

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Borut Šuštar

Analiza stanja razvoja fleksibilnih zaslonov s prototipnim zgledom
uporabe

DIPLOMSKO DELO
NA VISOKOŠOLSLEM STROKOVNEM ŠTUDIJU

Mentor: izr. prof. dr. Miha Mraz

Ljubljana, 2009



Št. naloge: 00434/2009

Datum: 05.04.2009

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **BORUT ŠUŠTAR**

Naslov: **ANALIZA STANJA RAZVOJA FLEKSIBILNIH ZASLONOV S
PROTOTIPNIM ZGLEDOM UPORABE
STATE OF THE ART ANALYSIS OF FLEXIBLE SCREEN
DEVELOPMENT WITH PROGRAMMING PROTOTYPE USING E-
PAPER**

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Tematika naloge:

Kandidat naj v svojem delu analizira trenutno stanje razvoja na področju fleksibilnih (upogljivih) zaslonov. Pri tem naj se usmeri predvsem na tržno že dobavljive rešitve. V nadaljevanju naj kandidat opiše osnovne koncepte programiranja omenjenih zaslonov in izdela prototipni zgled aplikacijske rabe elektronskega papirja, kot enega od najbolj uspešnih predstavnikov fleksibilnih zaslonov.

Mentor:

prof. dr. Miha Mraz



Dekan:

prof. dr. Franc Solina

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani/-a _____,

z vpisno številko _____,

sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom:

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)

in somentorstvom (naziv, ime in priimek)

- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne _____ Podpis avtorja/-ice: _____

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Mihi Mrazu za pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge. Hvala tudi podjetju EPTS d.o.o., direktorju Draganu Martinoviču in ostalim zaposlenim, ki so mi omogočili izdelavo diplomske naloge. Še posebej se zahvaljujem Gorazdu Lakoviču, ki mi je v podjetju pomagal in me vodil pri opravljanju in reševanju naloge.

Posebna zahvala gre tudi mojim staršem, ki so mi ta študij omogočili in me podpirali skozi vsa ta leta.

Kazalo

Povzetek	1
Abstract.....	2
1 Uvod	3
2 Tehnologije fleksibilnih zaslonov	5
2.1 Fleksibilni substrati	5
2.1.1 Polimerni substrati.....	5
2.1.2 Fleksibilni stekleni substrati	7
2.1.3 Kovinska folija	7
2.2 Zaščitne plasti	8
2.2.1 Enoplastna zaščita.....	8
2.2.2 Večplastna zaščita.....	8
2.3 Prevodne plasti in njihove mehanske lastnosti	9
2.3.1 Neorganske prevodne plasti.....	10
2.3.1.1 Transparentni prevodni oksidi.....	10
2.3.1.2 Mehanske lastnosti	10
2.3.2 Organske prevodne plasti	12
2.3.2.1 Prevodni polimeri	12
2.3.2.2 Lastnosti prevodnih polimerov	13
2.3.3 Elektromehanske lastnosti transparentnih anod	14
2.4 Tehnologija vezja	15
2.4.1 Direktno naslavljanje.....	15
2.4.2 Pasivno matrično vezje.....	16
2.4.3 Aktivno matrično vezje	17
2.4.3.1 Neorganski tankoslojni tranzistorji.....	18
2.4.3.2 Organski tankoslojni tranzistorji	19
2.4.3.3 Mehanske pomanjkljivosti neorganskih tankoslojnih tranzistorjev	21
2.4.4 IPS naslavljanje	22
2.5 Elektro-optični materiali.....	22
2.5.1 OLED tehnologija	22
2.5.1.1 Tehnologija materiala.....	23
2.5.1.2 Princip delovanja in zgradba PLED zaslonov	24
2.5.1.3 Aktivna matrika in zaščita PLED zaslonov	25
2.5.2 Polimerno dispergirani tekoči kristali	26
2.5.2.1 Princip delovanja PDLC zaslonov.....	27
2.5.2.2 Tehnike pršenja tekočih kristalov in polimera	27

2.5.2.3	Holografski PDLC	28
2.5.3	Kolesterični odsevni zasloni	29
2.5.3.1	Princip delovanja kolesteričnih tekočih kristalov	29
2.5.3.2	Fleksibilnost zaslona in optične lastnosti	31
2.5.3.3	Barvni zaslon	32
2.5.4	Fleksibilni LCD zasloni	32
2.5.4.1	Tehnologija PES	33
2.5.4.2	Zgradba in delovanja LCD zaslona, osnovanega na PES tehnologiji	34
2.5.5	Elektronski papir	35
2.5.5.1	Gyricon	35
2.5.5.2	Elektroforezni fleksibilni elektronski papir	36
2.5.5.3	Barvni elektroforezni zaslon	40
2.5.5.4	Integracija elektroforeznih filmov v zaslone in njihova uporaba	40
3	Vzpostavitev in uporaba razvojnega okolja za delo z elektronskim papirjem	42
3.1	Opis delovnega okolja	42
3.2	Odziv elektronskega papirja na različne temperature	43
3.2.1	Opis problema	43
3.2.2	Priprava	44
3.2.3	Princip delovanja mikrokrmilnika in temperaturnega senzorja	45
3.2.3.1	Mikrokrmilnik ATtiny26	45
3.2.3.2	Temperaturni senzor	46
3.2.4	Orodja za programiranje	47
3.2.5	Opis programa	47
3.2.6	Rezultati	51
3.3	Delovanje elektronskega papirja pri nizkih temperaturah	53
3.3.1	Opis problema	53
3.3.2	Priprava in način delovanja zaslona	54
3.3.3	Rezultati	54
4	Zaključek	56
	Priloga	57
	Literatura	58

