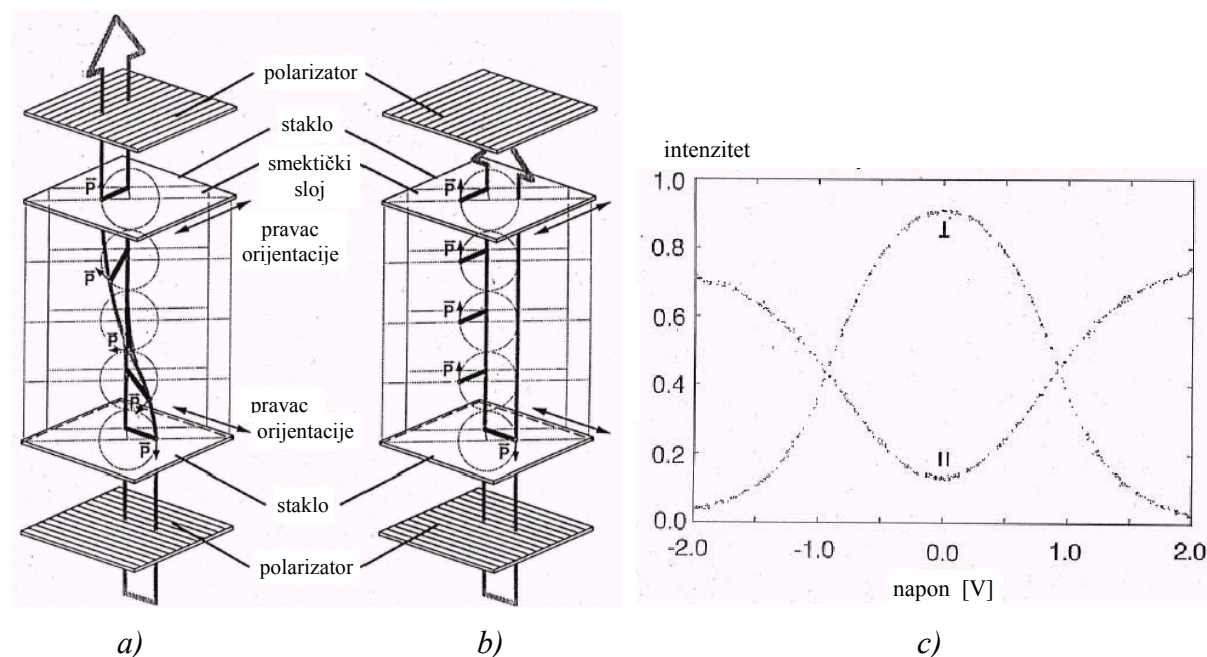
Novi koncept ćelije displeja, gde je spirala razmotana usled efekta površina, je takozvani **“uvrnuti smektički” režim rada (twisted smectic - TSM)**. Za razliku od SSFLC, on omogućava kontinualnu gradaciju koeficijenta transmisije ćelije i zato je interesantan za displeje. Smektički slojevi su takođe organizovani u strukturu knjiga; normalni su na granične površine ćelije (u idealnom slučaju). Usled jakog uticaja gornje i donje površine, koje nameću orijentaciju bliskih – graničnih – molekula u istom smeru za svaki smektički sloj, *nema spirale u pravcu normale na smektičke slojeve*. Orijetacije gornje i donje površine su napravljene pod uglom 2θ . Direktor rotira oko smektičke kupe idući od gornje ka donjoj površini, opisujući ugao 2θ i azimutni ugao od 180° .

Primenom električnog polja E normalno na granične površine stimuliše se više leva ili desna orijentacija direktora, što zavisi od smera polja. Kada nema polja, srednja orijentacija direktora je 0. Kada se primeni spoljašnje polje E srednja orijentacija direktora se menja od 0 do θ za jedan smer polja, a od 0 do $-\theta$ za drugi smer. Vektor lokalne polarizacije $\mathbf{p}_m$ menja smer za 180° idući od jedne ka drugoj površini (sl.5.14).

Pri jakim poljima su svi direktori (za sve slojeve i po dubini svakog sloja) u krajnjem položaju $-\theta$ ili θ (osim za molekule uz samu suprotnu orijentacionu površinu). Kada se jako polje ukine direktori se relaksiraju prema ravnotežnom stanju na početku.

Kada linearno-polarizovana svetlost prođe kroz TSM ćeliju bez napona, ona rotira ravan polarizacije u smeru uvrnuća ćelije. U TSM ćeliji je polarizator postavljen u pravcu orijentacije ulazne površine (na primer $-\theta$), odnosno pod uglom θ u odnosu na efektivnu optičku osu sloja (0), kada nema polja. Pri izlasku iz sloja svetlost je linearno polarizovana pod uglom $+\theta$ i prolazi kroz analizator: transmisija je maksimalna pri $E=0$. Za analizator

normalno postavljen prema polarizatoru (90°), optimalan SmC* materijal je onaj sa uglom od $\theta=45^\circ$.



Slika 5.14: Princip rada TSM ćelije [40]: a) U odsustvu spoljašnjeg polja, posmatrajući po dubini sloja, direktor rotira po smektičkoj kupi između dva krajnja stanja koja su nametnuta orijentacionim površinama. b) Pri primeni električnog polja E normalno na ćeliju, direktori se kontinualno zaokreću prema krajnjem stanju čiji P_s je u pravcu polja E . c) Karakteristike TSM ćelije sa materijalom Chisso 2004, $\theta=46^\circ$.

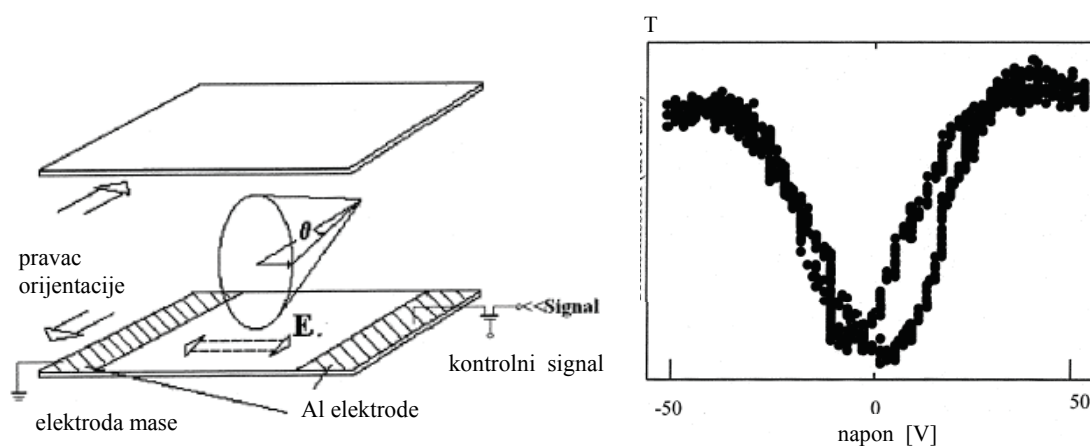
Kada se primeni jako E polje, direktori se orijentišu u jedno od krajnjih stanja i ulazna svetlost ne vidi dvojno prelamanje mediuma (vidi n_e ili n_o), te ravan polarizacije nije rotirana. Svetlost ne prolazi kroz analizator. Pri srednjim jačinama polja, zakret efektivne optičke ose u pravcu $-\theta$ ili θ (zavisno od smera E), dovodi do kontinualne modulacije transmisije, za pozitivne i negativne E . Primer transmisije u funkciji primenjenog napona je dat na slici 5.14.

Napomenimo da kod TSM ćelije uvrnuće direktora nastaje unutar smektičkog sloja, po dubini ćelije i da svi smektički slojevi slede isto uvrnuće. To uvrnuće nije deo spirale smektičkog SmC* materijala. Tako je TSM ćelija sličnija TN ćeliji sa uvrnutim nematikom, nego SmC* ćeliji u režimu deformisane spirale (DHF).

CDR (“continuous director rotation” – kontinualan zaokret direktora) je još jedan koncept ćelije displeja koji omogućava kontinualnu gradaciju transmisije [43]. Spirala je i u ovom slučaju razmotana nametanjem površinskih graničnih uslova. Jaki granični uslovi iste orijentacije su primenjeni na donju i gornju površinu. Primenom konstantnog električnog polja materijal se tokom hlađenja u SmC* fazu forsirano orijentiše samo u jedno od dva stabilna stanja na smektičkoj kupi (dva stanja koja postoje kod SSFLC) – u ono stanje koje forsiraju orijentacione površine [38]. Pri radu ćelije, primenom suprotnog električnog polja, molekuli rotiraju po smektičkoj kupi za ugao proporcionalan polju. Posle ukidanja spoljašnjeg polja direktori se vraćaju u prvobitno stanje (koje je jedino stabilno) dejstvom elastičnih sila usled graničnih uslova. Maksimalna rotacija direktora u ravni graničnih površina je 2θ , a po azimutu ϕ do 180° . Električno polje je normalno na granične površine.

Ako je polarizator u ravni stabilnog stanja, a analizator pod uglom 90° , dobija se asimetrična karakteristika transmisije u funkciji napona. Za smer polja koji rotira molekule, transmisija se povećava od 0 (neke male vrednosti u praksi) do maksimalne (kada je dostignuto suprotno stanje 2θ). Za polje suprotnog smera direktori ostaju u stabilnom stanju i transmisija je 0. Režim rada je analogan i zahteva aktivno adresiranje. Postoji mali naponski prag za transmisioni deo karakteristike. Radni naponi ćelije su mali. Koriste se materijali koji pri hlađenju iz N prelaze direktno u SmC* fazu, uz izostanak SmA* faze. Kod tih materijala ugao θ je relativno velik, što daje velik opseg modulacije intenziteta. P_s je mali, što omogućava kontrolu sa relativno malim naponom na elektrodama.

Sličan koncept ćelije sa rotacijom direktora po smektičkoj kupi i E poljem koje je paralelno sa graničnim površinama (STE, "slit type electrode") je dat u radu [23]. Smektički slojevi su takođe uređeni u strukturu knjiga. Ćelija se ne ponaša bistabilno, poput SSFLC, nego daje kontinualnu gradaciju transmisije.



Slika 5.15: Princip rada STE ćelije i izmerene karakteristike: transmisija u funkciji napona, za material Chisso CS-1011 (Tabela II) [23]. Rastojanje između elektroda $30\mu\text{m}$, debljina ćelije $2.0\mu\text{m}$. Izmeren je kontrast 35:1.

6. Višeslojni holesterički displeji u boji

Holesterički reflektivni displeji su displeji novijeg tipa, koji koriste efekat Bragove refleksije na holesteričkim tečnim kristalima. Displeji rade u reflektivnom režimu rada, pokazujući jednu od najboljih reflektivnosti od svih, do sada, poznatih tipova displeja. Za razliku od konvencionalnih displeja sa TN i STN ćelijama, holesterički reflektivni displeji su odlično vidljivi na jakom dnevnom svetlu. Druga njihova posebna osobina je zadržavanje slike posle isljučenja napona. Tako su oni idealni za prikazivanje statičke slike u mobilnim sistemima: GPS uređaji, elektronske karte, programirajući natpisi.

Holesterički displeji mogu da se naprave kao monohromatski ili u koloru. Sa holesteričkom reflektujućom ćelijom moguće je dobiti gradaciju intenziteta boje (“gradaciju sivog”), tako da se u kolor displejima ostvaruje relativno bogat spektar boja.

Ovo poglavlje **opisuje praktičan rad na realizaciji jednog kolor reflektivnog holesteričkog displeja** sa matricom piskela u pasivnom režimu rada.

Opisan je opšti tehnološki postupak realizacije displeja, sa naglaskom na proces litografije provodne matrice ITO elektroda u uslovima čiste sobe (“clean room”). Date su neke optičke karakteristike napravljenih displeja.

Displej je realizovan u okviru staža kandidata u grupi za tečne kristale i displeje ASULAB instituta (Swatch Research Labs – Marin/Neuchatel, Switzerland).

Prvo poglavlje ove glave diskutuje problem reflektivnosti kod klasičnih tečno-kristalnih ćelija, a naročito problem reflektivnosti kod kolor displeja.

U drugom poglavlju izložen je teoretski princip rada višeslojnog holesteričkog displeja u boji i njegove opšte karakteristike.

Praktičan deo na izradi displeja i neke karakteristike date su u poglavlju 6.3.

6.1. Opšti problem reflektivnosti kolor displeja

Aktivni-TN i DSTN displeji rade u transmisionom režimu rada i potpuno su nečitljivi u uslovima jačeg osvetljenja okoline. To može da se kompenzuje povećanjem pozadinskog osvetljenja u displeju, ali ono ima granice sjajnosti. Povećanje pozadinskog osvetljenja zahteva veći utrošak energije i kao rešenje je neprihvatljivo za pokretne sisteme. Upravo pokretni sistemi treba da rade u uslovima jakog osvetljenja okoline, a da pri tome ne troše električnu energiju. Umesto da se nadjača osvetljenje okoline, prirodno je da se ono iskoristi za rad displeja. Zato je reflektivni režim rada logično rešenje za displeje za spoljnu upotrebu.

Klasične reflektivne TN i STN ćelije su relativno slabe u ovom režimu rada. Za kolor TN ćeliju sa dva polarizatora reflektivnost je samo 3%. Najveći deo energije gubi se na ulaznom polarizatoru (skoro 50%) i kolor filtrima, mada sve komponente displeja doprinose gubitku. Poboljšane izvedbe klasičnih ćelija daju preko 10% reflektivnost za kolor displeje (integrisani reflektor blizu kolor filtra, ćelija sa samo jednim polarizatorom, itd.).

