

Izbrana poglavja iz uporabne fizike 2006/2007

Sodobni tekočerkristalni zasloni

seminar

Matej Tekavčič

19. april 2007

1 Uvod

Namen seminarske naloge je napraviti kratek pregled sodobnih tehnologij in izboljšav na področju tekočerkristalnih zaslonov (LCD). Od svojih začetkov v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je tehnologija tekočerkristalnih prikazovalnikov napredovala do te mere, da je iz nekoč visoko tehnološke vede prešla v bolj vsakdanjo – bolj potrošniško naravnano industrijsko panogo, saj danes proizvajalci ponujajo celo vrsto prikazovalnikov za različne aplikacije, kot so računalniški monitorji, televizijski zasloni in prenosni računalniki. Brez tekočerkristalnih zaslonov bi si danes težko predstavljali marsikateri pripomoček, kot je na primer prenosni telefon ali prenosni računalnik. Tudi na področju večjih računalniških zaslonov je LCD popolnoma izpodrinil starejšo tehnologijo zaslonov na katodno cev (CRT). Toda brez izboljšav ne gre, saj tehnologija LCD že dobiva konkurente, kot so recimo plazmatski prikazovalniki in organske led diode (OLED). Uporabniki želijo vedno boljše sliko, s tehničnimi besedami povedano, želijo imeti večji kontrast, bolj izrazite barve, bolj odziven zaslon, večji zorni kot itd. . .

Zato si bomo pogledali koncepte, ki stojijo za t.i. tehničnimi specifikacijami, ki jih proizvajalci podajajo poleg njihovega izdelka. Najprej nekaj osnov LCD tehnologije, nato pa bolj podrobno posamezne izboljšave.

2 Osnove tehnologije tekočerkristalnih zaslonov

Pri razlagi osnov se bomo omejili na najbolj široko uporabljano tehnologijo tekočerkristalnih zaslonov, to so t.i. "TN-TFT" tekoče kristalni zasloni. Kratica pomeni "twisted-nematic thin film transistor", pojem pa bo bolj jasen z malo razlage.

Tekoči kristali, ki se uporabljajo so v nematski fazi. So kalamitični, torej podolgovate molekule, in termotropni, saj fazne prehode induciramo s spreminjanjem temperature. Posamezna celica s tekočimi kristali je stisnjena med dve plasti polimera, na površini katerih so z drgnjenjem napravili veliko število vporednih utorov. Molekule tekočega kristala se na površini uredijo v smeri utorov. Plasti polimerov sta si med sabo postavljeni pravokotno glede na uture. Direktorji molekul med plastmi v celici se tako uredijo v vijačnico (glej sliko 1, zato "twisted-nematic". Takoj za polimerno plastjo z utori se nahaja tanka prosojna elektroda, za njo plast stekla in nato še polarizator. Na sliki 2 lahko vidimo, da so molekule tekočega kristala glede na ravnino celice nagnjene še pod kotom α_0 , ki je ponavadi 3° .

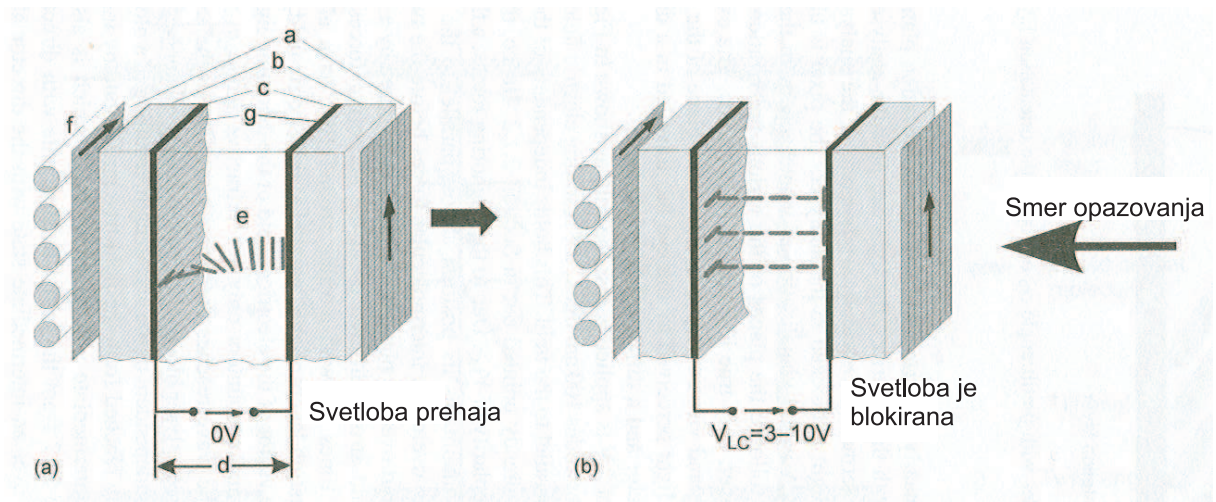
Prehod svetlobe skozi plast kontroliramo z napetostjo med elektrodama. Brez napetosti so molekule urejene v vijačnico, ki orientacijo molekule od ene plasti do druge obrne za kot $\beta_0 = 90^\circ$. Zaradi pojava dvolomnosti polarizirane svetlobe v nematični fazi tekočega kristala se vpadni žarek razcepi na redni in izredni žarek, ki skozi plast potujeta z različnima hitrostima

$$v_{\perp} = \frac{c_0}{\sqrt{n_{\perp}(\lambda)}}, \quad v_{\parallel} = \frac{c_0}{\sqrt{n_{\parallel}(\lambda)}}. \quad (1)$$

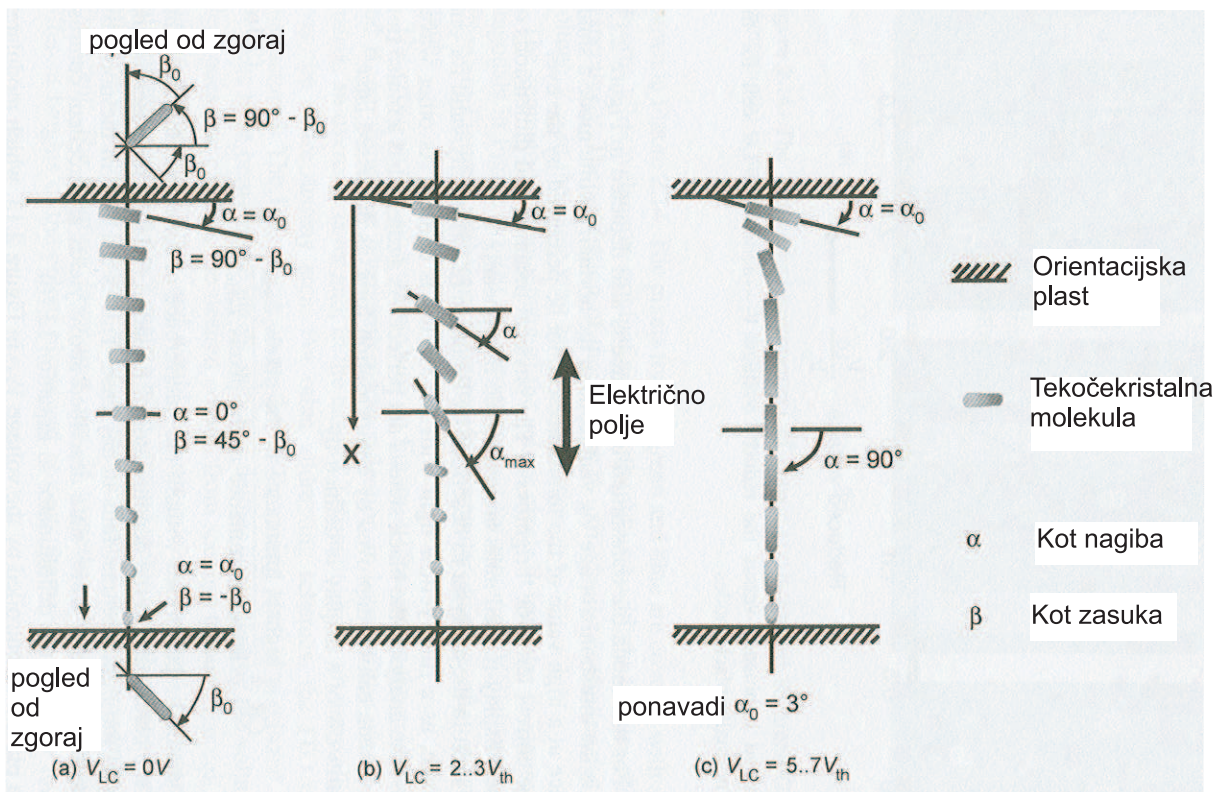
Zaradi tega dobimo eliptično polarizirano valovanje. Na sredini plasti ($d/2$) dobimo ravno krožno polarizirano valovanje (fazni zamik $\pi/4$) in če velja [1]