Seznam uporabljenih kratic

- **ADC** (angl. **Analog-to-Digital Converter**): tipična naprava, ki pretvori vhodno analognu napetost v digitalno vrednost;
- **CTE** (angl. **Coefficient of Thermal Expansion**): koeficient toplotnega raztezanja;
- **DD** (angl. **DownDraw**): poseben proces, pri katerem se steklo toplotno obdeluje v vertikalni smeri;
- **EEPROM** (angl. **Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory**): vrsta bralnega pomnilnika PROM, ki omogoča večkratni zapis podatkov;
- **FL-OLED** (angl. **Fluorescent Organic Light Emitting Diode**): OLED, ki deluje po principu fluorescence;
- **FOLED** (angl. **Flexible Organic Light Emittig Diode**): vrsta OLED zaslona, pri katerem se kot organski emisivni material uporablja prevoden polimer; primeren je za fleksibilne OLED zaslone;
- **H-PDLC** (angl. **Holographic Polymer Dispersed Crystals**): različica običajnih PDLC, ki vsebujejo izmenično polimerne in tekoče kristalne plasti;
- **IPS** (angl. **In-Plane Switching**): način naslavljanja zaslona, pri katerem sta elektrodi v isti ravnini zaslona; posamezne piksele se torej naslavlja s strani;
- **ISP** (angl. **In System Programming**): programiranje mikrokontrolerov direktno na vezju;
- **ITO** (angl. **Indium Tin Oxide**): mešanica indijskega oksida (In_2O_3) in kositrnega oksida (SnO_2); uporablja se kot elektroda v zaslonih;
- **IZO** (angl. **Indium Zinc Oxide**): transparentni prevodni oksid, osnovan na indiju; uporablja se lahko kot elektroda v zaslonih;
- **LCD** (angl. **Liquid Crystal Display**): zaslon, izdelan v tehnologiji tekočih kristalov;
- **LTPS** (angl. **Low Temperature Poly Silicon**): polisilicij z nizko procesno temperaturo; uporablja se kot polprevodnik v tranzistorjih;
- **MEH-PPV** (angl. **poly[2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-p-phenylene vinylene]**): emisivni prevodni polimer, ki se uporablja v PLED;
- **NTC** (angl. **Negative Temperature Coefficient**): je značilen za materiale oziroma naprave, ki se jim upornost zmanjšuje z naraščanjem temperature;
- **OLED** (angl. **Organic Light Emitting Diode**): LED dioda, pri kateri je emisivna plast sestavljena iz organskih sestavin;
- **PAR** (angl. **polyarylaes**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PC** (angl. **polycarbonate**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PCO** (angl. **polycyclic olefin**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PDLC** (angl. **Polymer Dispersed Liquid Crystals**): vrsta materialov, kjer so tekoči kristali v obliki kapljic oziroma področij naključno razporejeni preko polimernih vezi;
- **PEDOT** (angl. **polietilendioksitiofen**): prevoden polimer, ki se uporablja kot transparentna prevodna elektroda v fleksibilnih zaslonih;
- **PEN** (angl. **polyethylene naphthalate**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PES** (angl. **photoenforced stratification**): nova tehnologija proizvodnje fleksibilnih LCD zaslonov, pri kateri je zaslon sestavljen iz enega substrata namesto dveh;
- **PES** (angl. **polyethersulphone**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PET** (angl. **polyethylene terephthalate**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PF** (angl. **polyfluorene**): emisivni prevodni polimer, ki se uporablja v PLED;

- **PHOLED** (angl. **Phosphorescent Organic Light Emitting Diode**): OLED, ki deluje po principu fosforescence;
- **PI** (angl. **polyimide**): tip polimera, ki se uporablja za fleksibilne substrate;
- **PLED** (angl. **Polymer Light Emitting Diode**): vrsta OLED zaslona, pri katerem se kot organski emisivni material uporablja prevoden polimer; primeren je za fleksibilne OLED zaslone;
- **PPV** (angl. **polyphenylene vinylene**): emisivni prevodni polimer, ki se uporablja v PLED;
- **SMOLED** (angl. **Small Molecule Organic Light Emitting Diode**): vrsta OLED zaslona, pri katerem se kot organski emisivni material uporabljajo majhne molekule;
- **SPI** (angl. **Serial Peripheral Interface Bus**): serijski periferni vmesnik - univerzalni vhodno izhodni vmesnik, preko katerega komunicirajo naprave;
- **SPS** (angl. **Switching Power Supply**): enota, ki oskrbuje napravo z električno energijo in vsebuje preklopni regulator;
- **SRAM** (angl. **Static Random Access Memory**): tip polprevodniškega pomnilnika, kjer je možno večkratno pisanje in brisanje vsebine; ko odstranimo električno napajanje, se vsebina v pomnilniku izbriše;
- **TFT** (angl. **Thin Film Transistor**): tankoplastni tranzistor, ki se uporablja v ploskih zaslonih; značilen je za aktivno matrična vezja;
- **ULTPS** (angl. **Ultra Low Temperature Poly Silicon**): polisilicij z zelo nizko procesno temperaturo (<150° C);
- **USB** (angl. **Universal Serial Bus**): univerzalno serijsko vodilo, namenjeno priklopu različnih perifernih naprav na računalnik;
- **UV** (ultravijolično valovanje): elektromagnetno valovanje z valovno dolžino krajšo od valovne dolžine vidne svetlobe, vendar daljšo od valovne dolžine rentgenskih žarkov;

Povzetek

Tehnologija fleksibilnih zaslonov se je v zadnjih letih močno razvila. Razvoj tehnologije fleksibilnih zaslonov obljublja in odpira nove aplikacije za zaslone, ki dejansko danes še ne obstajajo. V to skupino spadajo razni potencialni produkti, kot so elektronski časopis, velik stenski zaslon, ki se ga ob koncu uporabe zviže v rolo, televizija v stenski preprogi, dlančnik, zvit v pisalo, itd. Tehnologija fleksibilnih zaslonov zaenkrat še ni dovolj razvita, da bi omogočila uporabo omenjenih aplikacij. Razviti so bili sicer že številni prototipi fleksibilnih zaslonov, vendar imajo trenutno še preslabe lastnosti za uspešno masovno uporabo. Težave jim povzroča fleksibilnost, ki je močno omejena zaradi neorganskih materialov, ki sestavljajo fleksibilen zaslon. Zaradi tega prihaja pri upogibanju do številnih napak, ki omejujejo funkcionalnost ali celo uničijo zaslon. V ta namen bo potrebno razviti drugačne materiale, ki bodo omogočili zaslonom dobro fleksibilnost. Najboljši komercialni uspeh je zaenkrat dosegel elektronski papir, ki se v obliki fleksibilnih segmentnih zaslonov uspešno uporablja v številnih aplikacijah.