Ako displej ima dobru reflektivnost ima i dobru čitljivost - kako u uslovima jakog svetla (100000Lx u podne na suncu), tako i u zatvorenom prostoru (100Lx u radnoj prostoriji).

Za kolor displeje postoji jedan specifičan problem, koji smanjuje reflektivnost. Klasičan kolor displej ima strukturu prikazanu na slici 6.1(a). Svaki piksel se sastoji od tri pod-piksela (sa kolor filtrima), koji su električno nezavisni i koji definišu tri osnovne boje u spektru za emisiju (aditivnu) generaciju boja: crvenu, zelenu i plavu. Na tom principu rade klasične katodne cevi u boji (sadrže tačke ili pruge sa tri različita fluorescentna materijala), kao i standardni TFT-LCD (sadrže kolor filtre). Za upadnu svetlost jedne od osnovnih boja maksimalna reflektivnost je 33%, jer je druga dva filtra apsorbuju.

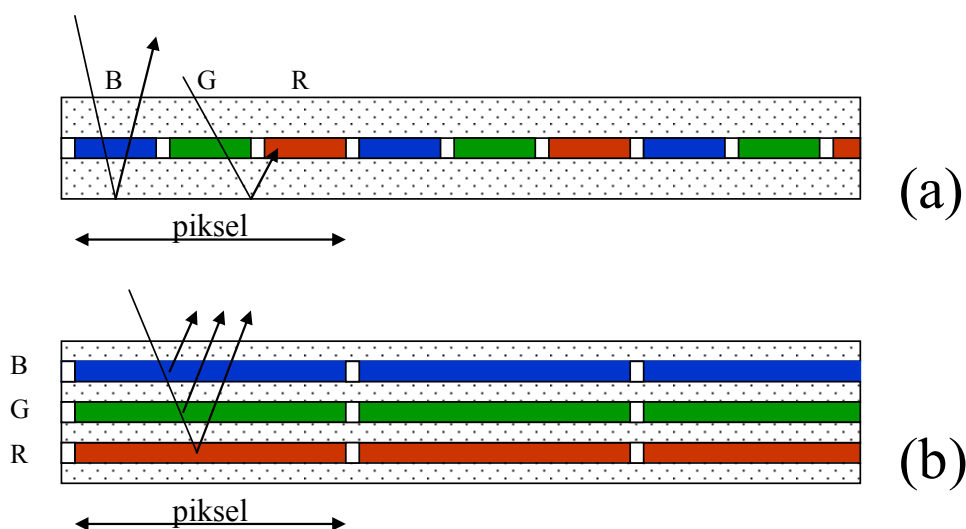
Drugi problem je interakcija između filtra. Samo svetlost koja pada skoro normalno na određeni filter biće reflektovana nazad kroz isti filter, te će da doprinese reflektivnosti displeja. Svetlost koja pada sa strane proći će posle refleksije o pozadinski reflektor kroz filter druge boje. Ovaj filter je apsorbuje i svetlost je za posmatrača izgubljena. Gubitak reflektivnosti zavisi od razmaka između filtra, rastojanja između filtra i reflektora i ugla gledanja. Efekat može da se smanji ako se reflektor integriše unutar displeja blizu kolor filtra tokom proizvodnje (kod konvencionalnih displeja reflektor se nanosi spolja na donji substrat). Povećanje razmaka između filtra nije rešenje, jer se smanjuje njihova površina (za istu rezoluciju i dimenzije displeja), što slabi kolorit i kontrast.

Bolja konfiguracija za kolor displeje od redne konfiguracije prikazane na slici 6.1(a) je **sendvič struktura** prikazana na slici 6.1(b). Da bi sendvič ("stacked" ili slojna) struktura ispravno radila potrebno je da budu zadovoljeni sledeći osnovni uslovi:

1. Svaki sloj utiče na reflektivnost jednog dela spektra vidljive svetlosti (jednog opsega talasne dužine), a pri tome
2. sloj ne utiče na ostatak spektra, koji potpuno propušta.

Ovakvim konceptom moguće je dobiti idealnu reflektivnost (transmitivnost) do 100%. On je osnovna ideja za konstrukciju reflektivnih holesteričkih displeja.

Na žalost, problem gubitka reflektivnosti pri velikim uglovima gledanja (sa strane) postoji i kod reflektivnog holesteričkog tipa displeja za donja dva sloja (sl.6.1(b)).



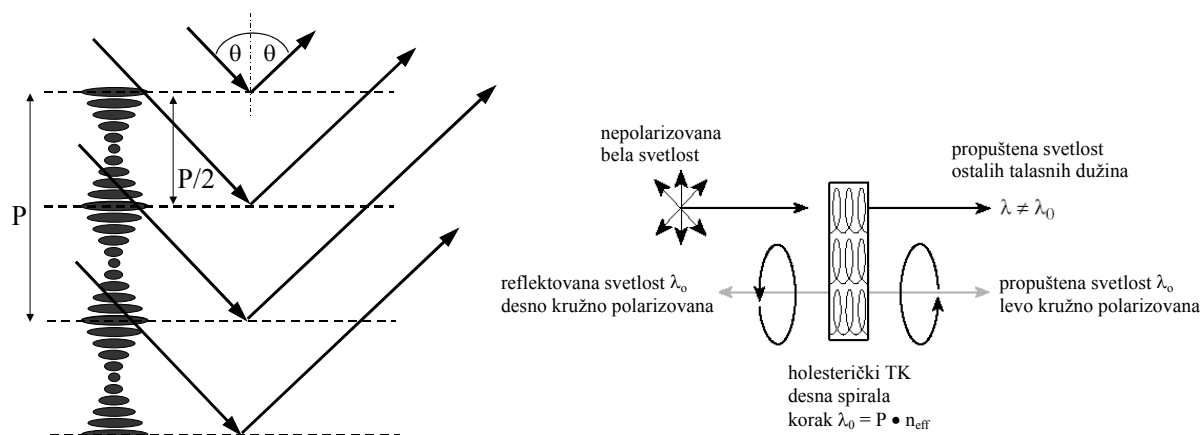
Slika 6.1: (a) Koncept generacije boje u konvencionalnim displejima – redna geometrija kolor elemenata. (b) Sendvič ili slojna ("stacked") struktura za aditivnu generaciju boja.

U opštem slučaju postoji protivrečna zavisnost između čistoće ili zasićenja boja koju je moguće postići i reflektivnosti displeja:

- Ako su slojevi usko-pojasni (reflektuju uzak opseg upadnih talasnih dužina), reflektujuća svetlost od pojedinačnih slojeva je bliža monohromatskoj. Tako je superpozicijom tri reflektujuće svetlosti moguće dobiti tačnije definisane boje (boje većeg zasićenja). Pri tome je, međutim, ukupan reflektovani intenzitet manji.
- Ako su slojevi široko-pojasni (reflektuju širok opseg talasnih dužina), boje su slabije definisane – manje zasićene, ali je ukupan intenzitet reflektovane svetlosti veći.

6.2. Princip rada višeslojnog holesteričkog kolor displeja

Reflektivni slojevi na slici 6.1(b) mogu da se naprave sa holesteričkim tečnim kristalom. Holesterici poseduju jedinstvenu osobinu da reflektuju svetlost talasne dužine koja odgovara koraku prostorne spirale, koju formiraju usled hiralnosti. Efekat je opisan u poglavlju 3.3 o holestericima, a ilustrovan je na slici 6.2. Reflektovana je kružno polarizovana komponenta čija talasna dužina (u tečnom kristalu) odgovara koraku spirale i orijentaciji spirale (leva ili desna). Kružno polarizovana komponenta suprotne orijentacije je propuštena, kao i sve talasne dužine koje ne odgovaraju koraku spirale.



Slika 6.2: Efekat Bragove refleksije na holesteričkim slojevima. P – korak holesteričke spirale.

Usled simetrije direktora $\mathbf{n}$ i $-\mathbf{n}$ u holesteričkom materijalu (hiralnom nematskom) materijalne karakteristike su periodične sa periodom $P/2$, gde je P korak spirale. Tako je rastojanje između slojeva za Bragovu refleksiju jednako $d = P/2$. Za zrak koji pada pod uglom θ u odnosu na normalu na slojeve (osu spirale) refleksioni maksimumi su dati sa

$$k \lambda = 2 d \sin (90^\circ - \theta) = P \cos \theta, \text{ gde je } k > 0 \text{ ceo broj.}$$

Pri normalnom upadu svetlosti ($\theta=0$) prvi maksimum nastaje za $\lambda_1=P$, odnosno za talasnu dužinu upadne svetlosti od $\lambda_o = \lambda_1 * n_{\text{eff}}$, gde je n_{eff} srednji (efektivni) indeks prelamanja materijala koji vidi upadni zrak. Reflektovana je kružno polarizovana komponenta talasne dužine P , saglasna orijentaciji spirale (leva ili desna orijentacija). Kružno polarizovana

komponenta suprotne orijentacije je propuštena. Sve ostale talasne dužine koje ne odgovaraju koraku spirale materijala su takođe propuštene.

Vidimo da holesterički tečni kristali zadovoljavaju uslove za realizaciju slojnih (višenivovskih) kolor reflektivnih ćelija. Druge ćelije displeja koje mogu da se slojno postave ("stack") su dihroidne ćelije. U nastavku ćemo diskutovati samo holesteričke ćelije.

Za polarizovanu svetlost koja pada na monodomen holesteričkog materijala širina reflektovanog spektra je reda 20nm [66,67].

U praksi se korak P holesteričkih tečnih kristala podešava za vidljivi opseg (380-780nm). Korak se, takođe, lako podešava za ultraljubičasto ili infracrveno zračenje. Od debljine ćelije zavisi broj koraka spirale. Tipične debljine ćelije su reda 4-6 μ m.

Dodavanjem hiralnih dopanta koji utiču na promenu koraka holesteričke spirale moguće je podešavanje talasne dužine svetlosti koja se reflektuje [55,68,69,70,71]. Za primenu u reflektivnim displejima postavljaju se posebni zahtevi za holesteričke materijale:

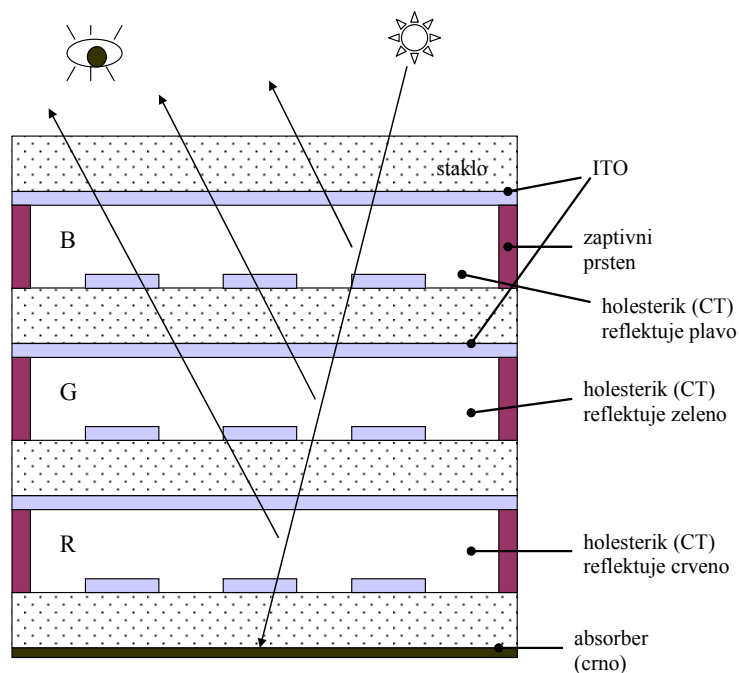
- visoka indukcija hiralnosti,
- lako podešavanje koraka P,
- laka stabilizacija domenske strukture,
- što je god moguće slabija zavisnost koraka spirale P od temperature.

U tom pravcu se radi na holesteričkim materijalima (hiralni dopanti za široko-razvijene nematske materijale) za primenu u reflektivnim holesteričkim displejima.

Na slici 6.3 prikazana je praktična realizacija troslojnog reflektivnog holesteričkog displeja. Ona odgovara konstrukciji displeja čiji su tehnološki koraci dati u poglavlju 6.3 (praktičan deo). Gornje i donje ploče osnove (substrata) su sa jednostranim slojem ITO (kod praktično realizovanog displeja substrat je konvencionalna tanka staklena ploča). Dve ploče za srednji sloj su substrati sa dvostranim ITO slojem. Krajevi displeja su standardno zaptiveni. Slojevi su ispunjeni holesteričkim tečnim kristalima sa odabranim korakom spirale i domenskom strukturom. Obično je donji sloj za crvenu (R), srednji za zelenu (G) a gornji za plavu (B) svetlost. Osnova donjeg substrata je premazana crnim apsorbujućim slojem. Svaki sloj holesteričkog tečnog kristala posebno je kontrolisan lokalnim naponom na adresiranom delu displeja. Napon se dovodi preko ukrštene matrice ITO elektroda. Substrati u sredini su sa dvostranim ITO slojem. Izvor svetlosti je okolina. Slojevi za orijentaciju naneti su preko substrata i ITO elektroda (nisu predstavljeni na slici 6.3).

Holesterička reflektivna ćelija:

- ☐ nema polarizatore,
- ☐ nema reflektore i
- ☐ nema kolor filtre.