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\lambda}{\Delta n}, \quad \Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}, \quad (2)$$

potem je polarizacijska ravnina svetlobe, ko pride na analizator, zavrtena točno za 90° . Polarizacija svetlobe sledi orientaciji direktorja molekul v vijačnici. Če je torej analizator pravokoten na polarizator, svetloba tako lahko preide skozi celico. Temu rečemo "normalen beli način delovanja" [1]. Če analizator zasukamo za 90° , da je vzporeden polarizatorju, linearno polarizirana svetloba ne prehaja skozi celico. Temu rečemo "normalen črni način" delovanja. To velja le, če



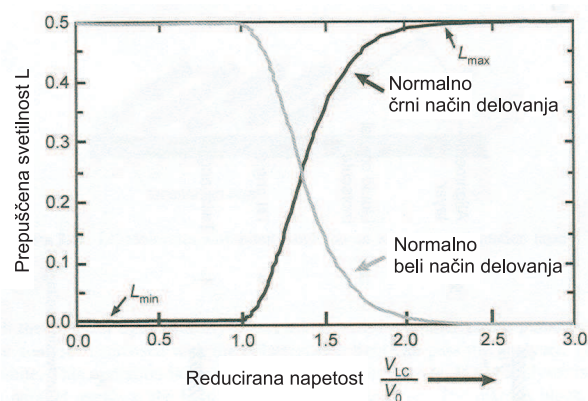
Slika 1: Struktura TN-LCD (a) medtem ko svetloba prehaja skozi celico in (b) ko je svetloba blokirana. a: polarizator; b: steklo; c: prosojna elektroda; g: orientacijska plast; e: tekoči kristal; f: osvetlitev [1]



Slika 2: Sprememba orientacije tekoče kristalnih molekul z naraščujočo napetostjo. Za premostitev medmolekulskih sil je potrebna mejna napetost V_{th} , da se molekule za"nejo vrteti. [1]

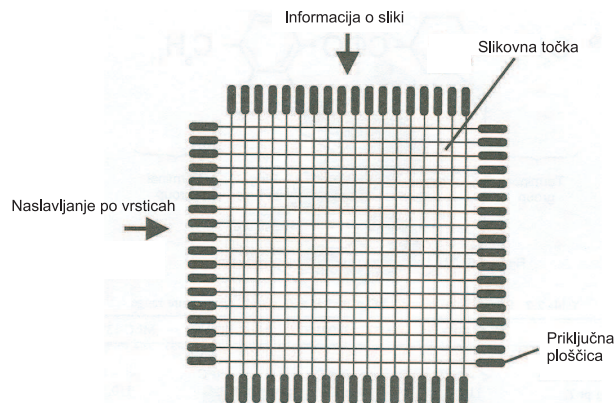
drži enačba (2), torej le če na celico gledamo pravokotno, saj v nasprotnem primeru svetloba, kot jo zaznajo oči, skozi celico prepotuje drugačno razdaljo d . Tipična debelina celic je od $d = 3.5 \mu\text{m}$ do $d = 4.5 \mu\text{m}$.

Z električnim poljem, ki ga ustvarimo z napetostjo med elektrodama, vplivamo na orientacijo molekul tekočega kristala, kar imenujemo Fréederickszov prehod, ki je reverzibilen, kar pomeni, da se ob izklopu električnega polja molekule uredijo nazaj v prvotno stanje. Potrebna je neka minimalna napetost V_{th} , ki začne obračati molekule. Da dosežemo, da se vse molekule tekočega kristala razen tistih ob plasti poravnajo v željeni smeri (slika 2), torej da se orientacija molekul iz kota $\alpha_0 = 3^\circ$ nagne v kot $\alpha = 90^\circ$, potrebujemo nekajkrat večjo napetost V_{max} , približno 10 V. V takem primeru je nihanje električnega polja vpadne svetlobe pravokotno z direktorjem molekul in ne pride do dvolomnosti, zato svetloba ostane linearno polarizirana v isti smeri kot polarizator in je pravokotni analizator ne prepušča. Prehod pri obeh načinih delovanja (normalno belem in črnem) prikazuje slika 3. Pri obeh načinih napetosti med V_{th} in V_{max} povzročijo delno prepustnost, oziroma delno neprepustnost. Sive odtenke naše celice (slikovne točke) lahko tako kontroliramo z napetostjo V_{LC} . V enačbi (2) opazimo, da celica lahko popolnoma blokira le svetlobo določene valovne dolžine, ponavadi se za meritve izbere rumena svetloba z $\lambda = 505 \text{ nm}$. Ker lahko svetloba ostalih valovnih dolžin še vedno prehaja analizator, črno stanje celice (slikovne točke) ne more biti popolno, kar močno vpliva na kontrast slike. Svetlost piksla je prav tako močno odvisna od kota, pod katerim opazujemo.

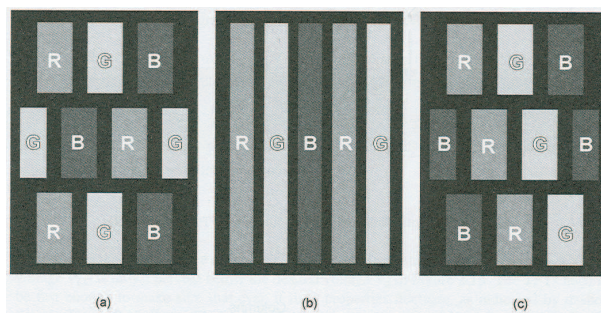


Slika 3: Prepuščena svetilnost v odvisnosti od reducirane napetosti V_{LC} za oba načina delovanja [1]

Zgoraj opisane celice povežemo v večjo mrežo, kot jo prikazuje slika (4) in tako dobimo tipičen zaslon, recimo 1024×768 pikslov. To številko za barvni zaslon pomnožimo še s 3 in takoj vidimo, da ni smiselno naslavlјati vsakega piksla posebej, kot je to rešeno pri naprimer manjših alfanumeričnih prikazovalnikih, recimo na ročnih urah. Kot je že nakazano na sliki (4), se problema lotimo matrično. Še prej si pogledjmo, kako sploh dobimo barvni zaslon. Steklена plošča, ki je obrnjena proti opazovalcu, ima nanesen pikseliziran barvni filter, torej pred vsakim pikslom imamo rdeč, zelen oziroma moder filter, ki absorbira vse valovne dolžine razen izbrane. Ker lahko kontroliramo količino prepuščene svetlobe za vsak piksel, lahko s tem kontroliramo nasičenost posamezne barve v končnem barvnem odtenku, ki ga vidi opazovalec. T.i. RGB slikovne točke so za uporabo v TV sprejemnikih, ki prikazujejo predvsem gibljive slike, razporejeni v diagonalah ali trikotnikih [(a) in (c) na sliki 5], medtem ko so pri računalniških monitorjih urejeni v pasove [(b) na sliki(5)]. Med posameznimi barvnimi slikovnimi točkami, je t.i. "črna matrika", ki preprečuje prehajanje svetlobe, ki niti ni kontrolirana preko napetosti V_{LC} (torej ne gre skozi celico) niti nima zelene barve. Taka svetloba bi še poslabšala črno stanje celice, kar bi slabo vplivalo na



Slika 4: Slikovne točke so zložene v matriko, ki je lahko aktivna ali pasivna. Ponavadi se slikovne točke naslavljajo po vrsticah. To pomeni, da je v stolpcih video informacija zapisana za celo vrstico hkrati, potem pa se spreminja v skladu z naslavljanje vrstico. [1]



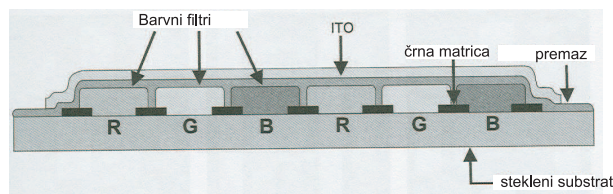
Slika 5: Geometrijska razporeditev barvnih pikslov za rdečo (R), zeleno (G) in modro (B) v (a) trikotnikih, (b) v pasovih, (c) diagonalno [1]

kontrast in nasičenost barve. Sodobna "črna matrika" je iz organskega materiala z ogljikovimi delci in ima reflektivnost le 4%. Na sliki 6 vidimo strukturo barvnega filtra v preseku. Opazimo t.i. prekrivno plast, ki izravna različne višine barvnih pikslov in jih ščiti.