V diplomski nalogi je predstavljena tehnologija fleksibilnih zaslonov. S tem so zajete posamezne podporne tehnologije, ki sestavljajo fleksibilen zaslon, pomanjkljivosti, težave, morebitne izboljšave ter vrste fleksibilnih zaslonov. Predstavljeno je tudi moje delo v podjetju EPTS d.o.o. Namen mojega dela v podjetju je bilo natančneje spoznati princip delovanja elektronskega papirja. Opravil sem dve nalogi. Prva je bila programerska, pri kateri sem programiral mikrokrmilnik, ki je krmilil zaslon iz elektronskega papirja. Pri drugi nalogi pa sem testiral delovanje zaslona pri nizkih temperaturah.

Ključne besede: fleksibilni zasloni, podporne tehnologije, elektronski papir, ATtiny26, temperaturni senzor.

Abstract

The development of flexible display technology has made considerable progress in recent years. The recent development promises and opens up new applications for displays which do not exist today. This type of applications includes various potential products, such as an electronic newspaper, a large wall screen that could be rolled away when not in use, a television in tapestry, a PDA that could be rolled up into a pen, etc. The technology of flexible displays is not yet sufficiently developed to enable the use of those applications. Many flexible display prototypes have been already developed, but they have not sufficient properties for successful use in mass production at the moment. The main problem is the lack of flexibility, which is strongly restricted due to non-organic materials, which consist of a flexible display. This leads to a variety of defects upon bending, which limit the functionality or even destroy the display. To this end, it will be necessary to develop alternative materials which will enable a good display flexibility. The best commercial success has so far reached flexible segmental electronic paper display, which is successfully used in many applications. This thesis describes the technology of flexible displays. It includes the individual supporting technologies, which consist of a flexible display, deficiencies, problems, possible improvements, and the types of flexible displays. It also presents my work in the company EPTS d.o.o. My intention of work in the company was precisely to find out the principle of operation of the electronic paper. I did two tasks. At the first task, I programmed the microcontroller, which controls electronic paper display and at the second task, I tested the operation of the display at low temperatures.

Key words: flexible displays, supporting technologies, electronic paper, ATtiny26, temperature sensor.

1 Uvod

Proizvodnja ploskih zaslonov je dinamična in neprestano razvijajoča se industrija. Izboljšave ploskih zaslonov so hitre zaradi tehnoloških izboljšav in novih odkritij znanstvenikov in inženirjev na tem področju. Tehnologiji katodnih cevi in aktivno matričnih LCD-jev so pred kratkim slavili stoto in petindvajseto obletnico obstoja. Prihod prenosnih elektronskih naprav je sprožil pomembna vlaganja v raziskave in razvoj tehnologije fleksibilnih zaslonov, še posebno v zadnjih letih. Tehnologija fleksibilnih zaslonov ponuja številne potencialne prednosti, kot so velika tankost, lahkost, robustnost, sposobnost upogibanja, prilagajanja in zvijanja zaslonov. Fleksibilnim zaslonom omogoča veliko prenosnost in nizko porabo energije.

V drugem poglavju diplomske naloge je predstavljena oziroma opisana tehnologija fleksibilnih zaslonov. Fleksibilni zaslon je sestavljen iz več plasti oziroma podpornih tehnologij. Za polno fleksibilnost zaslona morajo biti te tehnologije med seboj združljive. Imeti morajo torej enake oziroma podobne lastnosti, med katerimi je najbolj pomembna fleksibilnost. Tu se pojavijo težave, ker se njihove lastnosti razlikujejo in povzročajo številne napake pri upogibanju. Ta neskladja med plastmi omejujejo fleksibilnost zaslonov. Zato bo potrebno še veliko napora za razvoj novih materialov, ki bodo omogočili dobro fleksibilnost zaslonov. V tem poglavju so predstavljene tudi težave in pomanjkljivosti posameznih plasti ter njihovo obnašanje med upogibanjem zaslona. Iz obravnave v tem poglavju je razvidno, kaj je še potrebno razviti, da se bodo fleksibilni zasloni uveljavili na trgu. Predstavljene so tudi vrste fleksibilnih zaslonov, med katerimi je najbolj razvita tehnologija elektronskega papirja, ki se že nekaj let uporablja v različnih aplikacijah.

Praktični del diplomske naloge sem opravljal v podjetju EPTS d.o.o., ki se ukvarja z razvojem prototipnih tehnoloških rešitev, povezanih s prikazovanjem podatkov na elektronskem papirju (tehnologija proizvajalca E Ink Inc.). Namen mojega dela v podjetju je bilo spoznati princip delovanja elektronskega papirja tako s programerskega kot tudi s praktičnega vidika. Opravil sem dve nalogi, prva je programerska, druga pa temelji zgolj na testiranju odzivnosti.