Slika 6.3: Konstrukcija troslojnog holesteričkog kolor displeja.

Srednji sloj (zeleni G, na primer) uobičajeno se puni materijalom sa suprotnom orijentacijom spirale od gornjeg (plavi B) i donjeg sloja (crveni R). Na taj način se smanjuje gubitak zelene i crvene svetlosti [76].

6.3.1. Prelazi između faza i upravljanje ćelijom

Performanse holesteričkog reflektivnog displeja direktno zavise od **faza holesteričkog sloja** (CT – holesteric textures):

- od stabilnosti faza CT
- od prelaza između faza.

Stabilnost faza zavisi od holesteričkog materijala i obrada površina.

Od dinamike faznih prelaza CT materijala za date orijentacione površine zavisi naponsko upravljanje ćelijom. U nastavku će se objasniti osobine faza CT i prelazi između njih.

Holesterici poseduju više faza, od kojih su za rad reflektivnog displeja najvažnije:

A) *Planarna faza* (planar texture) – CT je spiralna; ose spirala su normalne na granične površine substrata. CT reflektuje svetlost putem Bragove refleksije. Nereflektovan deo spektra prolazi CT sloj neometen. Ova faza je poznata kao tekstura Granžana (Grandjean, 1921 god.).

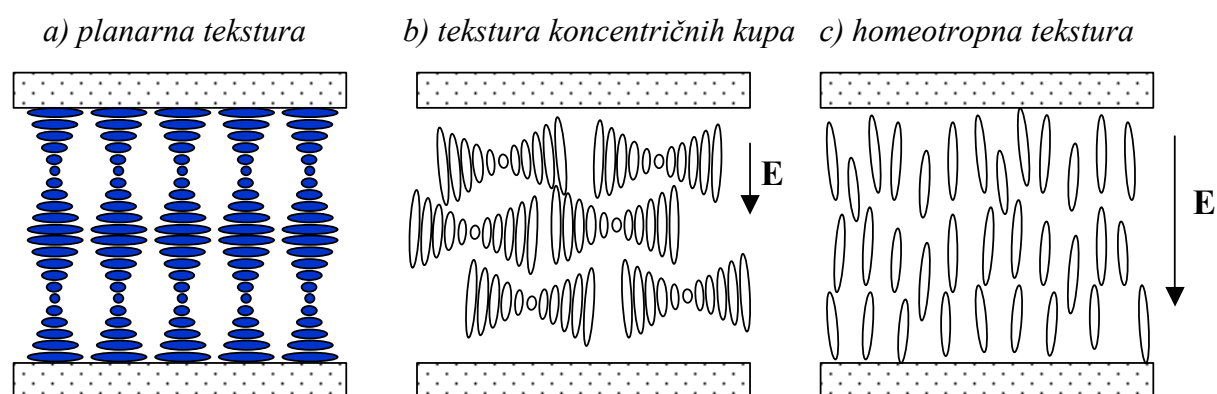
B) *Faza koncentričnih kupa* (focal conic texture) – spiralna struktura se formira, sa osama spirala približno paralelnim graničnim površinama substrata. Svetlost svih talasnih dužina slabo se rasejava u pravcu svetlosnog snopa. Sloj je praktično transparentan za ceo svetlosni opseg.

Obradom površina za orijentaciju i biranjem materijala moguće je postići da su obe faze: planarna i koncentričnih kupa, stabilne posle ukidanja napona ([74]). U normalnim uslovima, za ravnomerno poliranje slojeva za orijentaciju, stabilna je samo planarna faza, dok je faza koncentričnih kupa nestabilna. Ona se za nekoliko sekundi relaksira u planarnu fazu posle ukidanja napona. Da bi se faza koncentričnih kupa stabilizovala unose se neravnomerni slojevi za orijentaciju, što dovodi do razbijanja tekstura (planarne i koncentričnih kupa) u domene i omogućava stabilizaciju faze koncentričnih kupa [74]. U radu [51] pokazano je da se površinskom orijentacijom koja forsira homeotropnu fazu (normalan položaj mezogena prema površinama, sl.6.4) takođe može stabilisati faza koncentričnih kupa. Kao slojevi za orijentaciju predloženi su polimidi ili silani. Drugačiji pristup stabilizaciji teksture koncentričnih kupa je stabilizacija polimernom mrežom (polimer-disperzovani tečni kristali koji će biti diskutovani kasnije).

Prelazi između CT faza

Planarna faza je prikazana na slici 6.4 (levo). Pri primeni relativno slabog električnog polja spiralni domeni se zaokreću i holesterik prelazi u teksturu koncentričnih kupa, slika 6.4. Stvaraju se mali spiralni domeni, dimenzija oko $10\mu\text{m}$. Ovu fazu karakteriše slabo rasejavanje upadne svetlosti u svim pravcima i vidi se u ćeliji kao tamna (usled apsorpcije na zatamnjenom donjem substratu). Ako je ta faza stabilisana u ćeliji, ona ostaje posle ukidanja napona. Ako nije stabilisana, ona se relaksira nazad u homogenu planarnu fazu za nekoliko sekundi po ukidanju polja.

Ako se na planarnu fazu primeni jako električno polje, ona prelazi u homogenu *homeotropnu fazu*, slika 6.4. Taj prelaz zovemo i prelaz holesterik $\rightarrow$ nematik pod uticajem jakog električnog polja. Homeotropnu fazu karakteriše transparentnost, te ćelija izgleda crna. Kod dobro pripremljenih reflektivnih ćelija sa holestericima, planarna tekstura i tekstura koncentričnih kupa su stabilne, a homeotropna tekstura se održava samo dok je prisutno jako spoljašnje električno polje.



Slika 6.4: Teksture više-domenskog holesterika: a) planarna, reflektujuća; b) tekstura koncentričnih kupa, slabo-rasejavajuća – nastaje primenom slabog električnog polja; c) homeotropna faza, transparentna – nastaje primenom jakog električnog polja.

Posle ukidanja napona, homeotropna tekstura spontano prelazi u:

- ➡ planarnu teksturu, ako se električno polje ukine naglo, ili u
- ➡ teksturu koncentričnih kupa, ako se električno polje postepeno smanjuje do nule.

Homeotropno stanje ne može da bude stabilno bez električnog polja usled hiralnosti mezogena.

Fizičke pojave, koje stoje iza prelaza između holesteričkih tekstura su vrlo složene i ne u potpunosti jasne.

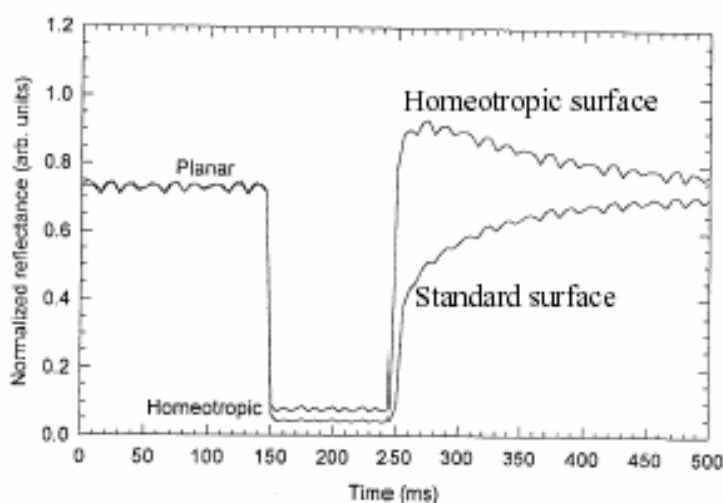
A) Uočeno je da homeotropna tekstura prelazi vrlo brzo, posle ukidanja (ili smanjenja) električnog polja, u *prelazno planarno stanje* (“transient planar state”), za oko $\tau_{h \rightarrow tp} \leq 1\text{ms}$. To stanje karakteriše hiralnost, ali sa mnogo dužim korakom spirale nego u planarnoj teksturi. Dalja relaksacija prema planarnom stanju je vrlo spora i glavni je uzrok sporosti reflektivnih holesteričkih displeja – iznosi tipično $\tau_{tp \rightarrow p} \approx 200\text{ms}$ [52]. Fenomen može da se uprošćeno opiše sledećom jednačinom

$$\gamma \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \frac{\partial F_G}{\partial \Phi} ,$$

gde je Φ ukupan ugao obrtanja, F_G – ukupna Gibsova slobodna energija sistema, a γ – kružna viskoznost materijala. Sledi procena vremena relaksacije od: $\tau_{h \rightarrow p} \approx \tau_{tp \rightarrow p} \sim \gamma d^2/K_{22}$, gde je d debljina ćelije, a K_{22} koeficijent elastičnosti za uvrtnje. Zato se radi na razvoju materijala sa malom rotacionom viskoznošću, a velikim koeficijentom elastičnosti za uvrtnje.

Napomenimo, da usled te sporosti, ova klasa displeja ne može da se koristi za video signal u realnom vremenu.

Slika 6.5 pokazuje značajan uticaj orijentacionih površina na brzinu prelaza. Uočeno je, paradoksalno, da površinska orijentacija koja forsira homeotropnu teksturu, upravo potpomaže prebacivanje iz homeotropne u planarnu teksturu. Posle ukidanja električnog polja relaksacija iz homeotropne u planarnu teksturu je znatno brža kod ćelija sa površinskim orijentacionim slojevima koji forsiraju homeotropnu orijentaciju, nego kod standardne jednolike paralelne orijentacije [51].



Slika 6.5: Promena reflektivnosti (“normalized reflectance”) holesteričkih ćelija u vremenu (“time”). Prikazana je relaksacija iz homeotropne (“homeotropic”) u planarnu (“planar”) teksturu u ćeliji sa jednoliko paralelnom orijentacijom (“standard surface”) i u ćeliji sa površinskim slojevima koji forsiraju homeotropnu orijentaciju (“homeotropic surface”) [51].

B) Suprotno dugoj relaksaciji u planarnu teksturu, “prelazno planarno stanje” prelazi u teksturu koncentričnih kupa u relativno kratkom vremenu reda 5ms.

C) Pri primeni jakog električnog polja obe teksture: planarna i koncentričnih kupa, prelaze u homeotropnu u kratkom vremenu reda 1ms.

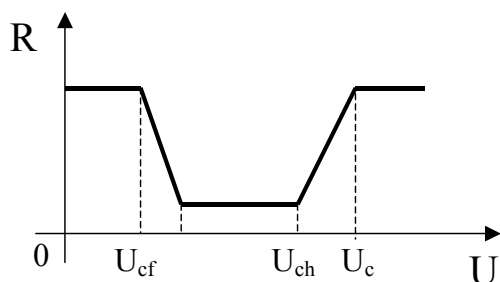
Naponsko upravljanje reflektivnom holesteričkom ćelijom zasniva se na uticaju električnog polja na teksture i njihove stabilnosti.

Naponsko upravljanje može da bude

- ❖ konvencionalno (poput upravljanja pasivnim matricama sa TN i STN ćelijama) ili
- ❖ dinamičko. Kod dinamičke naponske pobude može da se menja
 - nivo naponskog impulsa, pri konstantnom trajanju, ili
 - trajanje impulsa, pri konstantnom nivou napona.

Tipične vrednosti napona koji se primenjuju na ćelije su reda 10-40V, u trajanju od 50μs-10ms.

Ako se na ćeliju koja je u planarnoj teksturi primeni naponski impuls dovoljnog trajanja, refleksija će se menjati kao na slici 6.6.



Slika 6.6: Zavisnost reflektivnosti holesteričke ćelije od naponskog nivoa primenjenog impulsa (pretpostavljeno je da napon opadne trenutno na 0V posle isteka trajanja impulsa).

Dok je naponski nivo $U < U_{cf}$ (kritičan napon za fazu koncentričnih kupa) holesterik ostaje u planarnoj teksturi. Pri povećanju nivoa impulsa iznad U_{cf} on prelazi u teksturu koncentričnih kupa i ostaje u njoj i posle ukidanja napona. Za nivo napona iznad U_{ch} neki domeni se relaksiraju posle ukidanja napona u planarnu teksturu i reflektivnost raste. Pri $U > U_c$, svi domeni se relaksiraju u planarnu teksturu posle naglog pada napona na 0V. U opsegu $U_{ch} < U < U_c$ može se ostvariti gradacija sivog.

Naponi U_{ch} i U_c su u praksi relativno veliki ($> 20V$). Oni se smanjuju ako se viskoznost materijala smanjuje, a dielektrična anizotropija $\Delta\epsilon$ povećava.

Dinamičko upravljanje omogućuje mnogo veće brzine rada od konvencionalnog. Ono se ostvaruje tako što se holesterik najpre prebaci u homeotropnu fazu primenom impulsa relativno visokog napona. Holesterik prelazi u homeotropnu teksturu nezavisno od prethodnog stanja. To je faza pripreme, u kojoj je ćelija crna, posle koje sledi faza signala u kojoj se upisuje željeni nivo sivog (nivo reflektivnosti). Nivo sivog može da se kontroliše za vreme faze signala na dva načina:

- Menjanjem nivoa naponskog impulsa. Trajanje impulsa je konstantno, obično oko 1ms ili kraće. Za vreme faze signala nivo napona je manji od nivoa napona koji je primenjen u pripremnoj fazi. Za vreme te faze deo domena se vraća iz homeotropne u teksturu koncentričnih kupa. Što je napon signala viši, manji deo domena se relaksira u teksturu koncentričnih kupa, a veći deo ostaje u homeotropnoj teksturi. Posle ukidanja napona, deo koji je ostao u homeotropnoj teksturi se relaksira u planarnu teksturu, pa je pri većem naponu signala veća reflektivnost ćelije. Ako je napon signala nizak, velik deo domena se relaksira za vreme signala u konusno-kupastu strukturu, u kojoj ostaju posle ukidanja napona, pa je ćelija tamnija. Iznad određenog naponskog nivoa, svi domeni će se zadržati u homeotropnoj teksturi, odnosno relaksiraće se u planarnu teksturu posle impulsa. Ako je nivo napona dovoljno nizak, svi domeni će se relaksirati u teksturu koncentričnih kupa.