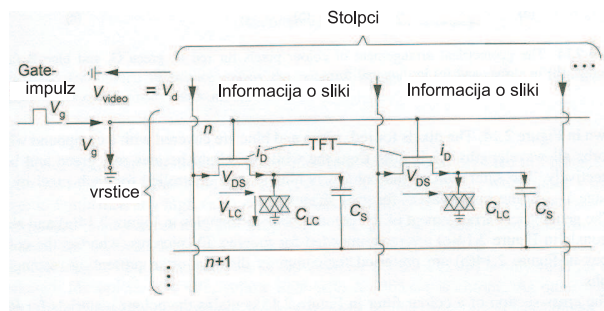
Pri modernih tekočerkristalnih zaslonih se uporablja t.i. "TFT" shema naslavljanja oziroma LCD z aktivno matriko. Kratica TFT pomeni "thin-film-transistor" in šele ta tehnologija je omogočila razvoj tekočerkristalnih zaslonov, ki lahko po odzivnosti in kontrastu konkurirajo zaslonom na katodno cev. Naslavljanje je urejeno po stolpcih in vrsticah, saj na ta način močno zmanjšamo število potrebnih priključkov. Slika 7 prikazuje shemo takega naslavljanja.

Zakaj potrebujemo tranzistor? Recimo, da ima zaslon 1024×768 pikslov. Naslavljanje poteka takole. Najprej naslavljam 1 vrstico in na priključke "video information" priključimo potrebnih 768 napetosti v stolpce, odvisno od tega, katere slikovne točke v prvi vrstici so prižgane. Nato naslovimo drugo vrstico z drugimi 768 napetostmi. Medtem v prvi vrstici nimamo ničesar, recimo, da so takrat vse slikovne točke takrat bele. Torej je posamezna slikovna točka v vrstici pod napetostjo, in recimo ne prepušča svetlobe, le $1/768$ cikla, v katerem se zapiše slika, ves ostali čas pa ne kaže prave slike. Zaradi tega se zelo poslabša kontrast. Vsaki celici tako dodamo še tranzistor (TFT) in tankoplastni kondenzator (slika 7), ki skupaj delujeta kot spominska celica (zelo podobno kot tehnologija DRAM), ki ohranja napetost v celici torej slikovni točki do naslednjega cikla, ko se vanj zapiše nova informacija.

Elektronika, ki naslavlja slikovne točke, mora napolniti N vrstic torej kondenzatorjev C_s



Slika 6: Presek barvnega filtra pri TFT-LCD [1]



Slika 7: TFT naslavljanje pikslov v n-ti vrstici [1]

in C_{LC} v danem časovnem okvirju T_f , v katerem se zapiše slika, recimo šestdesetkrat krat na sekundo. Definiramo lahko vrstični čas [1]

$$T_r = \frac{T_f}{N}. \quad (3)$$

Časovni potek napetosti na slikovni točki (V_{LC}) prikazuje slika 8. V času T_r se kondenzatorja C_{LC} in C_s polnita s časovno konstanto, katere tipična vrednost je [1]

$$T_{on} = (C_{LC} + C_s)R_{on} \leq 0.1T_r = 0.1\frac{T_f}{N}, \quad (4)$$

kjer je R_{on} upornost TFT, ko prevaja). Neenačba zagotavlja, da je ob času T_r napetost na celici le za 1% različna od napetosti, ki smo jo želeli zapisati (V_d). Po času T_r je tranzistor zaprt, vendar ima še vedno neko končno upornost R_{off} . Praznjenje kondenzatorjev mora biti med časom T_f dovolj majhno, da omogoča čim bolj konstantno svetilnost piksla. Kondenzatorja se praznita s časovno konstanto s tipično vrednostjo [1]

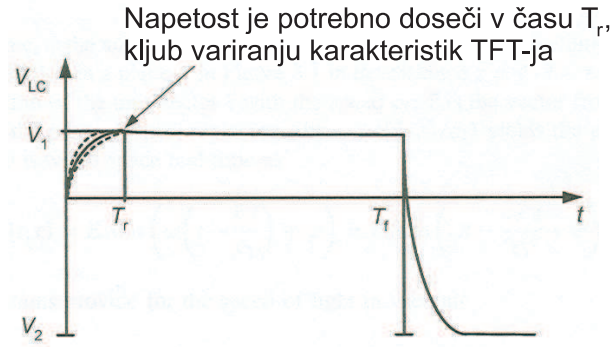
$$T_{off} = (C_{LC} + C_s)R_{off} \geq 200T_f, \quad (5)$$

kar zagotavlja, da je padec napetosti ob času T_f le 1%. Lahko zapišemo tudi razmerje

$$\frac{R_{off}}{R_{on}} = \frac{I_{on}}{I_{off}} \geq 2000 N, \quad (6)$$

kar recimo za zaslon z $N = 484$ praktično pomeni tokova $I_{off} = 1$ pA in $I_{on} \geq 1$ μ A. [1]

Napetost, s katero kontroliramo piksle, mora biti izmenična, da se izognemo disociaciji sestavin tekočerkristalne celice. Predznak napetosti ne vpliva na delovanje TN tekočega kristala. Kar se prevajanja svetlobe tiče sta zanj kota 90° in -90° popolnoma enaka. S tem podaljšamo življensko dobo zaslona. Predznak napetosti V_{LC} lahko spreminjamo v vsaki vrstici, vsakem stolpcu, vsakem ciklu oz. s kombinacijo vsega naštetega.



Slika 8: Oblika napetosti na pikslu med polnjenjem in praznjenjem pomnilniškega kondenzatorja. Napetosti V_1 in V_2 ustrezata zelenemu odtenku sive torej zeleni svetilnosti slikovne točke. [1]

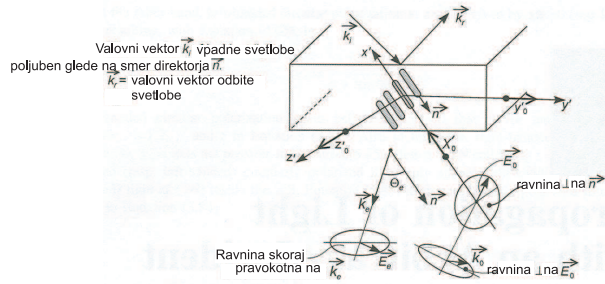
3 Izboljšanje zornega kota in kontrasta

3.1 Poljuben vpadni kot svetlobe

Poglejmo sedaj, kako se svetloba razširja skozi tekočerkristalno celico, če vpada pod poljubnim kotom. Vpeljimo kot Θ_e med orientacijskim direktorjem molekul \mathbf{n} in valovnim vektorjem izrednega žarka \mathbf{k}_e (slika 9). Zapišimo dielektrični tenzor

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{y'} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{x'}^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_{y'}^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_{z'}^2 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Os x' je vzporedna z \mathbf{n} in lahko zapišemo



Slika 9: Smeri in polarizaciji rednega (\mathbf{k}_0 in \mathbf{E}_0) in izrednega (\mathbf{k}_e in \mathbf{E}_e) žarka [1]

$$\varepsilon_{x'} = \varepsilon_{\parallel}, \quad \varepsilon_{y'} = \varepsilon_{z'} = \varepsilon_{\perp} \quad (8)$$

in

$$n_{x'} = n_{\parallel} = n_e, \quad n_{y'} = n_{z'} = n_{\perp} = n_o. \quad (9)$$

Ker sta dva lomna količnika enaka, imamo enoosni sistem.

Na tekočerkristalno celico vpadne svetloba z valovnim vektorjem \mathbf{k}_i . Del se ga odbije kot svetloba z valovnim vektorjem \mathbf{k}_r , del pa lomi kot izredni (\mathbf{k}_e) in redni žarek (\mathbf{k}_0) skozi tekočerkristalno celico. Zapišimo električno in magnetno polje

$$\mathbf{E} = E \exp(i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})), \quad \mathbf{H} = H \exp(i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})). \quad (10)$$

Z upoštevanjem Maxwellovih enačb pridemo do izrazov

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu \mathbf{H} \quad (11)$$

in

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = \omega \varepsilon \mathbf{E} = -\omega \mathbf{D}. \quad (12)$$

Ko vstavimo \mathbf{H} iz enačbe (11) v enačbo (12), dobimo

$$\mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{E}) + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} = 0. \quad (13)$$

Računanje glavnih osi x' , y' in z' z upoštevanjem enačbe (7) za ε po daljšem računu [1] privede do enačbe

$$\left(\frac{k^2}{n_0^2} - k_{\text{vac}}^2 \right) \left(\frac{k_{y'}^2 + k_{z'}^2}{n_e^2} + \frac{k_{x'}^2}{n_0^2} - k_{\text{vac}}^2 \right) = 0, \quad (14)$$

kjer sta

$$k^2 = k_{x'}^2 + k_{y'}^2 + k_{z'}^2 \quad \text{in} \quad k_{\text{vac}} = \left(\frac{\omega}{c_0} \right). \quad (15)$$

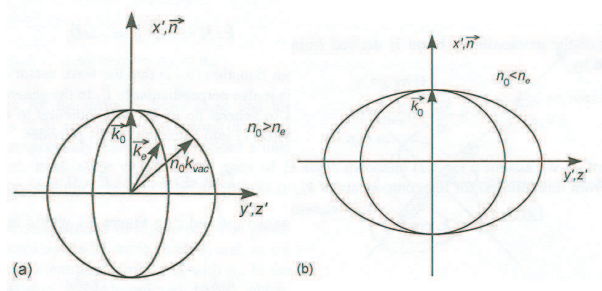
Enačba ima dve rešitvi. Prva je rešitev za redni žarek

$$k^2 = n_0^2 k_{\text{vac}}^2 = k_0^2 = k_{0x'}^2 + k_{0y'}^2 + k_{0z'}^2, \quad (16)$$

kar opisuje sfero z radijem $n_0 k_{\text{vac}}$. Druga rešitev (izredni žarek)

$$\frac{k_{ey'}^2 + k_{ez'}^2}{n_e^2} + \frac{k_{ex'}^2}{n_0^2} = k_{\text{vac}}^2 \quad (17)$$

opisuje elipsoid (slika 10).