Namen moje prve naloge, ki je predstavljena v tretjem poglavju, je bilo spoznati princip delovanja elektronskega papirja s programerskega vidika. Za to nalogo sem uporabil 10-segmentni elektronski papir, ki je bil preko elektronskega vezja povezan s temperaturnim senzorjem. Elektronsko vezje je skupaj z mikrokrmilnikom omogočalo naslavljanje zaslona. Napisati sem namreč moral program, s pomočjo katerega je mikrokrmilnik krmilil zaslon glede na temperaturo, ki jo je zaznaval temperaturni senzor. Preden pa sem se lotil programiranja, sem moral dobro poznati princip delovanja mikrokrmilnika, temperaturnega senzorja, elektronskega vezja in zaslona. Poglavje torej zajema kratek opis delovanja posameznih naprav. Sledi opis programa in rezultati delovanja zaslona pri različnih temperaturah.

Drugi del naloge je predstavljen v nadaljevanju tretjega poglavja diplomske naloge. Elektronski papir deluje po principu elektroforeze, se pravi, da se nabiti delci pod vplivom električnega toka premikajo v tekočini. E Inkov elektronski papir je namreč sestavljen iz mikrokapsul, ki vsebujejo negativno nabite črne delce in pozitivno nabite bele delce, vsebovane v prozorni tekočini. Viskoznost tekočine se s padanjem temperature večja in obratno. S padanjem temperature se torej mobilnost delcev zmanjšuje. Zato sem se odločil, da testiram delovanje elektronskega papirja pri nizkih temperaturah.

2 Tehnologije fleksibilnih zaslonov

Tehnologija fleksibilnih zaslonov vključuje številne podporne tehnologije. Te tehnologije morajo biti med seboj združljive, da lahko omogočajo resnično fleksibilnost zaslonov. Obvezne tehnologije vključujejo fleksibilne substrate, zaščitne plasti, prevodne plasti, elektrooptične materiale ter neorgansko in organsko elektroniko. Poleg tega morajo biti številni procesi optimizirani in razviti skladno z razvojem materiala, kot so »roll-to-roll« (R2R) proizvodnja, tehnologija premazov in številne tehnologije nanašanja teh materialov. Pri »roll-to-roll« proizvodnji bi se na primer rola oziroma zvitek plastičnega substrata z nenehno hitrostjo premikala preko proizvodnje linije, ki bi lahko vsebovala razne vakuumske komore za nanašanje, jedkanje, in drugo obdelovanje. Tako bi lahko proizvedli celoten fleksibilen zaslon. Če ali ko bo »roll-to-roll« proces razvit oziroma dozorel za proizvodnjo fleksibilnih zaslonov, se bodo stroški proizvodnje močno zmanjšali, hkrati pa se bo povečala proizvodnja fleksibilnih zaslonov. Za proizvodnjo večine fleksibilnih zaslonov še vedno uporabljajo serijsko proizvodnjo, vendar se bo s številnimi izboljšavami in razvojem primernih materialov začela močneje uporabljati tudi »roll-to-roll« proizvodnja.

Nekatera podjetja po svetu so razvila že številne prototipe fleksibilnih zaslonov. Pritisk na fleksibilne zaslone je razkril številne raziskovalne in razvojne priložnosti in izzive za inženirje, fizike, kemike in znanstvenike materialov. Tukaj je mnogo ovir in izzivov, ki utegnejo preprečiti izbruh fleksibilnih zaslonov v praksi, vendar predstavljajo odlične priložnosti za tehnologe in številna podjetja.

2.1 Fleksibilni substrati

Fleksibilni substrat vrši glavno vlogo v fleksibilnem zaslonu, zato mora biti združljiv z vsemi ostalimi potrebnimi plastmi, ki so integrirane na njem. Izvedba fleksibilnega zaslona se torej začne z izbiro primerne substrata. Fleksibilni zaslone so lahko zgrajeni na kovinski foliji, zelo tankem steklu ali na različnih polimernih substratih oziroma plastikah. Ti substrati se razlikujejo v optičnih in mehanskih lastnostih, zato niso vsi primerni za vse vrste fleksibilnih zaslonov.

2.1.1 Polimerni substrati

Za nadomestitev stekla potrebuje plastični substrat lastnosti stekla, kot so izredna prozornost, toplotno stabilnost, zaščita pred kisikom in vodo, odpornost proti kemikalijam, nizek

koeficient toplotnega raztezanja (CTE) in gladkost podlage. Ker ni plastičnih substratov, ki bi ustrezali tem zahtevam, je veliko raziskovanja osredotočenega v razvoj večplastne strukture substratov, ki bi kljubovala tem zahtevam. PET, PEN, PC, PES, PAR, PCO in PI so nekateri polimeri, ki so primerni za plastične substrate. Ti polimeri se razlikujejo v številnih lastnostih, kot so CTE, temperaturni odpornosti, prozornosti, prepustnosti vode in kisika ter podobno.

Polimeri	PET	PEN	PC	PES	PAR	PCO	PI
Komercialno ime	Melinex	Teonex	Lexan	Sumalite	Arylite	Appear	Kapton
Temperaturna odpornost (°C)	78	120	150	220	340	330	355
Prozornost pri 400-700 nm (%)	>85	85	>90	90	90	91,6	oranžen

Preglednica 1: Tabela prikazuje pomembnejše lastnosti posameznih polimerov.

Optične lastnosti substrata so zelo pomembne pri zaslonih, ki oddajajo svetlobo preko substrata. Prepustnost mora presežati 85 % svetlobe. Vsi naštetih substrati ustrezajo temu kriteriju, razen PI, ki je oranžne barve. Najboljše optične lastnosti ima PCO, ki presežajo 90 % prepustnost. Za zaslone, pri katerih prozornost substrata ni pomembna, lahko uporabljamo PI ali kovinsko folijo.

Toplotna in dimenzionalna odpornost substrata je zelo pomembna, ker so pri nanašanju zaščitnih premazov in ostalih plasti zaslona na substratu prisotne dokaj visoke temperature. Plastični substrat je izpostavljen velikim spremembam pri visokih temperaturah, ki se kažejo v krčenju in raztezanju. Te spremembe so pri plastičnih substratih zelo velike in vplivajo na notranje sile med substratom in ostalimi plastmi. Z izbiro primernih substratov in številnih tehnik stabiliziranja temperature (razni nizko temperaturni procesi nanašanja) lahko zelo zmanjšamo raztezanje oziroma krčenje substratov, ne moremo pa jih v celoti odpraviti.