Realni fenomeni su ipak nešto složeniji: faza signala se primenjuje u dve podfaze, slika 6.7. U prvoj podfazi se na ćeliju dovodi naponski nivo od koga zavisi prelaz tekstura. Tokom te faze se zapravo deo homeotropne teksture prebacuje u domene prelazne planarne teksture (kao među-stanje). Krajnje prebacivanje u teksturu koncentričnih kupa se dešava za vreme druge podfaze signala – evaluacije. Tokom faze evaluacije, koja traje relativno dugo, napon na ćeliji je dovoljno visok da se domeni koji su preostali u homeotropnoj teksturi zadržavaju u njoj. Napon evaluacije je, takođe, dovoljno nizak da se domeni koji su bili prebačeni u prelaznu planarnu teksturu ne mogu vratiti u homeotropno stanje nego se relaksiraju u teksturu koncentričnih kupa. Posle ukidanja napona evaluacije, homeotropna tekstura prelazi u planarnu, a tekstura koncentričnih kupa ostaje u istom stanju.

- Menjanjem vremena trajanja impulsa, pri konstantnom nivou napona. Taj način gradacije sivog je ekvivalentan metodi sa promenom napona. Za vreme faze pripreme ceo piksel se dovede u homeotropnu fazu. Menjanjem vremena trajanja impulsa signala menja se procenat domena koji prelaze iz homeotropne u teksturu koncentričnih kupa. Primenjen naponski nivo signala je manji od nivoa u pripremnoj fazi.

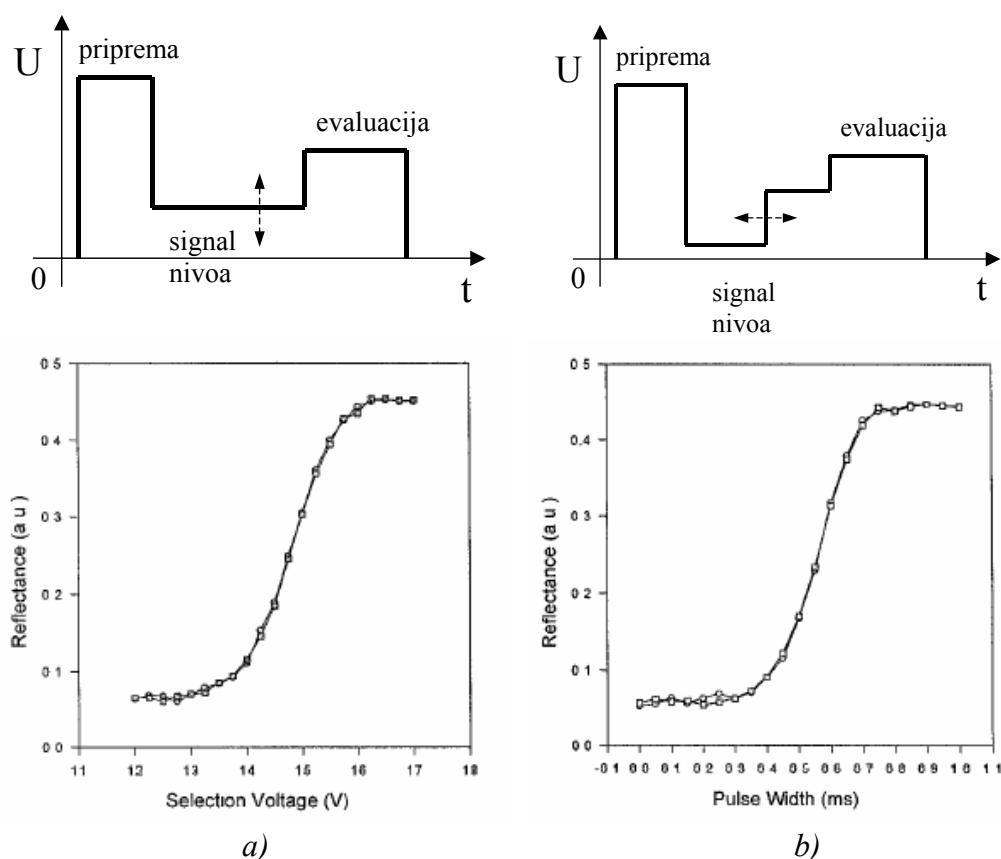
Sopstvena sporost reflektivne holesteričke ćelije može da se značajno nadomesti poboljšanim dinamičkim šemama upravljanja, ali one zahtevaju posebna integrisana kola (IC) dizajnirana za pobudu holesteričkih displeja. Upravljanje displejom može da se poboljša na razne načine: linije mogu da se pripremaju u isto vreme ili da se istovremeno evaluiraju. Tehnika među-slika (interlasing⁷) je primenljiva. U opšte, povećanje broja slika u sekundi, je praćeno gubitkom kontrasta i kvalitetom pokretnih slika. Takve metode mogu da dovedu do “kvazi-video” rada.

Rad [48] daje neke eksperimentalne podatke:

- Test ćelija je napravljena korišćenjem 23nm sloja za orijentaciju “7511”.
- Debljina ćelije je 4.0µm.
- Nematski tečni kristal MLC 6080 ($\Delta n=0.0204$, niska viskoznost, visoka K), sa dodatkom 40% CB15 hiralnog dopanta. Viskoznost masivnog MLC 6080 iznosi 18mm²/s, $K_{11}=14.4\text{pN}$, $K_{22}=7.1\text{pN}$ i $K_{33}=19.1\text{pN}$.
- Talasni oblici signala: pripremna faza 60V za 1ms (minimalno), faza evaluacije 26V za 5ms (minimalno). Faza signala se sastoji od tri podfaze: dve sa 15V i faze upisa gradacije sivog od 5-10V, u ukupnom trajanju od 1ms. Ukupno vreme signala upisa informacije iznosi 7ms.
- Neki rezultati:
 - 160 linija 1/8 VGA, 30Hz frekvencija slike, bez interlasinga $\Rightarrow R=35\%$, kontrast 4.3
 - 480 linija VGA, 30Hz frekvencija slike, bez interlasinga $\Rightarrow R=28\%$, kontrast 3.6

⁷ “Interlasing” je tehnika umetanja međuslika. U toku vremena jedne slike, ne adresiraju se sve linije po redu, nego se adresira na primer svaka druga linija, ali sa dva puta većom frekvencijom. Tako se smanjuje treperenje slike. Ukupna količina pokazane informacije je ista kao i bez “interlasing” (dve polu-slike za vreme jedne slike).

Opšti problem brzine rada holesteričkih reflektivnih displeja je da prelaz u planarnu teksturu zavisi od spontane relaksacije samog tečnog kristala, a da nije potpomognut spoljašnjim električnim poljem. Da bi prelaz bio brz, materijal treba da ima malu rotacionu viskoznost i što veću konstantu elastičnosti. Nažalost, povećanjem elastične konstante povećava se potrebno električno polje za prelaz u homeotropnu fazu (električno-indukovan holesterik-nematik prelaz). Tako je usled značajne debljine ćelije potreban visok napon za upravljanje. Standardne mikroelektronske tehnologije ne pružaju radne napone preko 20V. Zato integrisana kola moraju da se prave u posebnim visoko-naponskim procesima.



Slika 6.7: Dinamičko upravljanje reflektivnosti: a) variranjem napona signala (trajanje 1ms); b) variranjem trajanja napona signala [50].

Trajanje impulsa koje je potrebno za upravljanje holesteričkim displejom veoma zavisi od temperature. Tako je ćelija oko 3 puta brza pri 50°C u odnosu na 25°C, ali je sporija oko 50 puta na -20°C. Iz ovog se vidi da je vreme osvežavanja displeja na niskim temperaturama neprihvatljivo dugo za mnoge komercijalne primene.

6.3.2. Generacija boja i karakteristike displeja

Domenska struktura CT slojeva utiče na

- ugao gledanja,
- kontrast, i
- gradaciju sive boje (intenziteta) sloja.

Kada je sloj u planarnoj (reflektujućoj) fazi materijal je organizovan u domene sa jedno-obraznom orijentacijom ose spirale, ali pravac ose spirale varira od domena do domena, oko normale na ploče supstrata. Što su domeni manji, variranje pravca osa spirala domena oko normale je veće i veći je **ugao reflektivnosti ćelije**, ali je manja reflektivnost pri pojedinačnom uglu gledanja. Veličina domena se kontroliše i oni se stabilišu orijentacionim slojevima.

Kontrast displeja zavisi od slabo-rasejavajuće teksture koncentričnih kupa. Što ona više propusti, a manje reflektuje upadne svetlosti, to će kontrast da bude veći. Propuštena svetlost se apsorbuje na crnom sloju donjeg supstrata.

Gradacija sivog se postiže delimičnom preorijentacijom domena iz planarne u teksturu koncentričnih kupa, variranjem primenjenog napona na ćeliji. Na taj način intenzitet reflektovane svetlosti se smanjuje a propuštene (na kraju apsorbirane) svetlosti se povećava. U tronivovskom kolor displeju svaki sloj može da se posebno kontroliše. Ključna je pojava da je stanje teksture stabilno dugo vremena posle formiranja stanja i da za njeno održavanje nije potreban napon. Ćelije sa 256 (2^8) nivoa sivog, koje su ostale stabilne više meseci posle upisivanja, su demonstrirane [63,72].

Radi dobijanja stabilnih boja u displeju potrebno je sprečiti difuziju tečnog kristala između piksela. Upotreba **polimer-disperzovanog holesterika** dobar je pristup rešenju tog problema [74]. Ovi materijali se intenzivno proučavaju jer jednostavno daju željenu mnogodomensku strukturu holesterika, pogodni su za fleksibilne displeje, za displeje sa samo jednim supstratom, lako se nanose u industrijskoj proizvodnji, itd. Dobijaju se dodavanjem male količine polimera u tečni kristal, koji posle polimerizacije (UV zračenjem) formira mrežu domena sa tečnim kristalom koji su odvojeni tankim zidom polimera [49,53,54].

Povećanje reflektivnosti primenom dvostrukog CT sloja za istu boju

Holesterički materijal reflektuje samo onu kružno-polarizovanu komponentu koja je u istom pravcu rotacije kao i spirala holesterika. Komponenta suprotnog smera je propuštena i na kraju izgubljena usled apsorpcije na crnom sloju podloge. Tako je maksimalna reflektivnost sloja smanjena. Postoje tri načina za poboljšanje reflektivnost:

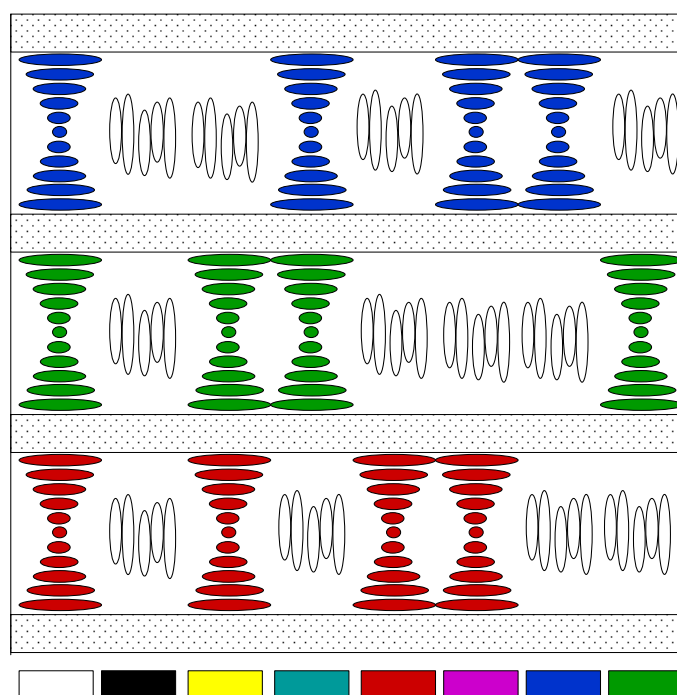
- 2) Dodavanje još jednog holesteričkog sloja iste boje, ali suprotne orijentacije spirale. Slojevi suprotnih orijentacija su odvojeni tankim međusupstratom. Komponenta koja je propuštena kroz prvi sloj biće reflektovana o drugi sloj i propuštena neometano kroz prvi sloj. Tako je ukupna reflektivnost za datu boju potpuna.
- 3) Koristeći dva sloja iste orijentacije spirale, koji su razdvojeni slojem za kašnjenje od $\lambda/2$.
- 4) Kapsulacijom holesteričkog materijala sa obe orijentacije spirale u polimere. Kapsulirane kapljice različite orijentacije spirale mogu da se mešaju u istom sloju.

Kod rešenja sa dvostrukim holesteričkim slojem (za svaku boju) međusupstrat ima elektrode sa obe strane koje su vertikalno kratko spojene, što je tehnički složeno. Ostvarena reflektivnost nije 2x veća do jednoslojne ćelije, nego oko 1.5x [73]. Ipak, reflektivnost za ugao gledanja od 10° prelazi 80%, a za ugao od 30° dostiže 30% [73].