Slika 10: Sfera k_0 in elipsoid k_e za (a) $n_0 > n_e$ in (b) $n_0 < n_e$ (večina uporabljanih snovi za tekočokristalne celice)

Vpeljimo sedaj efektivni lomni količnik

$$n_f = \frac{k_e}{k_{\text{vac}}}, \quad (18)$$

kjer je $k_e = k_{ex'}x'_0 + k_{ey'}y'_0 + k_{ez'}z'_0$. S pomočjo kota Θ_e lahko komponente izrednega lomnega količnika zapišemo kot

$$k_{ex'} = k_e \cos \Theta_e, \quad k_{ey'}^2 + k_{ez'}^2 = k_e^2 \sin^2 \Theta_e. \quad (19)$$

Iz enačb (18), (17) in 19 izpeljemo [1]

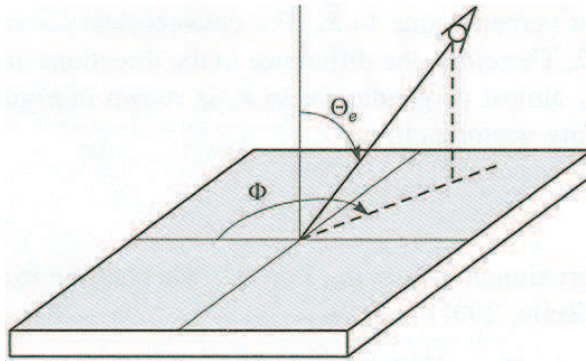
$$n_f = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_0^2 \sin^2 \Theta_e + n_e^2 \cos^2 \Theta_e}} . \quad (20)$$

S pomočjo efektivnega lomnega količnika poenostavimo opis propagiranja svetlobe pod kotom Θ_e na direktor \mathbf{n} v anizotropnem mediju. Kontrast je največji, kadar je $n_f = n_0$, kar je res pri kotu $\Theta_e = 0$.

Poljubno smer opazovanja celice opišemo z azimutnim kotom ϕ in kotom Θ_e (slika 11). Ponavadi se z večanjem kota Θ_e slika slabša. Zmanjšuje se kontrast, pride do pojava inverzije svin in do sprememb v nasičenju barve pri večjih kotih ϕ . Kontrast je definiran kot razmerje med največjo svetilnostjo slikovne točke (bela) in najmanjšo svetilnostjo slikovne točke (črna)

$$CR = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} . \quad (21)$$

Meja sprejemljivosti kontrasta je 10:1, odvisnost od obeh kotov pa prikazuje slika 12. Do pojava inverzije svin pride, kadar je nižji nivo svetilnosti (g8) bolj svetel od višjega nivoja (g7), kakor je prikazano na sliki 13.



Slika 11: Kota ϕ in Θ_e , ki ju uporabljamo pri opisu odvisnosti kontrasta od smeri opazovanja [1]

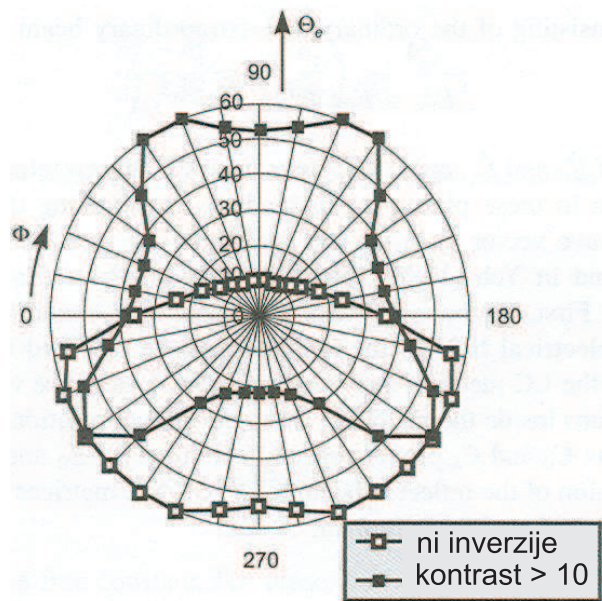
3.2 Optične kompenzacijske folije

Ključna stvar za izboljšanje zornega kota je izboljšanje črnega stanja slikovne točke. Pri TN celici z vertikalno urejenimi molekulami (glej slika 1b), to je s prekrižanima polarizatorjema v normalnem belem načinu delovanja ob prižganem polju, imamo v celici odlično črno stanje, neodvisno od λ in d , le če opazujemo pravokotno na celico. Kadar opazujemo pod poljubnim kotom $\Theta_e \neq 0$ (slika 14) lahko s pomočjo efektivnega lomnega količnika iz enačbe (20) optično poslabšanje definiramo kot

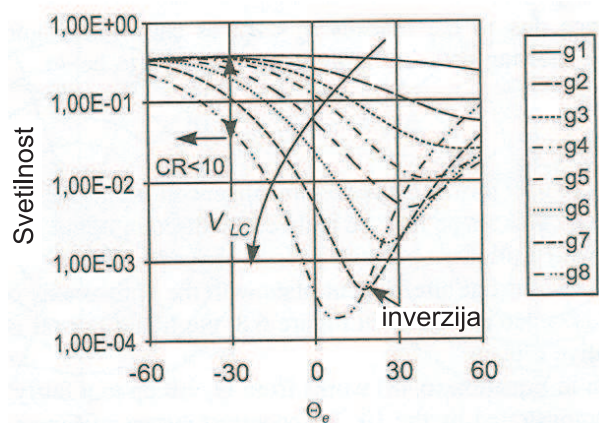
$$\Delta n_f d_0 = (n_f(\Theta_e) - n_0) d_0 \neq 0 , \quad (22)$$

kjer je d_0 efektivna debelina celice, označena na sliki 14. Ker optično poslabšanje ni enako 0, opazovalec pod kotom Θ_e ne vidi popolnega črnega stanja, saj nekaj svetlobe uide skozi celico. Uhajanje lahko omejimo s tem, da v enačbo (22) nekako dodamo negativno optično poslabšanje. To dosežemo s folijo, ki ima negativno dvolomnost ($n'_e < n'_0$), kot to prikazuje slika 15. Celotno optično poslabšanje je tako

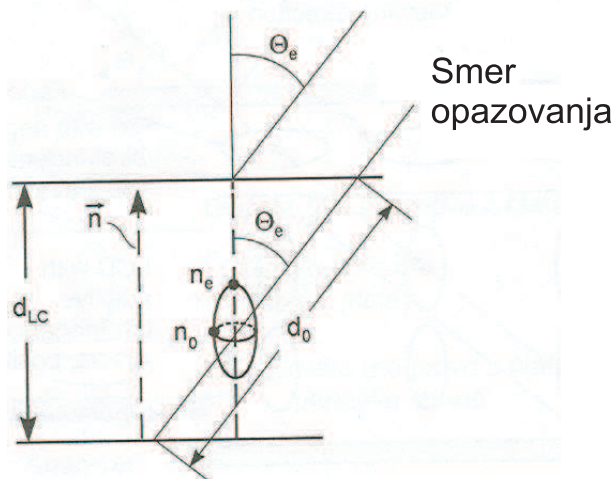
$$\Delta n_f d_0 + \Delta n'_f d'_0 \approx 0 , \quad (23)$$