Zaščitne lastnosti so ene izmed bistvenih lastnosti katerihkoli substratov. OLED materiali so 10000 krat občutljivejši na vlago in kisik kot na primer LCD. Ker sami substrati ne nudijo te zaščite, morajo biti obdani oziroma prekriti z zaščitnimi plastmi. Zato številni raziskovalci in podjetja iščejo rešitve v zaščitnih premazih, ki zmanjšujejo vdor vode in kisika v notranjost zaslona.

Mehanske lastnosti posameznih polimernih substratov se razlikujejo, vendar imajo v splošnem polimeri odlične mehanske lastnosti, ki se kažejo v dobri fleksibilnosti. Debelina substrata je pri tem zelo pomembna, pri čemer imajo tanjši substrati boljšo fleksibilnost.

2.1.2 Fleksibilni stekleni substrati

Za različne tehnologije zaslonov obstajajo različni tipi stekel. Večina tipov stekel, ki se uporabljajo za ploske zaslone, izhaja iz družine borovih in aluminijevih silikatov. Fleksibilnost steklenih substratov lahko dosežemo samo tako, da jim zmanjšamo debelost. Steklo postane fleksibilno pri tankosti približno 200 mikrometrov (0.2 mm). Za proizvodnjo fleksibilnih steklenih substratov uporabljamo poseben proces, tako imenovan »downdraw« ali DD proces, pri katerem steklo toplotno obdelujemo v vertikalni smeri. S to tehnologijo je možno proizvesti tudi do 50 ali celo do 30 mikrometrov tanke substrate.

Steklo ima zelo dobre optične in toplotne lastnosti. Je izredno čisto, odporno proti UV žarkom in ima visoko toplotno in dimenzionalno odpornost. Ima visoko odpornost proti kemikalijam in odlične zaščitne lastnosti proti kisiku in vlagi. Silikatna struktura omogoča steklu zelo trdo površino, ki jo lahko zgladimo do izjemne gladkosti. Zato ima odlično odpornost proti praskam in odrgninam.

Kljub številnim dobrim lastnostim pa ima steklo eno veliko pomanjkljivost. Je lomljivo in lahko razpoka pri upogibanju. S premazi lahko zmanjšamo lomljivost oziroma razpoke stekla in povečamo moč oziroma odpornost stekla proti lomom. Ojačitev tankega stekla lahko dosežemo s tankimi polimernimi premazi in s tem zmanjšamo število razpok med upogibanjem. S tem kombiniramo prednosti stekla in plastike. Vendar kljub številnim rešitvam ostaja steklo občutljivo na udarce in ne omogoča dobre fleksibilnosti. Zato se lahko proizvaja samo serijsko, ne pa tudi z »roll-to-roll« tehnologijo.

2.1.3 Kovinska folija

Kovinska folija kot substrat je primerna za nekatere fleksibilne zaslone, ki ne potrebujejo transparentnega ozadja oziroma elektronike vezja. Ima dobre zaščitne lastnosti, dobro toplotno stabilnost in je cenovno ugodna. Tako kot plastični substrat je tudi kovinska folija odporna na udarce. Običajno se uporablja nerjaveče jeklo, ki je odporno proti koroziji. To jeklo mora biti prekrito z izolatorjem, ki preprečuje kratek stik. Kovinska folija je primerna za aplikacije oziroma zaslone, ki se jih blago upogiba med uporabo. Za močnejša upogibanja ni primerna.

2.2 Zaščitne plasti

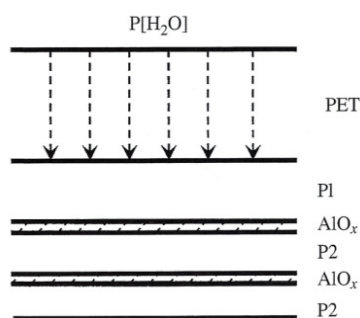
Zaščitne plasti so potrebne za zaščito ostalih plasti in materialov v zaslonu pred vdorom kisika in vlage. Za zaslone, osnovane na plastičnih substratih, je zaščita izredno pomembna. V primerjavi s steklom je plastika okoli 10 milijon-krat bolj prepustna za vodo in kisik. Voda in kisik poškodujeta tekoče kristale, OLED materiale in druge funkcionalne materiale zaslona. Zaščitne plasti morajo biti fleksibilne in prozorne. Omogočati morajo zaščitne lastnosti, ki jih zahteva zaslon. Za zaščitne plasti so zato primerni kovinski oksidi in nitrati, kot so SiO_x, Si₃N₄, AlO_x, TiO_x in ITO. Z razvojem tanke organske elektronike, kot so organski tranzistorji, prevodni polimeri in OLED materiali, je postala zaščita zelo pomembna za obstoj takih naprav.

2.2.1 Enoplastna zaščita

OLED naprave, osnovane na polimernih substratih, delujejo samo nekaj ur, dokler niso izpostavljene atmosferskim pogojem, ko preko polimernega substrata vdre kisik in vodna vlaga. Z vakuumskim nanosom tanke neorganske zaščitne plasti na polimerni substrat lahko zelo izboljšajo celotne zaščitne lastnosti. Za dobro zaščito potrebujejo OLED zasloni skoraj popoln nanos enoplastne neorganske plasti. Take plasti je zelo težko nanesti z uporabo vakuumskega nanosa, še posebno pri nizki temperaturi. Prav zato ne more biti OLED naprava uspešno zaščiten pred vodo in kisikom z uporabo vakuumskega nanašanja enoplastne zaščitne plasti. Za fleksibilne zaslone enoplastna zaščitna struktura predstavlja težave, še posebno za okside in nitrade. Ti zaščitni neorganski materiali namreč hitro počijo pod razteznimi silami oziroma pritiski, in tako izgubijo vse zaščitne lastnosti pred vodo in kisikom. Zato je za fleksibilne zaslone primerna večplastna zaščitna struktura.