Generacija boja

Boje se u kolor reflektivnim holesteričkim displejima stvaraju po “aditivnom” ili “emisionom” principu, poput generacije boja u ekranima sa katodnim cevima ili LC displejima sa kolor filtrima u transmisionom režimu rada. Slaganjem tri osnovne boje (izabrane su crvena R, plava B i zelena G) u oku stvara se u mozgu osećaj boja u spektru.

Generacija boja u troslojnom holesteričkom reflektivnom displeju je prikazana na slici 6.8. Slaganje boja je aditivno. Sivom gradacijom svakog pojedinačnog sloja moguće je dobiti širok opseg boja. Belo se dobija refleksijom od sva tri sloja, a crno pri transparentnosti sva tri sloja usled apsorpcije o donju zatamnjenu podlogu.



Slika 6.8: Generacija boja u troslojnom holesteričkom reflektivnom displeju.

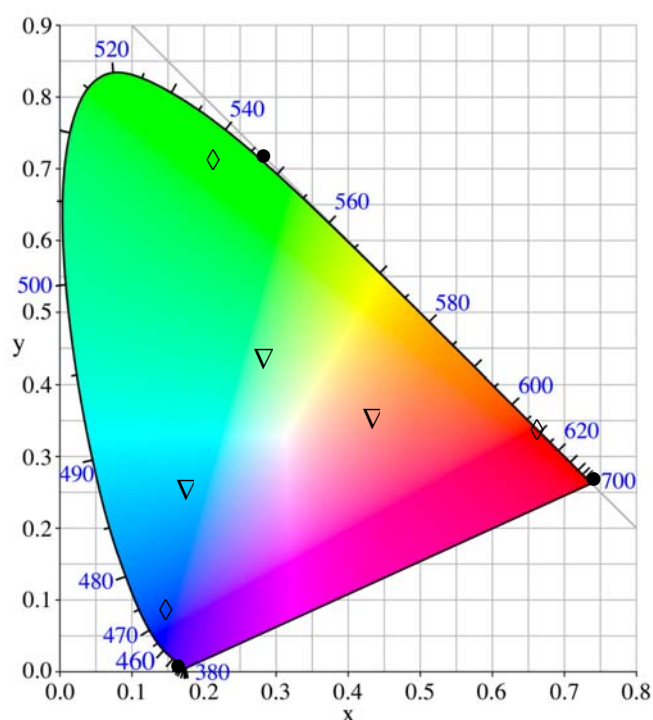
Na slici 6.9 prikazan je stari standardni dijagram boja po CIE (1931 god). Naznačene su koordinate boja slojeva u holesteričkom displeju koji je realizovan sa polimer-stabilizovanim teksturama u laboratoriji ASULAB [63] – primari ∇ : R(0.429,0.350), G(0.278,0.425) i B(0.176,0.248). Na slici su takođe označeni osnovni monohromatički primari od 700.0nm (R), 546.1nm (G) i 435.8nm (B). Radi poređenja unesene su standardne FCC norme za kolor TV: R(0.67,0.33), G(0.21,0.71), B(0.14,0.08). Interval boja koje je moguće postići displejem sa tri primara je dat trouglom čija su temena primari. Boje van tog trougla nije moguće postići.

Opseg TV standarda je relativno skroman, mada on obuhvata većinu boja koje srećemo u prirodi. Opseg boja holesteričkog displeja datog u [63] je znatno uži od TV standarda. Taj holesterički displej ne može da reprodukuje boje većeg zasićenja (sl.6.9).

Međutim, reflektivnost kolor displeja sa polimer-stabilizovanim teksturama datog u [63] je odlična: 32%.

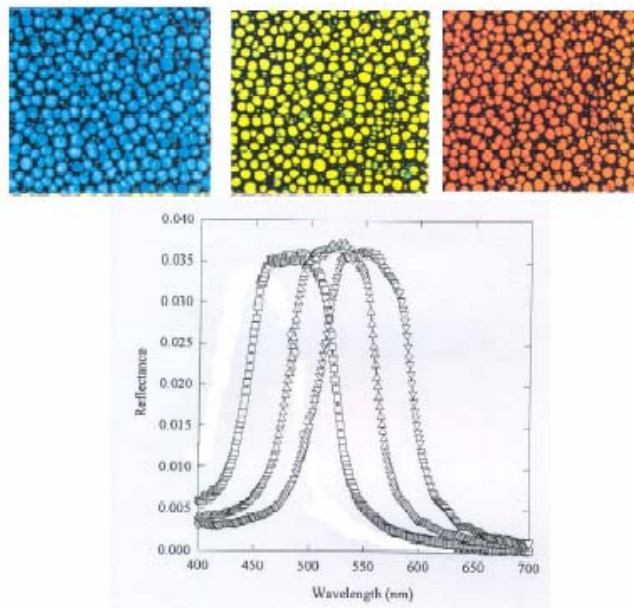
U praksi se postižu holesterički materijali koji daju relativno čistu (saturiranu) plavu (B) i zelenu (G) svetlost, dok je kvalitet crvene (R) slabiji. Kod crvene se pored osnovne talasne dužine Bragove refleksije, javljaju i sporedne refleksije kraćih talasnih dužina. Više pristupa rešenju problema dobijanja čiste crvene boje predloženo je u literaturi [57].

Reflektivne holesteričke displeje je moguće realizovati na plastičnim substratima. Komercijalni prototipovi fleksibilnih pasivnih reflektivnih displeja bez stalnog napona napajanja su demonstrirani 2006 god. sa karakteristikama: rezolucija 100dpi (dot per inch – piksela po 2.5cm), 240x160 matrica piksela (1/8 VGA), 4 bitna gradacija intenziteta (16 nivoa) svake boje, na plastičnom supstratu (između dva supstrata od 125 μ m); tečni kristali su kapsulirani polimerizacijom [53]. Takve fleksibine displeje moguće je napraviti sa samo jednim fleksibilnim substratom.



Slika 6.9: Koordinate boja jednog holesteričkog displeja ∇ [63], FCC TV norme $\diamond$ i klasični kolorimetrijski primari od 700.0, 546.1 i 435.8nm $\bullet$ u klasičnom CIE 1931 sistemu.

Primer merenih spektralnih karakteristika holesteričkih slojeva reflektivnog displeja je dat na slici 6.10. Slojevi su napravljeni mikrokapsulacijom holesteričkog materijala u polimeru (20% termoplastike poli (vinil butural) i 80% tečni kristal). Displej je na plastičnom supstratu.



Slika 6.10: Primer merenih karakteristika holesteričkih slojeva reflektivnog displeja [54].

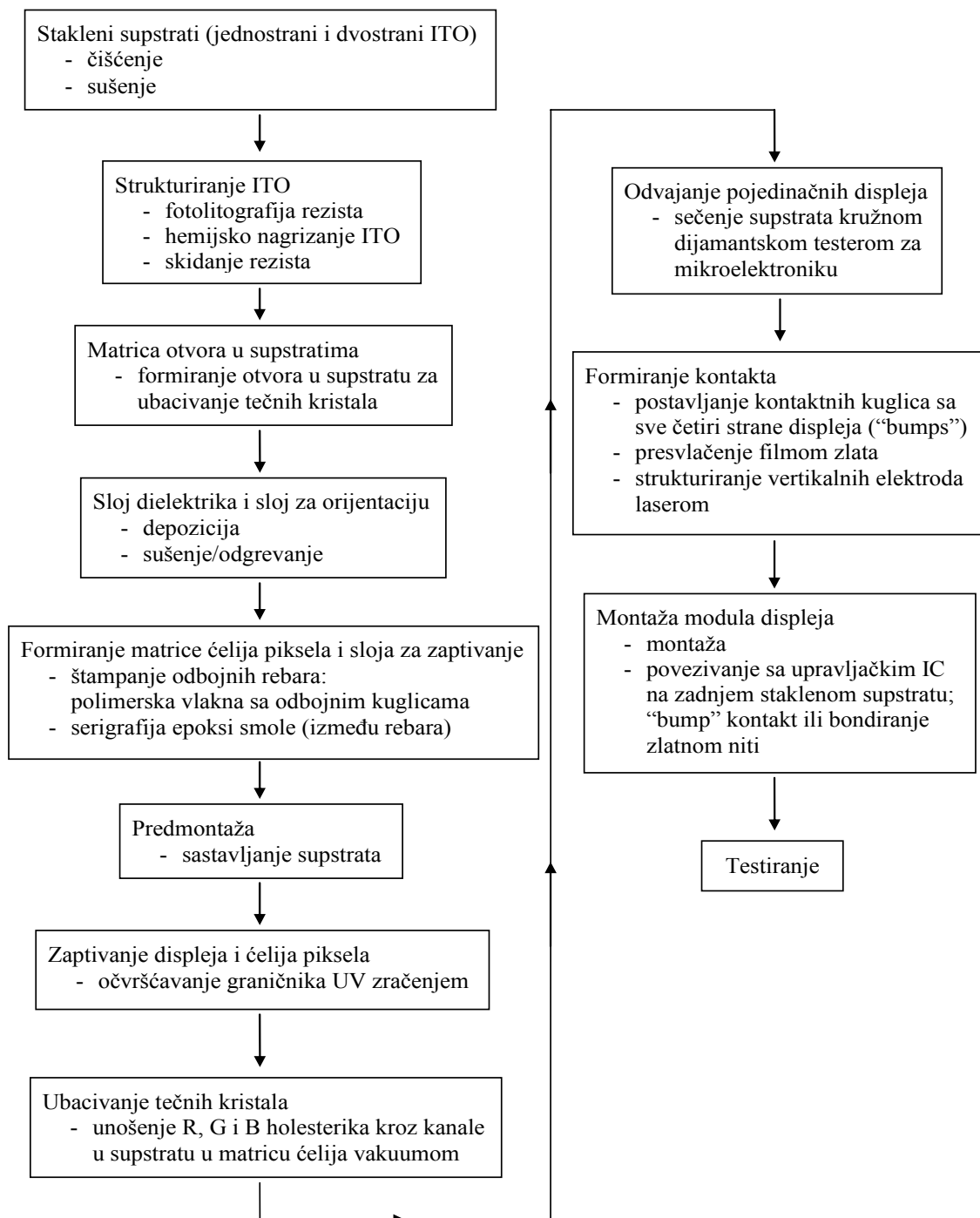
Neke performanse demonstriranih displeja iz literature:

Prva demonstracija dinamičkog upravljanja reflektivnim holesteričkim displejem [50]: VGA format (640×480), 133dpi rezolucija, 16 nivoa sivog (4 bit), 35% reflektivnost, kontrast 15:1.

Prvi troslojni kolor displej, 1998 god [77]: 100dpi rezolucija, 1/8 VGA (160x240), 8 čistih boja (bez sive gradacije), veličina piksela 240μm, debljine ćelija 4.0μm B, 4.5μm G i 6.0μm R, pasivno upravljanje koristeći konvencionalan 40V STN čip sa unipolarnim impulsima, vreme obnove slike 1.2s.

6.3. Tehnologija izrade troslojnog holesteričkog displeja

Postupak pravljenja troslojnog holesteričkog displeja u mnogome je sličan proizvodnji TN displeja sa substratom od stakla. Većina tehnoloških koraka je identična ili slična. Realizacija slojnog holesteričkog displeja zahteva, međutim, neka dodatna – specifična – tehnička rešenja i tehnološke korake [58,59,60]. Tok procesa za displeje sa substratom od stakla i klasičnim holestericima (ne holesterici kapsulirani u polimeru) prikazan je na slici 6.11.



Slika 6.11: Tok procesa realizacije holesteričkog kolor displeja.

Troslojni holesterički displeji mogu da su matričnog tipa ili sa segmentima. Matrični displeji imaju tipičnu podelu (raster) od 260 kolona (zajedničke elektrode) x 195 redova (elektrode podataka), sa rezolucijom od 130 ppi ("pixel per inch" – piksela po inču, 1 inč $\approx$ 2.5cm). Perioda ITO elektroda je 192 μ m, širina elektroda je 142 μ m, a razmak između njih 50 μ m.

Za proizvodnju displeja koriste se već pripremljeni supstrati sa jednostranim ili dvostranim slojem provodnog materijala. U našem slučaju supstrat je izrađen od relativno tankog BSG (bor-silikatno staklo) debljine 300 μ m. Dimenzija polaznog supstrata je 175mm x 175mm i na njemu se istovremeno realizuje oko 30 displeja. Supstrati korišćeni za gornje i donje površinske slojeve samo su sa jedne strane prevučeni provodnikom – ITO (indijum-kalaj-oksidi, InSnO₃). Dva supstrata za unutrašnje slojeve imaju ITO sa obe strane (pogledajte konstrukciju displeja na slici 6.3). Supstrati sa jednostranim i dvostranim ITO su kupljeni gotovi od proizvođača. ITO se obično nanosi na supstrat spaterovanjem ("sputtering") ili naparavanjem. ITO je vrlo tanak (debljina je manja od 100nm ; čak do 25nm). Kao barijera između stakla i ITO u tehnologiji displeja obično se koristi SiO₂.

Supstrati sa ITO slojem se čiste hemijskim postupkom i suše na početku procesa izrade displeja u uslovima čiste sobe (clean-room klase 100).

Prvi korak je strukturiranje matrice ITO elektroda u obliku traka na jednoj ili na obe strane supstrata. Matrica ITO elektroda se izrađuje sledećom procedurom:

- fotolitografija,
- hemijsko nagrivanje ITO, koristeći rezist⁸ (sloj za strukturiranje) kao zaštitnu masku,
- skidanje preostalog rezista.