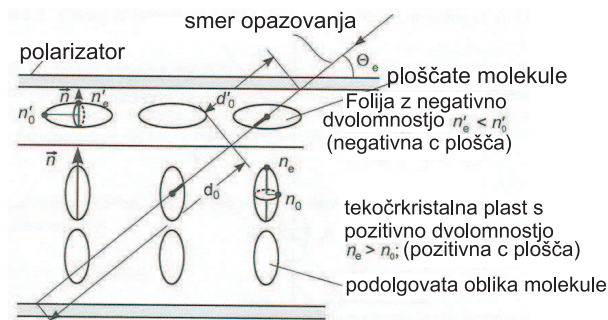
Slika 12: Krivulji sprejemljivega kontrasta in meje inverzije sivin za tipičen LCD [1]



Slika 13: Inverzija sivin za tipičen LCD. Do inverzije pride pri tistih kotih, kjer je nižji nivo svetilnosti (g8) nad višjim nivojem (g7) glede na napetost V_{LC} na slikovni točki [1]



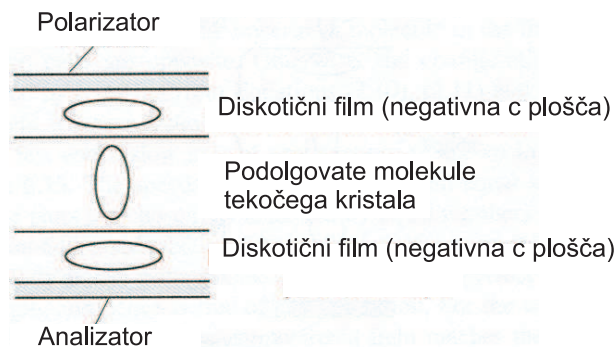
Slika 14: Količine pri opisu poslabšanja slike za poljuben kot $\Theta_e \neq 0$ [1]



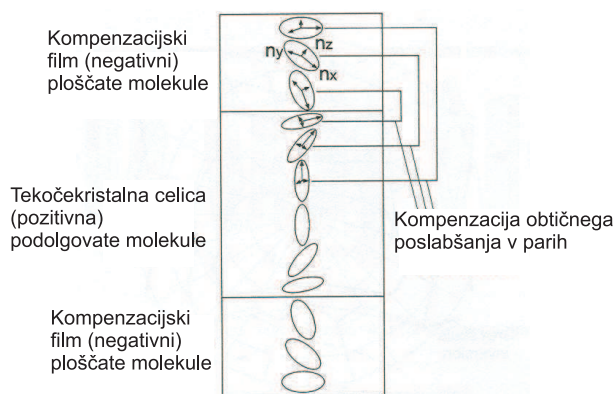
Slika 15: Kompenzacija optičnega poslabšanja z negativno c ploščvijo [1]

kjer je $\Delta n'_f = n'_f(\Theta_e) - n'_o < 0$ za negativno dvolomnost folije. Molekule tekočerkristalnih molekul v foliji so diskotične, kar izhaja iz diskaste oblike molekul, zato takim folijam pravimo tudi "diskotične folije"[1]. Homogeni enoosni dvolomni plošči z optično osjo pravokotno površini rečemo c plošča, v našem primeru negativna c plošča zaradi negativne dvolomnosti. Opisana kompenzacija deluje v območju od $\Theta_e = 0^\circ$ do okoli $\Theta_e = 60^\circ$. Boljšo simetrijo gledanja z leve in desne dosežemo s tem da diskotično folijo razdelimo na pol in jo postavimo pred in za tekočerkristalno celico, kot je prikazano na sliki 16.

Očiten problem pri taki vrsti kompenzacije je, da je osnovan na tem, da so vse tekočerkristalne molekule urejene vertikalno, kar pa že s slike 1 in slike 2 vidno ne drži. Molekule, ki so blizu orientacijski polimerni plošči, ostanejo urejene v skladu z utorji na polimerni plasti. Prav tako so s plastjo očitno vzporedne molekule v kompenzacijski plasti. Zato na vsako stran tekočerkristalne celice dodajo še t.i. negativno a plast, ki ima optično os vzporedno s površino plasti. Molekule so podobno vertikalno urejene kot tiste v tekočerkristalni plasti. Vendar tudi na tak način ne moremo kompenzirati poljubno orientiranih molekul. Potrebujemo negativno dvolomno plast z optično osjo, ki je vzporedna poljubni osi molekul. Taki homogeni plošči rečemo negativna o plošča. Na vsako stran tekočerkristalne plasti dodajo diskotični film z negativno dvolomnostjo, katerega molekule imajo podobno konfiguracijo kot molekule v tekočerkristalni plasti. Konfiguracijo prikazuje slika 17. Molekule se kompenzirajo v parih in če bi imeli točno enako število molekul v tekočerkristalni plasti in obeh diskotičnih plasteh, bi imeli popolno kompenzacijo. Pon-



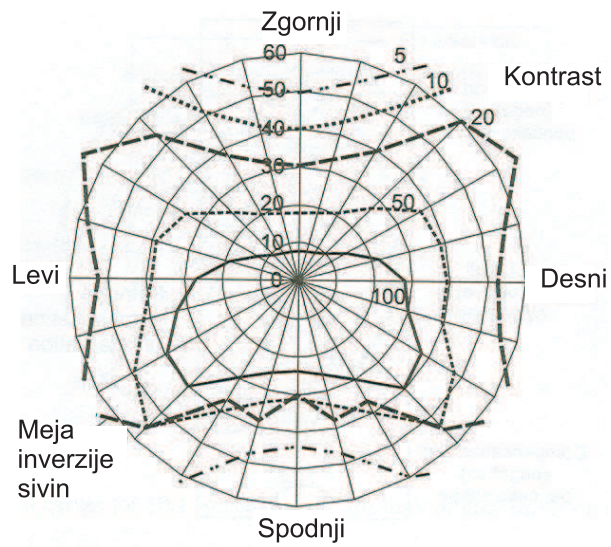
Slika 16: Kompenzacijsko folijo razdelimo na pol [1]



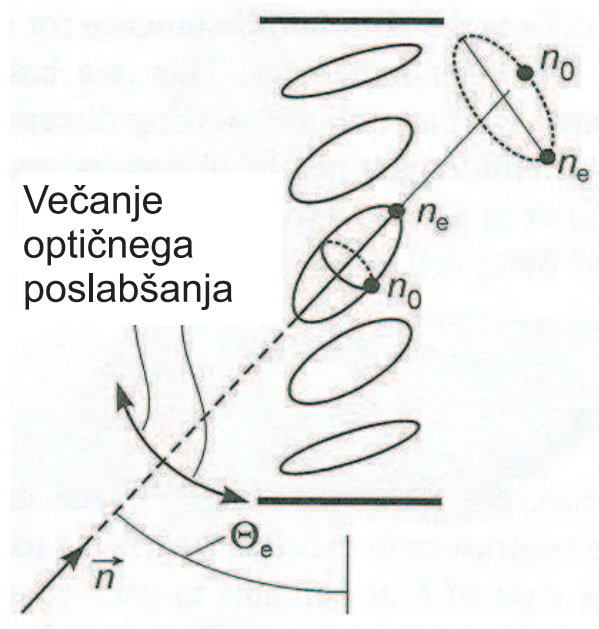
Slika 17: Parna kompenzacija optičnega poslabšanja tekočekristalnega zaslona z diskotičnima plastema z enakima smerima optičnih osi [1]

avadi pa je število molekul v diskotičnem filmu manjše, a kompenzacija je še vedno dovolj dobra, le izgube v plasteh malo potemnijo sliko. Rezultat take kompenzacije prikazuje slika 18.

Na sliki 13 opazimo, da ima svetilnost pod določenimi koti minimum, ki se z večanjem napetosti V_{LC} pomika proti manjšim kotom Θ_e . Cilj kompenziranja inverzije svin je premakniti ta minimum čim bolj izven običajnega opazovalnega kota, recimo več kot 60° . Poglejmo si sliko molekul v TN celici (slika 19). Z večanjem napetosti na celici V_{LC} se kot nagnjenosti sredinske molekule Θ_e vse bolj zmanjšuje. Optično poslabšanje je najmanjše za opazovanje vzdolž direktorja sredinske molekule, ker tam električno polje predvsem upošteva redni lomni količnik $n_0 < n_e$. Zaradi tega se polarizacija le malo zasuka, kar ima za posledico da prekrižana polarizatorja prepustita le majhen del svetlobe. Optično poslabšanje se večja levo in desno od smeri direktorja \mathbf{n} , kot prikazuje slika 19, torej se večja tudi prepuščena svetilnost. Najnižje optično poslabšanje kompenziramo z dodajanjem pozitivne dvolomnosti (pozitivna o plošča), kot je na sliki 19 prikazano s črkanimi črtami. Paziti moramo le, da ne poslabšamo preveč opazovanja pod kotom $\Theta_e = 0$. S tako kompenzacijo naj bi premaknili minimum izven kota opazovanja za večino praktično uporabnih primerov. Taka kompenzacija pa ni najbolj enostavna. Namesto tega bi raje uporabili celice, ki takega minimuma nimajo.