2.2.2 Večplastna zaščita

Večplastna zaščitna plast je sestavljena iz organskih in neorganskih plasti, tipično iz organskih polimerov in neorganskih aluminijevih oksidov (AlO_x). Večplastni pristop omogoča pridobitev odličnih zaščitnih učinkov z uporabo neorganskih zaščitnih plasti in tako se izognemo iskanju ene popolne in brezhibne plasti. Nanašanje oziroma vgrajevanje visoko kvalitetnih neorganskih tankih plasti, sestavljenih v večplastno strukturo, je nujno za doseg dobrih zaščitnih lastnosti. Neorganske tanke plasti z številnimi napakami oziroma pomanjkljivostmi ne bodo primerne zahtevam za OLED naprave, četudi jih sestavimo v večplastno arhitekturo.



Slika 1: Primer večplastne strukture: PET/PI/ AlO_x /P2/ AlO_x /P3, kjer so P_x organske plasti, AlO_x pa neorganske plasti (povzeto po [4]).

Sprejemljivost oziroma povezanost teh plasti v večplastni strukturi je zaskrbljujoča pri toplotnem raztezanju posameznih plasti ter pri upogibanju. Pri upogibanju lahko nastanejo razpoke na zaščitnih plasteh, ki obdajajo substrat, in s tem se poveča že tako zaskrbljujoča prepustnost. Prispevek tem napakam so notranje sile med številnimi plastmi, ki so iz različnih materialov in imajo različne mehanske in toplotne lastnosti. Zato bo potrebno še veliko napora za razvoj zaščitnih plasti, ki bodo ohranjale svoje zaščitne učinke pri upogibanju zaslona.

2.3 Prevodne plasti in njihove mehanske lastnosti

Glavno vodilo pri izbiri prozornega prevodnika za uporabo s substrati je zmožnost nanosa materiala s primernimi optičnimi in električnimi lastnostmi. Fleksibilni polimerni substrat zahteva za dobro funkcionalnost zaslona pri upogibanju primeren prevodnik, ki ima podobne mehanske lastnosti, dobre optične in električne lastnosti ter nizko procesno temperaturo. Poznamo organske in neorganske prevodnike, vendar nobeden izmed njih ne ustreza v celoti vsem zahtevam polimernega substrata. Neorganski materiali imajo sicer dobre optične in električne lastnosti, vendar so zaradi slabih mehanskih lastnosti podvrženi številnim napakam med upogibanjem in zato omejujejo fleksibilnost zaslona. Prevodni polimeri imajo dobre mehanske lastnosti, vendar se zaradi slabih električnih in optičnih lastnosti še ne uporabljajo v fleksibilnih zaslonih.

2.3.1 Neorganske prevodne plasti

2.3.1.1 Transparentni prevodni oksidi

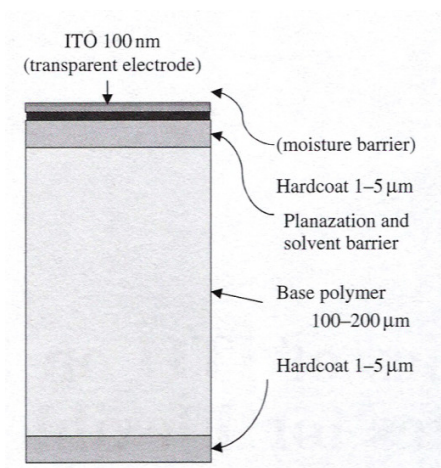
Prava izbira za elektrode oziroma prevodne plasti je razred prevodnih prozornih oksidov. Znotraj tega razreda se običajno uporabljajo indijski oksidni materiali, ker imajo dobre optične in električne lastnosti. Ti oksidni materiali so lahko proizvedeni pod pogoji, ki so združljivi s temperaturno občutljivimi fleksibilnimi polimernimi substrati. Transparentni prevodni oksidi, ki so najširše uporabljeni v zaslonih, so kristalni indijski kositrni oksid (c-ITO), amorfni indijski kositrni oksid (a-ITO) in amorfni indijski cinkov oksid (a-IZO). Optične in elektronske lastnosti amorfni materialov so ponavadi slabše kot pri kristalnem stanju, vendar so še vedno primerne za sedanje tehnologije zaslonov. Za nanos indijskega oksida se uporablja metoda vakuumskega nanašanja s pršenjem. Slabost teh neorganskih oksidnih materialov je v tem, da imajo slabo fleksibilnost.

Svetovna zaloga indijskih kovin je omejena, zato se pojavlja zaskrbljenost za uporabo materialov, ki vsebujejo indij, za prihodnje tehnologije, predvsem na ekonomski uporabi teh materialov. To spoznanje je pripeljalo v zadnjih letih do intenzivnega iskanja novih prevodnih oksidnih materialov. Uvedene so bile številne nove sestavine prozornih prevodnikov, ki imajo sicer zelo dobro prevodnost in optično prepustnost, vendar zahtevajo procesne temperature, ki krepko presegajo temperaturne odpornosti številnih polimernih substratov. Številni novi materiali so tako še v razvoju in so cenovno ugodnejši kot materiali osnovani na indiju.

Indijski kositrni oksid (ITO) je tipična prevodna plast, ki se uporablja v fleksibilnih zaslonih. ITO je krhka neorganska plast, zato ima slabo fleksibilnost in lahko počí pri upogibanju. Pokanje plasti ITO lahko povzroči katastrofalne napake za fleksibilne zaslone. Razviti so bili že materiali, ki so bolj fleksibilni kot ITO, vendar imajo slabše električne lastnosti.