Postupak litografije ITO sloja

- a) Nanošenje rezista ("resist spin-coat"): U mikroelektronskoj industriji rezist se uobičajno nanosi na podlogu kružnog oblika (vejfer) brzim rotiranjem podloge. Taj postupak je poznat kao "resist spin coating" ili "resist spin" – nanošenje obrtanjem. Mi smo primenili taj postupak na kvadratne substrate: nekoliko ml rezista⁹ se nakapa blizu centra supstratne ploče koja je počela da rotira. Rezist se brzim obrtanjem raspodeljuje po ploči. Krajnja debljina zaostalog sloja rezista zavisi od: kružne brzine obrtanja (u stacionarnom stanju), tipa rezista i temperature ploče. Količina ukapanog rezista nije merodavna – skoro celokupna dozirana tečnost sleti sa supstrata tokom rotiranja. Samo mala količina se zadrži na substratu: za debljinu filma rezista od oko 1.5 μ m, kao u našem procesu, na pločama ostaje posle rotiranja oko 0.050ml, što je oko 1% od dozirane količine. Sa povećanjem kružne brzine okretanja, debljina filma opada. Vreme stacionarnog rotiranja treba da bude dovoljno dugačko da se dobije ravnomerna debljina rezista na celokupnoj pločici, koja ne zavisi od vremena rotiranja. Tako se debljina filma rezista vrlo precizno podešava, što je vrlo kritično za litografiju u mikroelektronici. U našem slučaju, debljina

⁸ Rezist je zaštitni sloj koji se koristi u procesima strukturiranja u mikroelektronici. Njegova funkcija je strukturiranje, odnosno selektivno određivanje na kom delu površine poluprovodničke pločice će biti sprovedena željena operacija, poput jonske implantacije, hemijskog ili plazma nagrivanja i slično. Resist ne prevodimo kao "zaštitni sloj" na srpski jezik, pošto termin "zaštitni sloj" ima u mikroelektronskoj tehnologiji drugo značenje ("protection layer", sa raznim zaštitnim ulogama). Pogodan izraz za rezist bi bio "sloj za strukturiranje", ali u ovom radu se koristi međunarodni izraz "rezist". Pogodna reč na srpskom je i "fotolak".

⁹ Tačni podaci tehnološkog procesa potpadaju pod IP (intelektualnu svojinu) ASULAB-a i nisu slobodni za objavljivanje.

filma nije kritična, jer su ITO trake od 150 μ m veoma široke u poređenju sa debljinom rezista i talasnom dužinom svetlosti za litografiju.

Pri nanošenju rezista bitno je postići ravnomernu debljinu filma po celoj površini supstrata. Za naše potrebe, odnosno debljinu rezista od oko 1.5 μ m, brzina i vreme rotiranja su podešeni na oko 2000 rpm ("rotation per minute" – obrtaja u minuti) u trajanju od oko 30s.

- b) Korišćen rezist je pozitivnog tipa. Pozitivni rezisti su oni koji se rastvaraju (otklanjaju) u razvijaju ("developer") na onim mestima gde su bili osvetljeni, a na neosvetljenim mestima rezist ostaje netaknut u razvijaju. Kod negativnog tipa rezista je obrnuto: on ostaje na osvetljenim mestima, a biva otklonjen na neosvetljenim mestima u razvijaju.
- c) Sušenje rezista i očvršćavanje ("resist drying and bake"): ovako pripremljene ploče suše se oko 45 minuta na temperaturi od 90°C na posebnim držačima u pećima.
- d) Osvetljavanje rezista ("resist exposure"): Korišćeni rezist može da se osvetli u relativno širokom opsegu talasnih dužina (300-800nm), ali se UV (ultraljubičasto zračenje) uobičajeno koristi. Tipični izvor je 365nm. Korišćen je Hg izvor za UV litografiju firme Lot-Orijel. Tipična doza ekspozicije je u oblasti 100-300mJ/cm². Maske za litografiju (šabloni za oblik ITO elektroda) napravljeni su od hroma (Cr). Maske se postavljaju u aparat za ekspoziciju i centriraju ("mask alignment"). Na pokretni deo aparata ispod maski postavljaju se supstrati i takođe centriraju.
- e) Posle osvetljavanja substrati se potapaju u razvijaj za korišćeni tip rezista. Kako je upotrebljen pozitivan rezist, razvijaj rastvara rezist samo na onim mestima gde je bio osvetljen (dovoljnom dozom energije svetlosti). Na mestima gde je rezist neosvetljen, on ostaje. Tako je slika sa maske preneti na rezist na supstratima.
- f) Razvijaj se pere i substrati su spremni za otklanjanje ITO hemijskim nagrivanjem. ITO se može hemijski nagrizarati na više načina: neorganskim kiselinama (1:1 HCl: H₂O; 1:1:10 HF:H₂O₂:H₂O); organskim kiselinama (oksalna kiselina; oksalna kiselina + tartarna kiselina) itd. Agens za nagrivanje mora da bude selektivan prema upotrebljenom rezistu. Mi smo koristili slabo-agresivan agens sa brzinom nagrivanja 0.2nm/s. Kako je debljina ITO sloja vrlo mala (<100nm), lateralno podnagrivanje ITO ispod rezista je zanemarivo prema dimenziji elektroda. Proces nagrivanja se naglo prekida utapanjem (pranjem) supstrata u dejonizovanoj vodi ("DI water").
- g) Rezist koji je služio kao maska za ITO nagrivanje skida se ("resist strip") potapanjem u alkalni rastvor.

Postupak fotolitografije je ponovljen posebno za svaku stranu supstrata sa dvostranim ITO slojem. U opštem slučaju, ako se ITO nagriza na jednoj stani supstrata, druga stana treba da bude zaštićena (na primer, rezistom). Jednostavniji pristup je da se rezist na obe strane strukturira, a potom da se ITO nagriza na obe strane istovremeno. Takav pristup zahteva, međutim, da se supstratima može manipulirati (u tehničkom smislu) sa rezistom na obe strane (u mikroelektronici, pri procesiranju vežera to nije slučaj). Takođe, pri osvetljavanju jedne strane treba paziti da se ne osvetli druga strana supstrata. To je uslov za izbor talasne dužine i doze ekspozicije svetlosti za litografiju ITO.

U literaturi je diskutovana proizvodnja holesteričkih displeja, koji su sa obe strane dvostranih supstrata istovremeno osvetljeni u fotolitografskom postupku, što skraćuje broj proizvodnih koraka [77]. Mi nismo koristili taj pristup – svaka strana je posebno osvetljena.

Konačni rezultat fotolitografskog bloka je matrica ITO elektroda koja odgovara matrici piksela displeja.

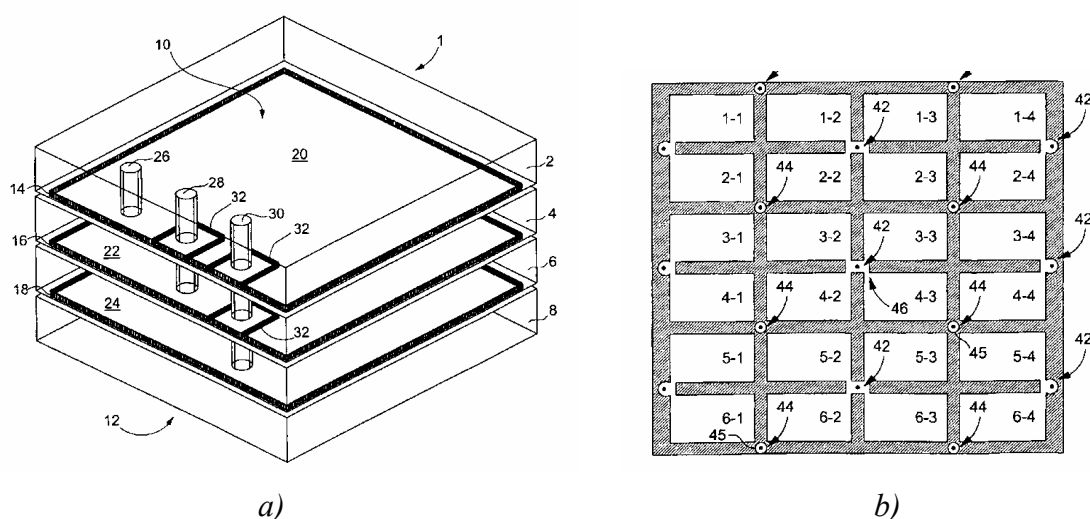
Formiranje otvora u supstratima; formiranje zaptivnih prstenova, kanala i displeja; ubacivanje tečnih kristala

Ove tehnološke operacije napominjemo, pošto su one karakteristične za ovaj tip displeja. Na supstratima se pravi istovremeno oko 30 displeja. Svaki displej je posebno formiran i fizički je skoro potpuno odvojen od susednih displeja. Tečni kristali se istovremeno ubacuju u grupe od nekoliko displeja na različitim nivoima (B, G i R) kroz vertikalne kanale, slika 6.12 a). Kanale formiraju otvori u supstratima i zaptivni prstenovi između grupa displeja, slika 6.12 b) [59].

Mali otvori u supstratima (kroz staklo i slojeve ITO) su raspoređeni u preciznom rasteru. Postoji nekoliko metoda za formiranje otvora od stotinak μm u supstratima (staklo debljine $300\mu\text{m}$):

- laserom,
- bušenje dijamantskim mikrosvrdom,
- vodeni mlaz ("water jet"),
- elektrohemijski,
- snopom mikrokristala ("micro sand blasting jet").

Sva tri sloja tečnog kristala imaju istu debljinu od $5.0\mu\text{m}$ (debljina se kontroliše prečnikom kuglica koje su povezane polimerskim vlaknima). U literaturi je diskutovana različita debljina slojeva tečnih kristala radi postizanja istih naponskih nivoa za upravljanje slojevima R, G i B [77]. U realizovanom displeju svi slojevi imaju istu debljinu.



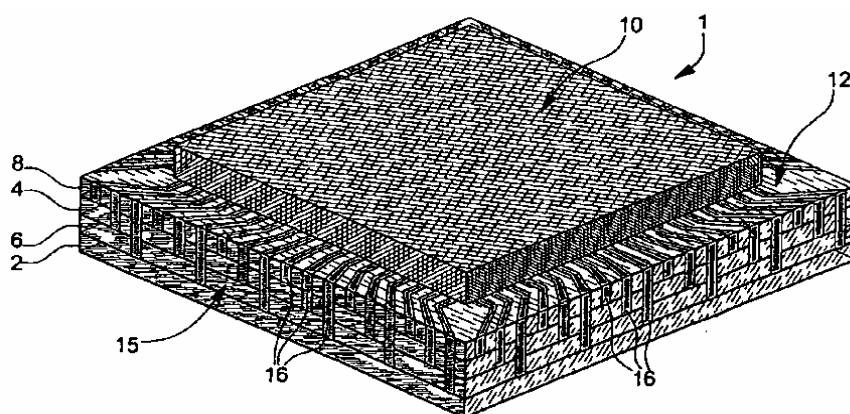
Slika 6.12: Vertikalni kanali za unošenje tečnih kristala: a) Kanali za pojedinačne R, G i B slojeve su međusobno izolovani; b) U proizvodnji, kroz svaki kanal istovremeno se puni nekoliko susednih displeja (reprodukovano iz [59]).

Kontaktiranje elektroda ćelija displeja

Kontaktiranje ITO elektroda na dvostranim supstratima je poseban izazov, koji dosta komplikuje industrijalizaciju ovog tipa displeja.

U klasičnim displejima ITO elektrode se nalaze samo sa jedne strane supstrata, te mogu da se kontaktiraju lako na delovima gde su supstrati nepreklopljeni.

U troslojnom kolor holesteričkom displeju, dva dvoslojna supstrata u sredini nije moguće kontaktirati na direktan klasičan način, nego je morala da se razvije posebna metoda [60]. Ona se sastoji u postavljanju kuglica (“bumps”) na pozicije krajeva ITO elektroda. Ta metoda je razvijena u mikroelektronici za direktno povezivanje integrisanog kola sa štampanom pločom ili modulom (“bumping” tehnika). Male (polu) kuglice, valjci ili kvadri od Au ili Al se postavljaju na kontaktne površine integrisanog kola (“contact pads”)¹⁰. U holesteričkom displeju, kontaktne kuglice služe da povežu ITO elektrode sa bočnim stranama displeja na koje je nanet sloj zlata (Au). Vertikalne elektrode od zlata se strukturiraju laserom. Postupak je primenjen na sve četiri strane displeja, slika 6.13. Na donjem supstratu se, takođe, formiraju kontaktne elektrode od zlata. Integrisano kolo (čip) za upravljanje displejem se montira na donji supstrat, okrenuto gornjom – aktivnom – stranom prema površini supstrata i kontaktira, takođe, preko kontaktnih kuglica. Upravljački čip može da se poveže sa elektrodama na donjem supstratu i bondiranjem. Tehnika “kontaktnih kuglica” nije neophodna za povezivanje sa upravljačkim čipom, ali daje kompaktniju i robustniju realizaciju modula displeja.



Slika 6.13: Rešenje za povezivanje kontrolnog integrisanog kola i tro(više)slojnog holesteričkog reflektivnog displeja (reprodukovano iz [60]).