Slika 18: Kontrast in meja inverzije sivin po parni kompenzaciji prikazani na sliki 17 [1]

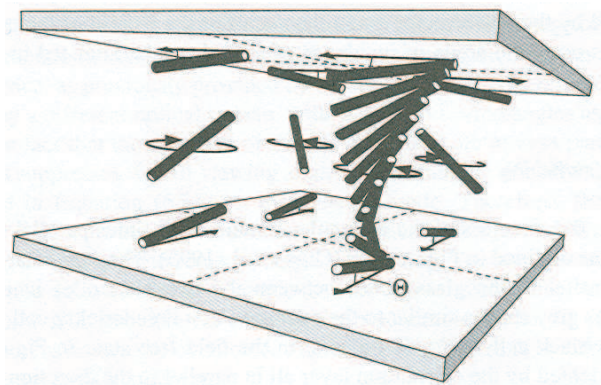


Slika 19: Opazovalna smer, pri kateri dobimo minimum svetilnosti, ki ga hočemo s kompenzacijo premakniti izven meja praktične uporabe, recimo več kot 60° . Bolje je, če uporabimo drugo vrsto celice, ki takega minimuma nima.

3.3 Večdomenske svetlobne točke

Tehnologija večdomenskih svetlobnih točk je na tržišču poznana pod kraticami MVA, P-MVA, PVA in S-PVA. V osnovi so to zasloni višje kakovosti kot običajni TN zasloni in so zato dražji. Ponujajo boljši zorni kot v vseh smereh na račun malo slabšega odzivnega časa.

Gre za to, da osnovno TN-celico sestavimo iz štirih domen. Namen tega pa je, da se znebimo minimuma svetilnosti, kot je opisan v prejšnjem podpoglavju. Tako celico prikazuje slika 20. Štiri domene pomenijo štiri različne vijačnice z različnimi koti površinske nagnjenosti (α_0) in različno smerjo vrtenja direktorja molekule. Pri eni vijačnici v določeni smeri opazovanja spet pride do minimuma v skladu z nagnjenostjo sredinske molekule, vendar pri istem kotu do tega ne pride pri ostalih treh. Piksel v celoti torej ne generira minimuma svetilnosti. Zaradi tega se dejanski kot minimuma premakne k mnogo večjim Θ_e , s čemer se izognemo inverziji sivin in imamo na splošno večji zorni kot. Uporaba več kot štirih domen se ni izkazala za bistveno boljšo.



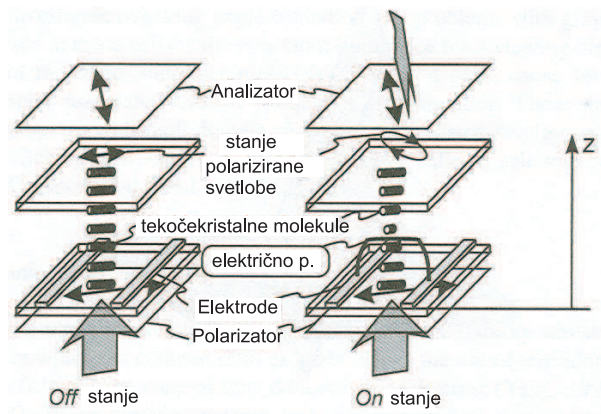
Slika 20: Večdomenska svetlobna točka s štirimi domenami ki jih sestavljajo različne vijačnice. [1]

3.4 Tehnologija IPS

Tehnologija zaslonov IPS na tržišču velja za najelitnejšo, zasloni te vrste so najkakovostnejši in najdražji. Kratice, ki se uporabljajo, so S-IPS, AS-IPS in A-TW-IPS, kjer IPS pomeni "in-plane switching". Pri dosedaj obravnavani TN celici se molekule tekočega kristala z večanjem napetosti V_{LC} vedno bolj nagibajo proti vertikali, večja se kot nagnjenosti (α_0). Pri načinu IPS pa se uporablja celica drugačne vrste, pri kateri so molekule vseskozi vzporedne s površino, kot to prikazuje slika 21. Molekule obračamo z vzporednima elektrodama. Ta rotacija kontrolira prepuščeno svetlobo in s tem generira zeleno sivino. Delovanje je podobno t.i. Fréederickszovi celici, katere opis najdemo v literaturi [1].

Celica z normalnim črnim načinom deluje takole. Kadar med elektrodama ni napetosti, so tekočerkristalne molekule urejene v skladu z orientacijsko plastjo in je direktor povsod vzporeden s polarizatorjem. Dvolomnosti ni, torej se polarizacija svetlobe do analizatorja ne spremeni in je torej prekrizan analizator ne prepusti. Če imamo napetost med elektrodama, se skušajo molekule zasukati tako, da so čim bolj vzporedne z električnim poljem. Ker so molekule pritrjene na orientacijsko plast, dobimo med molekulami kot zasuka, odvisen od razdalje od orientacijske ploskve. Pri zelo velikih poljih se skoraj vse molekule zasukajo vzporedno s poljem. Za tako konfiguracijo po daljšem računu [1] dobimo transmitivnost T analizatorja

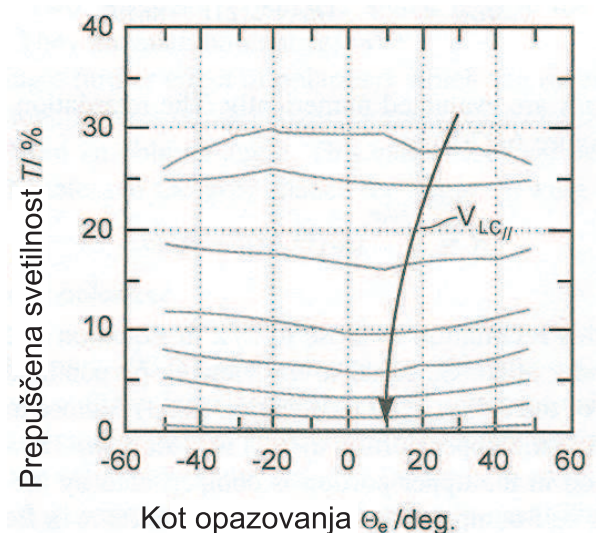
$$T = \frac{1}{2} \sin 2\beta \sin^2 \gamma, \quad (24)$$



Slika 21: Princip delovanja IPS celice. Molekule se vrtijo v ravnini, za kar poskrbita elektrodi, ki ustvarjata električno polje v ravnini direktorja molekul. Slika prikazuje normalno črni način delovanja [1]

z poslabšanjem $\gamma = (2\pi/\lambda)\Delta nd$ in kotom zasuka molekul β v stanju brez električnega polja. Maksimum transmitivnost ($T = 1/2$) doseže pri $\gamma = \pi/2$ in $\beta = \pi/4$. Če v stanju brez električnega polja nimamo zasuka molekul ($\beta = 0$), je transmitivnost 0. Vzporedna polarizatorja nam določata normalen beli način delovanja, torej je takrat v stanju brez električnega polja celica prepustna.

Za sukanje molekul v ravnini potrebujemo večji navor, kot če jih vrtimo izven ravnine zaslona, ker so medmolekulske sile v takem primeru večje. Zaradi tega se poveča odzivni čas (60 ms pri $V_{LC} = 7$ V), ki pa ga je proizvajalcem z različnimi metodami predvsem s t.i. "overdrivom", ki je opisan kasneje, uspelo zelo izboljšati. Tehnologija celic IPS ponuja najboljši vizualni rezultat, ki je trenutno na voljo na tržišču, kot je razvidno iz slike 22, ki prikazuje odvisnost prepuščene svetilnosti od kota opazovanja Θ_e . Minimumov, kakršne smo imeli pri TN celici (slika 13), ni več. Nimamo več inverzije sivin.