2.3.1.2 Mehanske lastnosti

Plastični substrati morajo biti prekriti oziroma premazani z različnimi plastmi za izboljšanje lastnosti celotnega substrata. Osnovna plast oziroma polimer je pogosto prekrita z obeh strani z zaščitno plastjo (angl. *hardcoat*), ki poveča odpornost substrata proti praskam in kemikalijam. Na vrhu te plasti se nahaja zaščitna plast (angl. *gas or moisture barrier*), ki poveča odpornost substrata pred kisikom in vlago. Zaslonska stran substrata je nato prekrita s prozorno elektrodo, kot na primer ITO.

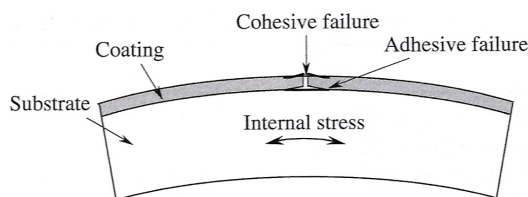


Slika 2: Splošna struktura substrata (povzeto po [4]).

Medtem ko je polimerni substrat ponavadi popolnoma organski, je zaščitna plast proti praskam in kemikalijam lahko organska ali delno neorganska, zaščitna plast proti vlagi in kisiku ter ITO plast, pa sta večinoma neorganski. Neorganski materiali so ponavadi krhki in lomljivi, polimeri pa upogljivi in robustni.

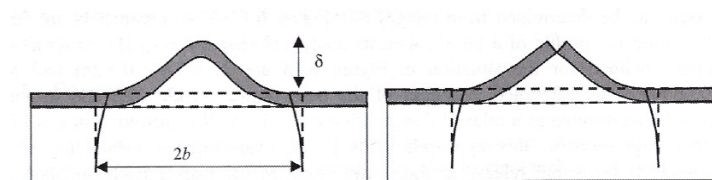
Neorganski materiali, kot so kovine in oksidi, ki se uporabljajo v sedanjih fleksibilnih zaslonih, imajo zelo različne mehanske lastnosti v primerjavi s polimernimi substrati. Te mehanske lastnosti se razlikujejo v fleksibilnosti oziroma togosti ter koeficientom toplotnega raztezanja posameznih plasti. Zato prihaja do notranjih napetosti med temi plastmi že v teku proizvodnega procesa in med samo uporabo fleksibilnega zaslona. Koeficient toplotnega raztezanja je zelo pomemben dejavnik, ker lahko pripelje do različnega natezanja in krčenja organskih in neorganskih plasti pri določenih temperaturah. Te napetosti vključno z napetostmi pri upogibanju zaslona lahko pripeljejo do napake v delovanju zaslona. Napetosti lahko povzročijo razpoke na neorganskih plasteh ali pa napake na stiku med substratom in neorgansko plastjo. Tako je kontroliranje teh napetosti glavni faktor za realizacijo fleksibilnih zaslonov.

Mehanske pomanjkljivosti so potemtakem značilne tudi za neorgansko plast ITO. Pri upogibanju substrata prihaja do zunanjih razteznih sil in notranjih stiskalnih sil plasti ITO. Pri močnejšem upogibanju zaslona pride do prečnih razpok na plasti ITO in s tem tudi do prevodnih napak. Te razpoke se pri večkratnem upogibanju večajo in plast lahko počí čez celo površino. Če so te razpoke prevelike, lahko pripelje do neprevodnosti plasti ITO.



Slika 3: Raztezna napaka ITO plasti pri upogibanju: ko ITO poče čez celo površino, postane neprevoden (povzeto po [4]).

Pri upogibanju substrata lahko na notranji strani upogiba odstopi plast ITO zaradi manjše elastičnosti. Te izbokline, ki odstopijo od substrata, lahko počijo, ko substrat upogibamo. S tem pride do prevodnih napak plasti ITO.



Slika 4: Stiskalna napaka plasti ITO pri upogibanju: pri večkratnem upogibanju izboklina poče in ITO postane neprevoden (povzeto po [4]).

Zmanjšanje napetosti plasti ITO na substratu pri upogibanju lahko dosežemo na dva načina in sicer z zmanjšanjem debeline substrata ali z uporabo organske blažilne plasti med tema plastema. Ta dodatna plast zmanjša napetost med plastjo ITO in substratom. Tako se zmanjša gostota razpok in s tem se izboljšajo električne lastnosti plasti. Blažilna plast lahko na splošno zmanjša mehanske napetosti oziroma pritiske v večplastni strukturi.

Iz tega lahko sklepamo, da neorganske plasti ovirajo dobro fleksibilnost zaslona, ker so krhke in so podvržene raznim mehanskim napakam med procesom izdelave in med upogibanjem zaslona.

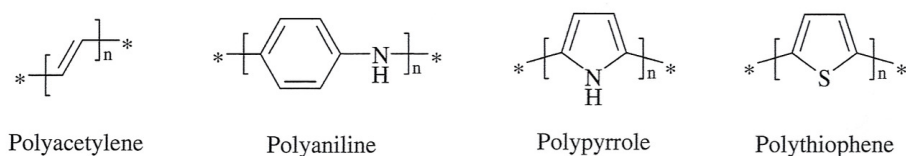
2.3.2 Organske prevodne plasti

2.3.2.1 Prevodni polimeri

Polimeri so ogromne molekule, sestavljene iz ponavljajočih se strukturnih enot oziroma verig, povezanih s kovalentno kemijsko vezjo. Te molekule so sestavljene deloma z enojnimi in deloma z dvojnimi vezmi. Čeprav ima vsak tip polimerov drugačne specifične lastnosti, obstaja ena značilnost, ki je enaka oziroma skupna skoraj vsem polimerom. Vsi so namreč

električni izolatorji. Zato se uporabljajo polimeri kot materiali, ki obdajajo baker v električnih žicah ali pa preprečujejo kratek stik v električnem vezju. Obstaja pa ena vrsta polimerov, ki so izjema tega pravila, to so prevodni polimeri. Tem polimerom pravimo notranje prevodni polimeri ali ICP (angl. *Intrinsic Conductive Polymers*). Z razliko od ostalih polimerov imajo prevodni polimeri sposobnost prevajanja elektrike, kot na primer kovine.