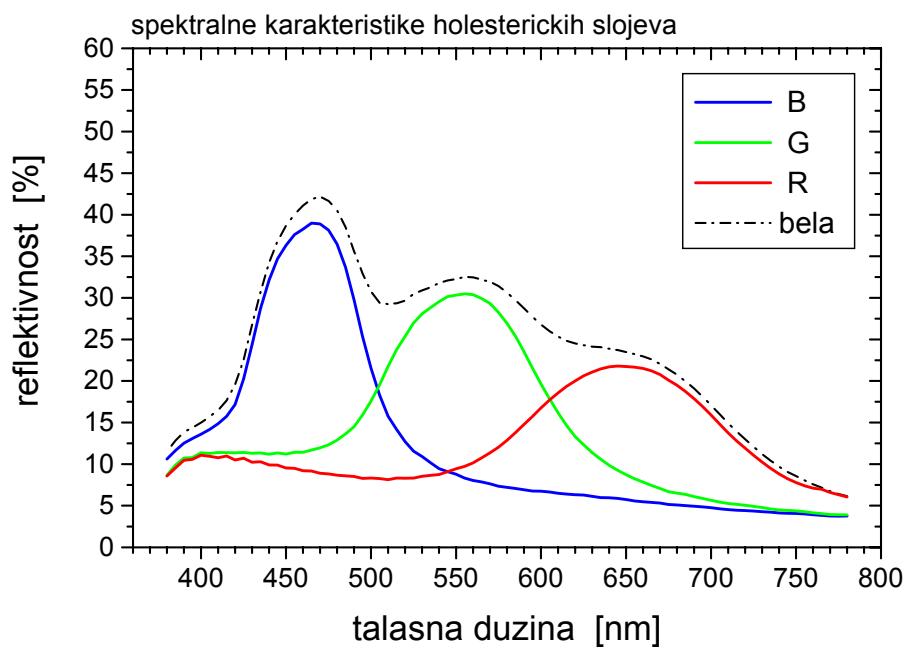
Kolo za upravljanje je dizajnirano posebno za rad holesteričkih troslojnih displeja i napravljeno u posebnom procesu koji podržava visoke napone do oko 50V.

Optičke karakteristike upotrebljenih holesterika

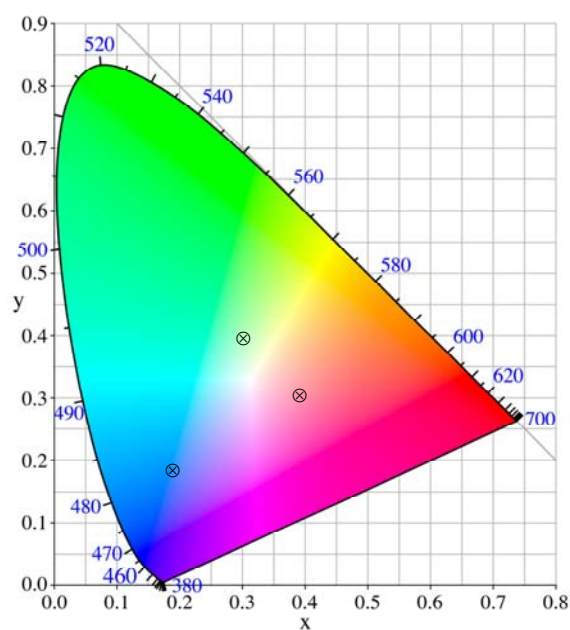
Holesterici koji se koriste u displeju nisu komercijalni, niti su naručeni od proizvođača, nego su smeše razvijene unutar laboratorije (ASULAB) radi primene u tim displejima. Spektralne karakteristike su prikazane na slici 6.14: reflektivnost u funkciji talasne dužine svetlosti. Koordinate boja su izračunate na osnovu spektralnih karakteristika i prikazane su na slici 6.15 (pretpostavljen je standardni izvor bele svetlosti D65). Karakteristika tih displeja je relativno lepa crvena boja.

Ostvarena je visoka reflektivnost. Napomenimo da je reflektivnost manja od 50% usled refleksije samo jedne kružno polarizovane komponente.

¹⁰ Te iste površine (padovi) se klasično upotrebljavaju za bondiranje zlatnom žicom. Kod bondiranja čip je učvršćen donjom stranom, a gornja sa padovima je otvorena. Kod “bumpinga” čip se okrene gornjom stranom, na kojoj su kontaktne kuglice, prema štampanom ploči, prisloni i kontaktira.



Slika 6.14: Spektralne karakteristike slojeva holesterika displeja u planarnoj fazi. "Bela" je mereni odziv displeja na izvor bele svetlosti D65.



Slika 6.15: Koordinate boja displeja u klasičnom CIE 1931 sistemu.

ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je pregled osnovnih osobina tečno-kristalnih faza, sa aspekta njihovog ponašanja u spoljašnjem primenjenom električnom polju. U opštem slučaju mezogene supstancije reaguju na spoljašnje električno polje dielektričnim (anizotropija permitivnosti) i dipolnim momentom. Koji od njih će imati dominantnu ulogu zavisi od mezogena i tečno-kristalne faze. Različite tečno-kristalne faze pokazuju različite elektro-optičke efekte. Svi elektro-optički efekti našli su specifičnu oblast praktične primene. Polje primene ne zavisi, nažalost, samo od potencijanih performansi samog elektro-optičkog efekta (brzina, jačina), nego i od raznih tehnoloških i ekonomskih činilaca, poput: stabilnosti ćelije u proizvodnji (tolerancije, prinos) i primeni (robustnost, pouzdanost).

Tako se, na primer, superiorne feroelektrične ćelije nisu probile na tržište displeja, nego je to pošlo za rukom nematskim ćelijama, sa znatno sporijim karakteristikama. Feroelektrične ćelije imaju prioritet u profesionalnim sistemima optičkih komunikacija, kao i u oblasti visokoperformansnih, minijaturnih displeja.

Drugi primer su reflektivne holesteričke ćelije sa odličnom karakteristikom reflektivnosti i mogućnošću držanja statičke slike bez utroška električne energije. Nažalost usled sporosti, njihova upotreba je ograničena na displeje prenosivih sistema bez video rada u realnom vremenu. U toj oblasti one upravo osvajaju tržište!

U ovom radu je dat opis tehnološkog postupka realizacije holesteričkih reflektivnih displeja, u kojoj je autorka rada učestvovala.

Izrada jednog kompletnog displeja zahteva multidisciplinarna znanja i tehnologije.

Literatura

- [1] J.A.Yeh, C.A.Chang, C.-C.Cheng, J.-Y.Huang, S.S.H.Hsu, "Microwave Characteristics of Liquid-Crystal Tunable Capacitors", *IEEE ED.Lett.* **26**(7) (2005) 451-453.
- [2] G.H.Heilmeyer, L.A.Zanoni, L.A.Barton, "Dynamic Scattering in Nematic Liquid Crystals", *Appl.Phys.Lett.* **13** (1968) 46.
- [3] D.M.Walba, "Liquid Crystals from Bent-Core Molecules", 8th Int.Conf. on Ferroelectric Liquid Crystals, Washington D.C., August 2001.
- [4] M.Schadt and F.Müller, "Physical Properties of New Liquid-Crystal Mixtures and Electrooptical Performance in Twisted Nematic Displays", *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-25**(9) (1978) 1125-1137.
- [5] M.Bremer, L.Lietau, M.Klasen-Memmer and K.Tarumi, "Liquid Crystal Development for VA-TFT: From Desktop Monitors to LCD-TV", Deutsche Flüssigkristall-Gesellschaft (DFKG), 32. Arbeitstagung Flüssigkristalle, Halle (2004).
- [6] "Licristal[®] Liquid Crystals from Merck", Merck KgaA katalog, Darmstadt (2005).
- [7] C.H.Gooch and H.A.Tarry, "The optical properties of twisted nematic liquid crystal structure with twist angles #90", *J. Phys. D* **8** (1975) 1575-1584.
- [8] A.D'Orazio, M.De Sario, V.Marrocco, V.Petruelli, F.Prudeniano, "Design of Tunable Photonic Band Gap Notch Filter", URSI EMTS (2004) 754-756.
- [9] B.Epling, "Analog LC Devices", Analog FLC Workshop, Boulder (CO) (2000).
- [10] T.Hegmann, M.D.Wand and R.P.Lemieux, "Large Electroclinic Effect in SmA* Liquid Crystal Mixtures Induced by an Atropisomeric Biphenyl Dopant" Proc. ILCC, Edinburgh (2002).
- [11] Y.Takahashi et al., "Fast Layer Response in Electroclinic effect of Ferroelectric Liquid Crystals by Time Resolved X-ray Micro-Diffraction", *Mat.Science, Photon Fact. Act. Rep.* 2002, nr.20, 4A/2002G293 (2002).
- [12] Y.Takahashi et al., "Dynamic layer response of electroclinic effect in ferroelectric liquid crystals by time resolved X-ray micro-diffraction", *Mat.Science* 4A/2000G279 (2000).
- [13] R.B.Meyer and R.A.Pelcovits, "Electroclinic effect and modulated phases in smectic liquid crystals", *Phys.Rev. E* **65** (2002) 061704.
- [14] R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, and P. Keller, "Ferroelectric liquid crystals", *J. Phys. (Paris) Lett.* **36** S. (1975) L69.
- [15] Y.G.Fokin, T.V.Murina and O.A.Aktsipetrov, "Ferroelectric ordering and electroclinic effect in chiral smectic liquid crystals", *APS/123-QED*.
- [16] K.D'Have, A.Dahlgren, P.Rudquist, J.P.F.Lagerwall, G.Andersson, M.Matuszczyk, S.T.Lagerwall, R.Dabrowski, W.Drszewinski, "Antiferroelectric liquid crystals with 45° tilt - a new class of promising electrooptic materials", Proc.of the 7th Int.Conf. on Ferroelectric Liquid Crystals, Darmstadt 1999, *Ferroelectrics* **244** (2000) 115-128.
- [17] K.D'have, P.Rudquist, S.T.Lagerwall, "Solution of the dark state problem in antiferroelectric liquid crystal displays", *Appl.Phys.Lett.* **76**(24) (2000) 3528-3530.
- [18] P.K.Mukherjee, H.Pleiner and H.R.Brand, "A phenomenological theory of the isotropic to chiral smectic C phase transition", *The Europ.Phys.J. E*, prihvaćeno za publikovanje.

- [19] B.Košata, J.Svoboda, V.Novotna, P.Vaněk and M.Glogarova, "Synthesis and Properties of new Liquid Crystals based on [1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene core", 10th Blue Danube Symposium on Heterocyclic Chemistry, Vienna (Austria), September 3-6 (2003).
- [20] Dirk Ganzke, "Dielektrische und elektro-optische Untersuchungen an ferroelektrischen, antiferroelektrischen und nematischen Flüssigkristallen sowie Polymer-Flüssigkristall-Systemen", disertacija, Technische Universität Darmstadt (2002).
- [21] Fedor V. Podgornov, "Thresholdless electrooptical mode in Ferroelectric Liquid Crystals", disertacija, Technische Universität Darmstadt (2004).
- [22] G.P.Wiederrecht, B.A.Yoon and M.R.Wasielewski, "Photorefractivity in Ferroelectric Liquid Crystal Composites Containing Electron Donor and Acceptor Molecules", *Adv. Materials* **12**(20) (2000) 1533-1536.
- [23] M.Jiang, B.Yang, T.Zhang, L.Ji and Y.Wang, "Study on a Lateral-Electric-Field Pixel Architecture for FLC Spatial Light Modulator with Continuously Tunable Grayscales", *IEEE Trans. Electron Devices* **50**(7) (2003) 1694-1697.
- [24] A.Jakli and A.Saupe, "Viscoelastic director rotation of a low molecular mass liquid crystal", *Liquid Crystals* **28**(6) (2001) 827-831.
- [25] C.Langer and R.Stannarius, "Travelling polarization walls in freely suspended smectic C* films", *Ferroelectrics* **244** (2000) 347, i R.Stannarius and C.Langer, "Kink propagation in freely suspended SmC* films", *Mol.Cryst.Liquid Cryst.* **358** (2001) 209.
- [26] J.Fünfschilling and M.Schadt, "Fast responding and highly multiplexable distorted helix ferroelectric liquid-crystal displays", *J.Appl.Phys.* **66**(8) (1989) 3877-3882.
- [27] Nepublikovan izveštaj o Dainippon Ink & Chemicals poseti (1991).
- [28] V.G.Chigrinov, V.A.Maikalov, E.P.Pozhidaev, L.M.Blinov, L.A.Beresnev and A.I.Allagulov, "Flexoelectric polarization of a ferroelectric smectic liquid crystal", *Sov. Phys. JETP* **61**(6) (1985) 1193-1198.
- [29] W. Haase, D. Ganzke, E. P. Pozhidaev, "Ferroelectric Liquid Crystals for Non-Display Applications", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **559** (1999) 15-26.
- [30] D.V.Wick, T.Martinez, M.V.Wood, J.M.Wilkes, M.T.Gruneisen, V.A.Berenberg, M.V.Vasil'ev, A.P.Onokhov and L.A.Beresnev, "Deformed-helix ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator that demonstrates high diffraction efficiency and 370-line pairsym resolution", *Appl.Optics* **38**(17) (1999) 3798-3803.
- [31] V.G.Chigrinov, E.P.Pohidaev, D.A.Yakovlev and H.S.Kwok, "Liquid crystal devices for optical communication systems", Optoelectronics, Proc. of the 6th Chinese Symposium, 12-14 Sept. (2003) 204-207.
- [32] W.J.A.M.Hartmann, "Ferroelectric Liquid-Crystal Video Display", *IEEE Trans. on Electron Devices* **36**(9) (1989) 1895-1899.
- [33] E.P.Pozhidaev, V.G.Chigrinov, D.D.Huang, H.S.Kwok, "Alignment of Ferroelectric Liquid Crystals with Photoanisotropic Azodye Aligning Layers", Proc. Eurodisplay (2002) 137-140.
- [34] LightView 311k Digital Display Module, Model LDM-0311-01, Engineering Specification, Displaytech Inc., Longmont (CO), USA.
- [35] C.Ciminelli, A.D'Orazio, V.Petruzzelli, A.d'Alessandro, F.Campoli, P.Maltese, "Design and Demonstration of a Vertical SSFLC Coupler Switch", Proc. MELECON (1998) 1395-1398.