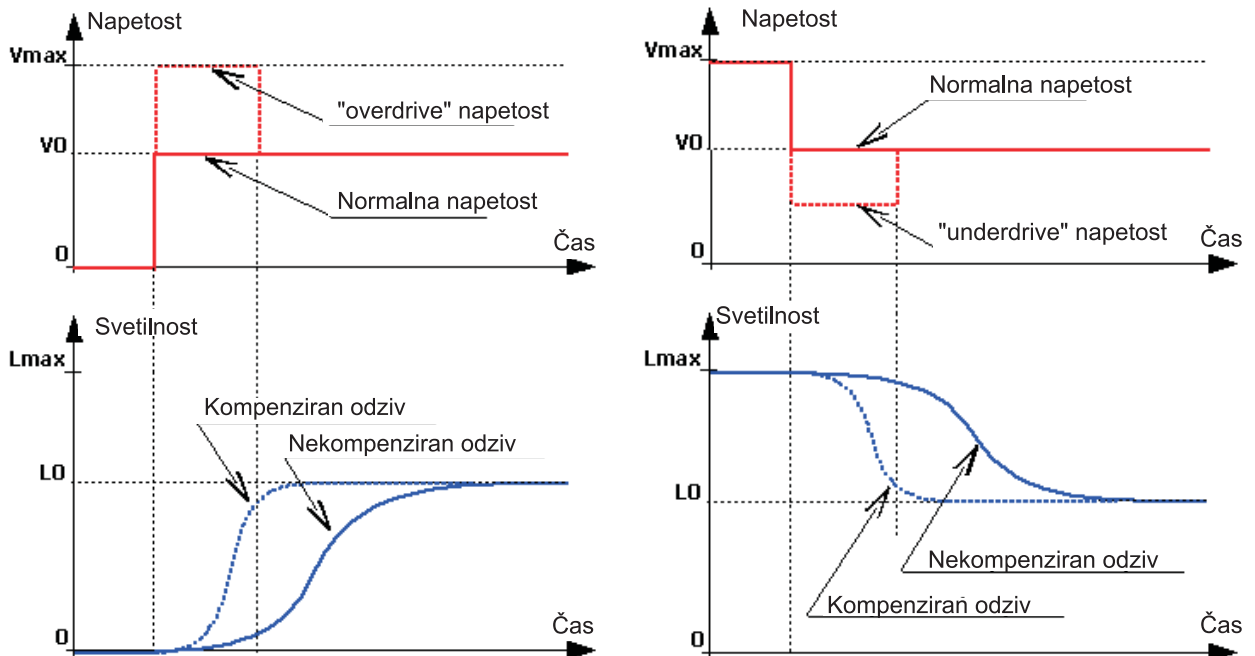
Slika 22: Prepuščena svetilnost za različne odtenke sive v odvisnosti od kota Θ_e pri IPS zaslonu [1]

4 Druge kompenzacije

4.1 Kompenzacija odzivnega časa

Glavni problem premajhnega odzivnega časa so t.i. duhci in zamegljevanje (slika25), ki še posebej pride do izraza pri hitro gibljivih slikah (filmi, računalniške igre), zato je bil odzivni čas dolgo časa najbolj pomemben faktor pri kupcih, zato so ga proizvajalci uspeli močno znižati. Do efekta duhcev pride takrat, kadar se pri hitro spreminjajočih video informacijah npr. pri animaciji slikovne točke ne zmorejo prilagajati novim stanjem dovolj hitro. Posledica, ki jo prikazuje slika 25, je, da na zaslonu pri npr. animaciji vidimo obrise starih stanj (ang. "frame") premikajočega objekta. Najprej omenimo, da večkrat pride do (namernega) zamenjevanja dveh odzivnih časov. To sta t.i. "black-to-black" in "grey-to-grey" odzivna časa. Za kaj gre? Odzivni čas "black-to-black" je določen z merjenjem časa, ki ga porabi, da celica preide iz črnega v belo in spet nazaj v črno stanje. Ta čas je praviloma veliko hitrejši od "gray-to-gray" časa, ki ga celica porabi, da pride iz odtenka sive barve v neko drugo stanje in nato spet nazaj v isti odtenek sive. Pri "black-to-black" odzivnem času je celica pod maksimalno napetostjo V_{LC}^{max} , zato se molekule tekočega kristala urejajo malo hitreje, kot če želimo neki sivi odtenek, pri katerem imamo neko manjšo napetost V_{LC} . To je tudi osnovna ideja, ki stoji za t.i. "overdrive" tehnologijo.

Princip tehnologije "overdrive", ki se ji reče tudi kompenziranje odzivnega časa, je, da z preveliko napetostjo motiviramo hitrejšo orientacijo molekul tekočega kristala. Dogajanje prikazuje slika 23. Recimo, da želimo iz črnega stanja priti na neko svetilnost L_0 in je za to potrebna napetost V_0 . Namesto da bi med elektrode poslali napetost V_0 , elektrodi nabijemo kar z maksimalno možno napetostjo V_{max} in v nekem trenutku napetost spet spustimo na V_0 . Podobno lahko iz belega stanja pridemo na neko nižjo svetilnost, kot je prikazano na sliki 23, le da temu rečemo "underdrive".

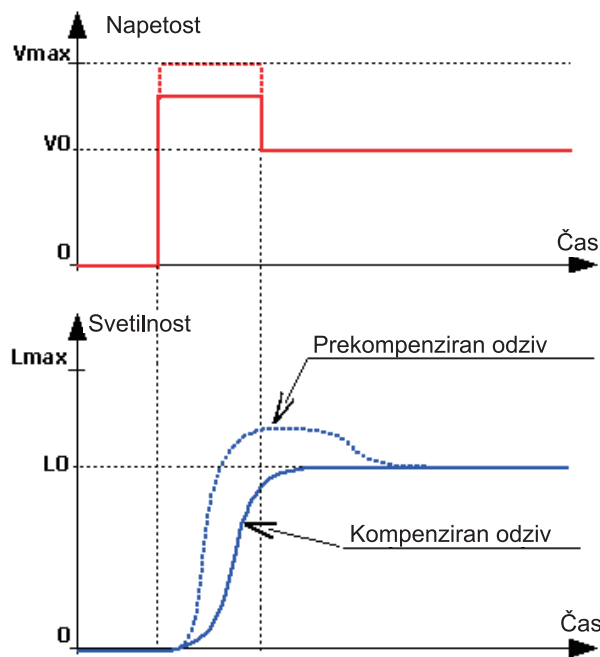


Slika 23: Kompenzacija odzivnega časa s tehnologijama "overdrive" in "underdrive" [2]

Elektronika, ki nadzoruje kompenzacijo, ne more vedno kompenzirati z maksimalno napetostjo prižgano za enak čas. Čas kompenzacije je odvisen od stanja v katerem slikovna točka je in od stanja v katerega hočemo slikovno točko spremeniti. V ta namen služi poseben pomnilnik, ki

shrani prejšno sliko in jo primerja s sliko, ki jo želi zapisati in temu primerno slikovno točko za točko prilagaja kompenzacijo. Nemogoče je doseči popolno natančnost kompenzacije in proizvajalci tu sledijo načelu, da s cenami novih izboljšanih produktov ni dobro pretiravati, čemur primerna je tudi kvaliteta kompenzacije.

Kompenzacija je torej lahko prenizka ali pa previsoka. V slednjem primeru (slika 24) dobimo ojačitev efekta duhcev v primerjavi z popolno kompenzacijo, ki je vseeno mnogo manjši kot pri zaslonih brez kompenzacije odzivnega časa. Opazimo pa lahko novo vrsto težav, na zaslonu se pojavljajo črte, ki so svetlejšje od premikajočega objekta in ozadja. Problem prikazuje slika 25, zgoraj (a) je posnetek z zaslona brez kompenzacije in je lepo viden efekt duhcev, spodaj (b) pa vidimo napake, ki se pojavijo pri kompenzaciji. Treba je povedati, da sta odzivni čas, ki ga dosežemo pri taki kompenzaciji, in opazljivost napak obratno sorazmerna, zato bo zaslon z noro hitrim odzivnim časom verjetno imel precej takih napak, ki jih proizvajalci v svojih specifikacijah seveda ne bodo omenili.

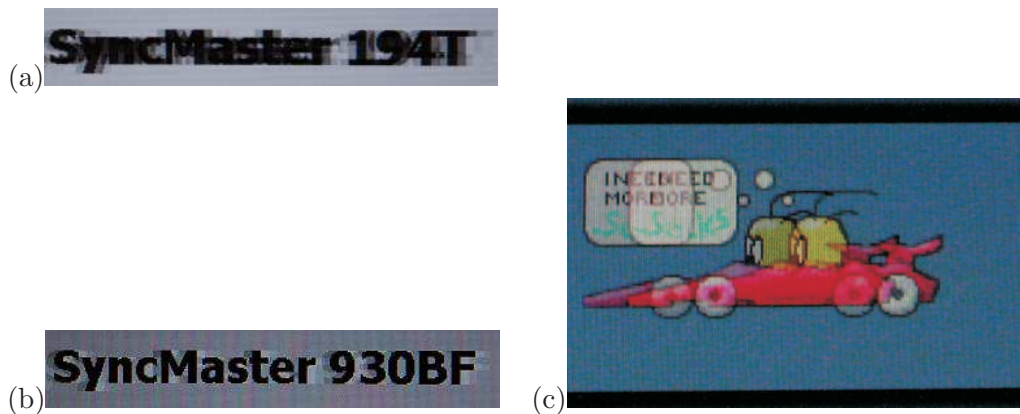


Slika 24: Prekompensiran odziv tekočerkristalne celice [2]

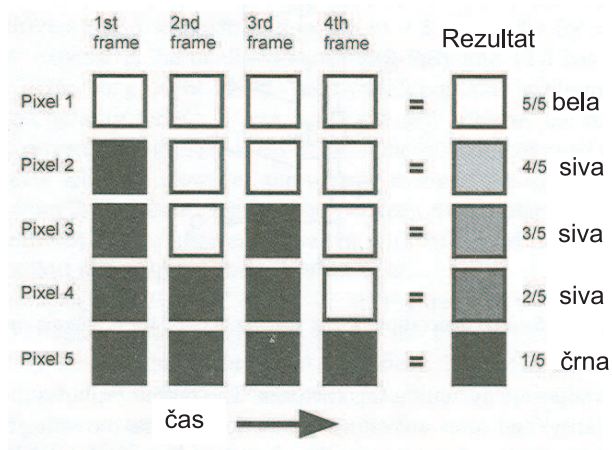
4.2 Barvni triki

Kot je znano, dobimo barvni zaslon s tem, da je vsaka slikovna točka sestavljena iz treh podtočk, pred katerimi je ustrezen barvni filter. Vsaka osembitna slikovna podtočka naj bi bila sposobna prikazati dvesto šestinpedeset različnih jakosti svetilnosti, kar se čez barvni filter prevede na nasičenost posameznega barvnega kanala, skupaj pa prinesejo preko 16.7 milijonov barvnih odtenkov. Toda če je maksimalna napetost na celici recimo 8 V [1] potem en odtenek od dvestošestpedesetih definira skok 31 mV, za kar je potrebna zelo dobra natančnost analogno-digitalnega pretvornika, kar se pozna na ceni. Velikokrat se predvsem pri cenejših TN zaslonih zato uporablja kar šestbitni sistem, torej štiriinšestdeset jakosti na barvni kanal, kar prinese le 262.000 barv. Na kanal manjkajo štirje odtenki. Razlika je opazna s prostim očesom, zato preostanek barv kompenzirajo. Uporabljata se predvsem dve tehnologiji.

Prva je tehnologija FRC oziroma "frame-rate-control". Delovanje nazorno prikazuje slika 26. V časovni okvir, v katerem je normalno prikazana le ena slika, sedaj stlačimo štiri slike z



Slika 25: Napake zaradi dostopnega časa (a), zaradi prekompenziranja (b) [2] in efekt duhcev (c) [3]



Slika 26: Generiranje svin s tehnologijo FRC [1]

različnimi stanji slikovne točke. Dobimo nekakšno časovno povprečje stanj in tako želeni odtenek. S štirimi različnimi stanji slikovne točke tako dobimo ravno mankaajoče odtenke, vendar slikovne točke zaradi tega malo utripajo – predvsem pri temnejših odtenkih.

Drug način je t.i. prostorsko niansiranje (ang. špatial dithering”). To pomeni, da s slikovnimi točkami ustvarjamo vzorce (šahovnice), ki dajejo vtis želenega mankaajočega odtenka. Torej ”naravno” lahko prikažemo le vsak četrti odtenek od dvestošestpedesetih za posamezen barvni kanal, vmesne pa generiramo s kombinacijo. Na sliki 27 lahko vidimo pretiran prikaz. Prostorsko vzorčenje je moteče predvsem pri temnejših barvah.

Oba načina sta v uporabi predvsem pri cenejših zaslonih, pri dražjih IPS zaslonih pa tega ni zaslediti.



Slika 27: Prostorsko niansiranje. Vsak kvadrateg predstavlja povečano slikovno točko zaslona TFT. Kontrast na sliki je namenoma pretiran za lažje razumevanje. V resnici sta si sosednja odtenka sive precej bolj podobna in vzorce mnogo težje opazimo. [4]

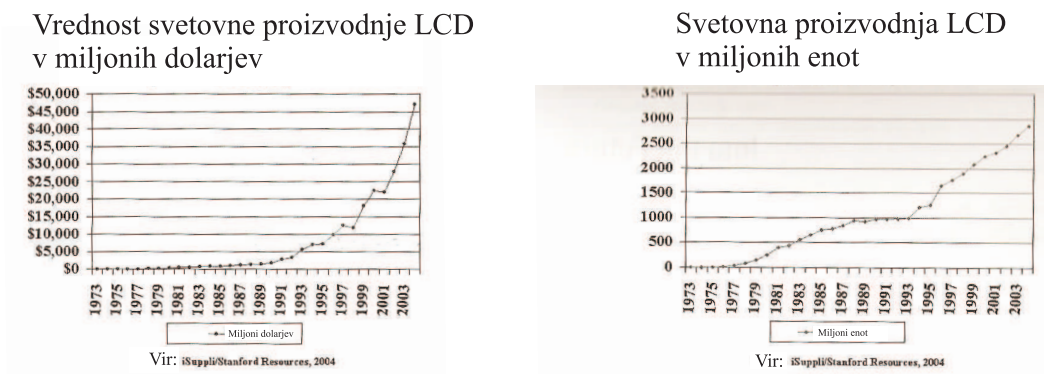
5 Primerjave

Industrijska panoga proizvodnje tekoče kristalnih zaslonov je v strmem porastu. Leta 2003 je bilo proizvedenih preko 2.67 milijard različnih tipov tekočokristalnih prikazovalnikov v skupni vrednosti 35.6 milijard dolarjev [5], številke pa so glede na trend iz grafov na sliki 28 danes še večje. Naslednja večja stopnica pri razvoju industrije se bo zgodila, ko bodo LCD in ostali ploščati prikazovalniki, kot so OLED in plazmatski prikazovalniki, popolnoma izpodrinili tehnologijo zaslonov na katodno cev še pri široko potrošnih televizijskih sprejemnikih.

Eden večjih problemov proizvodnje LCD zaslonov je kako izdelati velik zaslon brez defektnih slikovnih točk. Zaslon s prevelikim številom takih defektov ni sprejemljiv za uporabnika in večina ponudnikov garantira zaslone brez takih defektov. LCD naj bi prevladoval predvsem pri dimenzijah zaslona pod 50", medtem ko bodo pri večjih plazmatski prikazovalniki še vedno v številčni prednosti.

Prav tako se bo povečala uporaba zaslonov pri prikazovanju informacij na javnih mestih naprimer stadioni, reklamni panoji, itd... Prav tako narašča uporaba prikazovalnikov v transportu predvsem pri armaturnih ploščah v vozilih. LCD se lahko uporabljajo tudi za popolnoma druge aplikacije kot prikazovanje naprimer kot elektronski zasenčevalniki oken.

Za konec še primerjava posameznih tehnologij tekočokristalnih zaslonov, kot so si jo zamislili na strani <http://lcdresource.com/> in jo imenujejo matrika vseh matrik [3] ter jo v moji priredbi predstavlja slika 29.



Slika 28: Svetovna proizvodnja tekočokristalnih zaslonov. [5]

Tip Matrike	Svetlost	Kakovost črnin	Odzivni čas	Barvna globina	Gamma	Nasičenost barv	Zorni kot (H)	Zorni kot (V)	Zakasnitev	Cena
TN	Slabo	Povprečno	Dobro	Slabo	Slabo	Slabo	Dobro	Slabo	Dobro	Dobro
20/22" TN	Slabo	Dobro	Slabo	Slabo	Povprečno	Slabo	Dobro	Slabo	Dobro	Dobro
P-MVA	Dobro	Dobro	Dobro	Povprečno	Slabo	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno
20"+ P-MVA	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Slabo	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Dobro
PVA	Dobro	Dobro	Povprečno	Slabo	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno
20"+ PVA	Dobro	Dobro	Povprečno	Dobro	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno	Povprečno
S-PVA	Dobro	Dobro	Povprečno	Dobro	Povprečno	Dobro	Povprečno	Dobro	Slabo	Povprečno
S-IPS	Povprečno	Dobro	Povprečno	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Povprečno
20" S-IPS	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Povprečno
AS-IPS	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Slabo
A-TW-IPS	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Dobro	Slabo

Legenda	Odlično	Dobro	Povprečno	Slabo
---------	----------------	--------------	------------------	--------------

Slika 29: Primerjava različnih tehnologij tekočerkristalnih zaslonov [3]

Literatura

- [1] E. Lueder, Liquid Crystal Displays: Addressing schemes and electro-optical effects (John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2001)
- [2] <http://www.xbitlabs.com/>
- [3] <http://lcdresource.com/>
- [4] <http://www.tftcentral.co.uk/>
- [5] J.A. Castellano, Liquid Gold: The story of Liquid Crystal Display and the Creation of an Industry (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, New Jersey, 2005)