- [36] W.Y.Lee, J.S.Lin, K.Y.Lee, W.C.Chuang, "SSFLC Optical Directional Coupler Switch with a Short Device Length: A Proposal", *IEEE J.of Lightwave Technology* **13**(11) (1995) 2236-2243.
- [37] D.Hermann, L.Komitov, F.Simoni, "Light-induced director reorientation through the electroclinic effect and optic axis rotation in a chiral smectic A liquid crystal", *Optics Lett.* **20**(10) (1995) 1116-1118.
- [38] A. Adamski, H. Pauwels, K. Neyts, C. Desimpel, G. Stojmenovik, S. Vermael, "The Non-uniform Theory Simulations of the Continuous Director Rotation Mode of FLC's", *Proc. Eurodisplay* (2002) 501-504.
- [39] F.Podgomov, E.Pozhidaev, D.Ganzke and W.Haase, "Variable Optical Attenuator based on Deformed Helix Ferroelectric Liquid Crystals", *Proc. of the 12th IEEE Int. Symp. on Applications of Ferroelectrics* **2** (2000) 1005-1006.
- [40] V.Pertuis and J.S.Patel, "Twisted smectic structure for gray scale modulator", *Ferroelectrics* **149** (1993) 193.
- [41] A.D.L.Chandani, T. Hagiwara, Y.-I. Suzuki, Y.Ouchi, H.Takezoe and A.Fukuda, and H.Takezoe, "Tristable Switching in Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystals with a Large Spontaneous Polarization", *Jpn. J. Appl. Physics* **27**, part 2 (1988) 729.
- [42] A.D.L.Chandani, Y.Ouchi, H.Takezoe, A.Fukuda, K.Terashima, K.Furukawa, A.Kishi, "Novel Phases Exhibiting Tristable Switching", *Jpn. J. Appl. Physics* **28**, part 2 (1989) 1261.
- [43] J. Li, T. Nonaka, A. Ogawa, B. Hornung, W. Schmidt, R. Wingen, H. R. Dübal, in *Proc. of FLC-Conference, Darmstadt*, 84 (1999). *Liquid Crystals* **26** (1999) 1599-1602.
- [44] S.-T.Wu et al., "Mixed-Mode Twisted Nematic Liquid Crystal Cells for Reflective Displays", *Appl.Phys.Lett.* **68**(11) (1996) 1455-1457.
- [45] I.Dofov, S.Joly, L.Faget, D.Stoenescu, S.Lamarque-Forget, Ph. Martinot-Lagarde, "BiNem® Bistable Nematic Display: Switching Mechanisms and Specific Materials Requirements", *Proc. of Asia Display Conf., Shanghai (China)*, March 12-16 (2007).
- [46] Matsuhiro Koden, "Wide Viewing Angle Technologies of TFT-LCDs", *Scharp Technical Journal*, no.2 (1999).
- [47] E. M. Korenic, S. D. Jacobs, S. M. Faris, and L. Li, "Color Gamut of Cholesteric Liquid Crystal Films and Flakes by Standard Colorimetry," *Color Res. Appl.* **23** (1998) 210-220. *Takode u LLE Review (Univ.of Rochester, Lab. for Laser Energetics Review)*, **73** (1997) 59-70.
- [48] J.Anderson, P.Watson, J.Ruth, V.Sergan, P.J.Bos, "A Fast Frame-Rate Bistable Cholesteric Reflective Display", *Proc. of Int. Display Res. Conf. (IDRC)* (1998).
- [49] J.William Doane, D.Davis, A.Khan, E.Montbach, T.Schneider and I.Shiyanovskaya, "Cholesteric Reflective Displays: Thin and Flexible", *Proc. Int. Display Res. Conf. (IDRC)* (2006) 9-12.
- [50] X.-Y.Huang, N.Miller, A.Khan, D.Davis, J.W.Doane, D.-K.Yang, "Gray Scale of Bistable Reflective Cholesteric Displays", *Proc. Int. Display Res. Conf. (IDRC)* (1998).
- [51] A.Khan, nepublikovano (1997).
- [52] Min-Hua Lu, "Bistable reflective cholesteric liquid crystal display", *J.Appl.Phys.* **81** (1997) 1063-166.

- [53] N.Miller et al., "Flexible Cholesteric Displays", The 25th Army Science Conf. (ASC), Orlando (Florida), Nov.27-30 (2006).
- [54] J.W.Doane, A.Khan, X.-Y.Huang and N.Miller, "Bistable Reflective Cholesteric Displays", in Proc. Int. Display Res. Conf. (IDRC) (2003) 84-87.
- [55] D.-Ke Yang, X.-Y.Huang and Y.-Mig Zhu, "Bistable Cholesteric Reflective Displays: Materials and Drive Schemes", *MS An. Rev.* **27** (1997) 117-146.
- [56] D.-X.Mi, "Dynamics of the transitions among cholesteric liquid crystal textures", Ph.D. Thesis, Kent State University (2001).
- [57] P.Kipfer, R.Klappert, H.P.Herzig, J.Grupp and R.Dändliker, "Improved red color with cholesteric liquid crystals in Bragg reflection mode", *Optical Engineering* **41**(3) (2002) 638-646.
- [58] G.Rey-Mermet, "Method for production of a device defining a volume for retaining a fluid or a sensitive material", ASULAB S.A. patent G02F 1/1339, WO 2004/001493 A1 (31.12.2003).
- [59] N.Blanckaert, R.Klappert, "Multi-layer cell, in particular liquid crystal display cell or electrochemical, photovoltaic cell", ASULAB S.A. patent G02F 1/1341, EP 1 376 210 B1 (21.09.2005).
- G.Rey-Mermet, R.Klappert, N.Blanckaert, "Method of manufacturing a batch of multi-layer cells like liquid crystal display cells or electrochemical photovoltaic cells", ASULAB S.A. patent G02F 1/1341, EP 1 376 211 B1 (21.09.2005).
- [60] G.Rey-Mermet, R.Klappert, "Connection means for setting up an electric connection between a cell, in particular a liquid crystal cell, and a power or control circuit", ASULAB S.A. patent G02F 1/13, EP 1 518 143 B1 (21.12.2005).
- J.Grupp, R.Klappert, "Display cell, in particular liquid crystal, or photovoltaic cell comprising means for connection to an electronic control circuit", ASULAB S.A. patent G02F 1/1345, EP 1 518 145 B1 (14.12.2005).
- [61] Hitachi je 1996 god. realizovao prvi displej sa IPS ćelijom.
N.Konishi, K.Kondo, H.Mano, "34-cm Super TFT-LCD with Wide Viewing Angle".
- [62] K.H.Yang, "Two-domain twisted nematic and tilted homeotropic liquid crystal displays for active matrix applications", Proc. Int. Display Res. Conf. (IDRC) (1991) 68-72.
D.-K.Yang, L.C. Chien, J.W. Doane, "Cholesteric liquid crystal/polymer gel dispersion bistable at zero field", in Proc. Int. Display Res. Conf. (IDRC) (1991) 49-52.
- [63] Joachim Grupp, "Properties and Performances of Reflective Displays", presentation at Le Club Visu, SID-France, Pessac (2006).
- [64] J.C.Jones, J.R.Hughes, A.Graham, P.Brett, G.P.Bryan-Brown and E.L.Wood, "Zenithal Bistable Devices: Towards the electronic book with a simple LCD", Proc. IDW (2000) 301-304.
- [65] Toth Katona Tibor, "Ispitivanje fizičkih osobina trokomponentnih smeša nekih holesteričkih tečnih kristala", Prirodno-Matematički Fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, diplomski rad (1991).
- [66] С.Чандрасекар, "Жидкие Кристаллы", Мир, Москва (1980). S.Chandrasekhar, "Liquid Crystals", Cambridge University Press, Cambridge (1977).
- [67] Д. Ж. Обадовић, М. Станчић, Т. Т. Катона, "Течни кристали и њихова примена", Едиција "Универзитетска научна књига", Нови Сад (1999).

- [68] D. Ž. Obadović, M. Stančić, D. Lazar, "Spectroscopic and X-ray study of the mixtures of some cholesteric liquid crystals", *Balkan Phys. Lett.* **5** (1999) 392-396.
- [69] D. Ž. Obadović, A. Vajda, S. Jovanović-Šanta, M. Stančić and J. Petrović, "The influence of new chiral additives on phase transitions of binary mixtures of some cholesteric liquid crystals", *Materials Science Forum* **321-324** (1999) 1131-1136.
- [70] D. Ž. Obadović, A. Vajda, M. Stančić, S. Jovanović-Šanta, J. Petrović, D. Lazar, "The synthesis of the Chiral non-mesogenic d-secoestrone Derivatives and their Influence on the Phase Transitions of Cholesteric Liquid Crystals", *Phase Transitions* **74** (2001) 509-519.
- [71] D. Ž. Obadović, M. Stojanović, S. Jovanović-Šanta, D. Lazar, A. Vajda and N. Éber, "The Influence of D-seco-estrone derivatives on the behavior of the Cholesteric Liquid Crystals Binary Mixtures" *International Journal of Modern Physics B* **20**(21) (2006) 2999-3013 (Online).
- [72] K. Hashimoto, M. Okada, K. Nishiguchi, N. Masazumi, E. Yamakawa, T. Taniguchi, "Reflective color display using Cholesteric Liquid Crystals", *SID98 (Japan)* (1998).
- [73] Y. Kawata, H. Yamaguchi, T. Yamaguchi, T. Oka, M. Mori, H. Kobayashi, N. Kamiura, T. Hioki, K. Taira, H. Okumura, M. Akiyama, K. Suzuki, "A high reflective LCD with double cholesteric LC layers", *SID97 (Japan)* (1997).
- [74] Zhijian Lu, "Reflective Cholesteric Liquid Crystal Display", Ph.D. Thesis, Kent State University (1995).
- [75] C. Bohley, T. Scharf, R. Klappert and J. Grupp, "Reflection of multi-domain structured cholesteric LC", *Proc. SPIE* **4463** (2001) 181-187.
- [76] Yang-Xiao Huang et al., "Full-color reflective cholesteric liquid crystal display", *Proc. SPIE* **3635** (1999) 120-126.
- [77] D. Davis, A. Kahn, X. Y. Huang, J. W. Doane, C. Jones, "Eight-Color High-Resolution Reflective Cholesteric LCDs", *Proc. SID Symp.* **29** (1998) 901.

Biografija



Biljana Marjanović, rođena 26. 09 1972 godine u Zrenjaninu. Osnovnu školu i prirodno-matematičku gimnaziju “Mileva Marić-Ajnštajn” završila je u Titelu. Student je PMF-a Univerziteta u Novom Sadu, odsek fizika.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Biljana Marjanović

dr Dušanka Obadović, red. prof.

Elektro-optičke ćelije sa tečnim kristalima

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2007

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

6/92/77/2/45/23/0

Fizika

Fizika tečnih kristala sa primenom

tečni kristali, elektro-optički efekti, displeji, holesteričke slojne reflektivne ćelije, feroelektrične tečno-kristalne ćelije

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Nema

Prikazane su osnovne karakteristike tečnih kristala i njihova reakcija na električno polje odnosno, elektro-optičke osobine. Dat je pregled elektro-optičkih ćelija, sa naglaskom na ćelije specijalnih karakteristika: reflektivna holesterička ćelija i brze feroelektrične ćelije (SSFL, DHF i druge). Opisan je tehnološki postupak napravljenog reflektivnog višeslojnog kolor holesteričkog displeja.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

18.04.2007

Datum odbrane:

DO

16.05.2007

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

član:

član:

dr Božidar Vujičić, red. prof.

dr Srđan Rakić, docent

dr Dušanka Obadović, red. prof.

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Biljana Marjanović

AU

Mentor/comentor:

Prof. Dr. Dušanka Obadović

MN

Title:

Electro-optical liquid crystal cells

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2007

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

6/92/77/2/45/23/0

PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Physics of liquid crystals with application

SD

Subject/ Key words:

liquid crystals, electro-optical effects, displays, cholesteric reflective stacked cells, ferroelectric liquid crystal cells

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

None

N

Abstract:

AB

The basic characteristics of liquid crystals and their reaction to applied electric field are reviewed, as well as their electro-optical effects. Electro-optical cells with liquid crystals are reviewed, with focus to the cells with special features, like: reflective cholesteric cell and different fast ferroelectric cells (SSFLC, DHF, and others). The technology flow of a realized stacked color cholesteric display is described.

Accepted by the Scientific Board:

18.04.2007

ASB

Defended on:

16.05.2007

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Prof. Dr. Božidar Vujičić

Member:

Dr. Srđan Rakić, assistant prof.

Member:

Prof. Dr. Dušanka Obadović