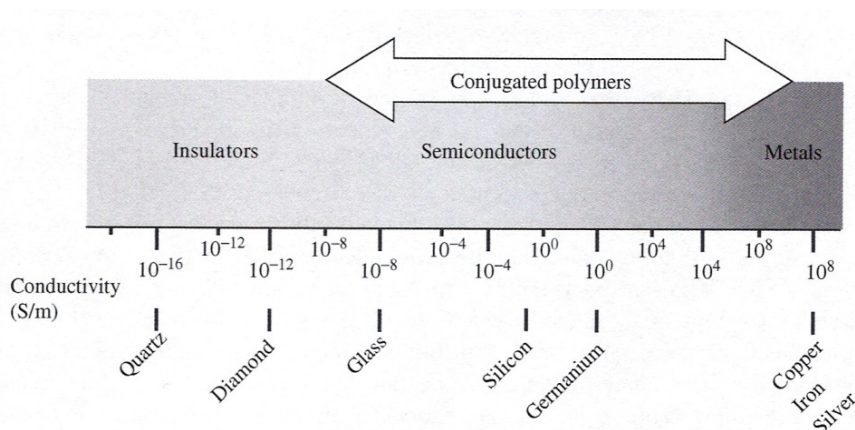
Kovinska žica lahko prevaja elektriko, ker se elektroni v kovini prosto gibljejo. Pri polimeru se elektroni ne morejo prosto gibati. Da pa bi polimer postal prevoden, ga je potrebno dopirati. Samo dopiranje se izvaja pri polimerizaciji prevodnih polimerov. Obstajajo dve vrsti dopiranja, oksidacija in redukcija. Pri oksidaciji uporabljamo dopante, ki jim odvzamemo elektron, zato molekule dopantov privlačijo elektrone dvojnih vezi v polimerni verigi. Molekula polimera je zato pozitivno nabita. Pri redukciji pa je proces obraten, in sicer dopantom dodamo elektron, katere privlačijo elektroni dvojnih vezi v polimerni verigi. Molekula polimera je negativno nabita. Ko omogočimo električno polje, se lahko tako elektroni, ki predstavljajo dvojne vezi v molekuli, prosto gibljejo preko molekularne verige. Zato morajo biti verige primerno urejene. Tok torej povzročajo elektroni, ki izhajajo iz dvojnih vezi v prevodnem polimeru, ker ne omogočajo močne vezi med atomi. Nekateri člani oziroma sestavni deli družine prevodnih polimerov so predstavljeni na sliki 5.



Slika 5: Nekateri kandidati prevodnih polimerov, od leve proti desni: poliacetilen (PAC), polianilin (PANI), polipirrol (PPY) in politiofen (povzeto po [4]).

2.3.2.2 Lastnosti prevodnih polimerov

Tudi prevodni polimeri se smatrajo za aplikacije fleksibilnih zaslonov. Čeprav so njihove optične lastnosti in odpornost slabše kot pri ITO, pa imajo izjemne mehanske lastnosti in nizko procesno temperaturo. Če prikažemo prevodnost materiala v enoti S/cm (enota za merjenje električne prevodnosti (angl. *Siemens per centimeter*)), potem prevodna ocena za prevodne polimere sega od 10^{-9} S/cm do 10^5 S/cm (prevodnost kovin).

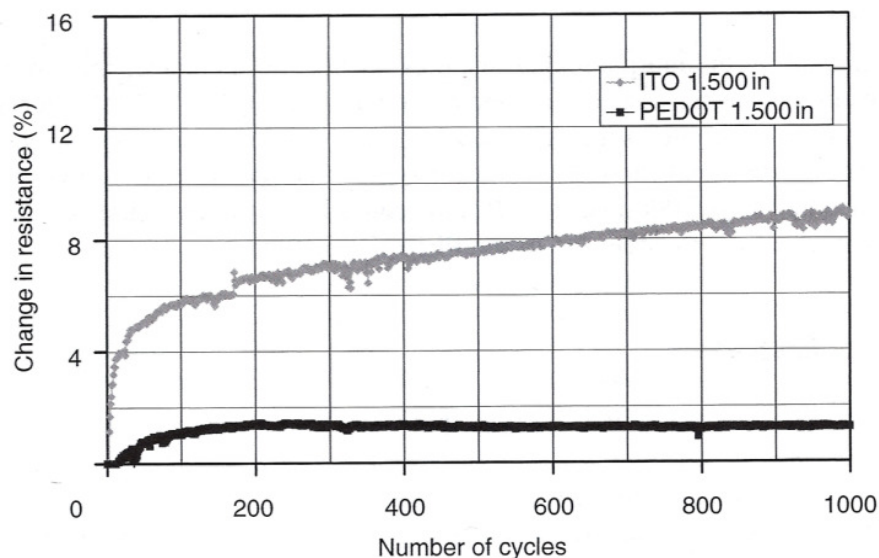


Slika 6: Prevodni polimeri znotraj prevodnega spektra (povzeto po [4]).

Prevodni polimeri, kot so poliacetilen, polianilin, polipirol in politiofen, imajo vsi prevodnost preko 100 S/cm. Dosežene so že zelo dobre električne lastnosti nekaterih polimerov, celo do 10^5 S/cm (prevodnost bakra), vendar je zaradi ostalih lastnosti zelo malo možnosti, da bi se ti polimeri uporabljali za fleksibilne zaslone. Poleg tega pa je nekatere polimere zelo težko narediti prevodne. Polianilin je najbolj raziskan prevodni material v industriji. Glavni problem prevodnih polimerov v tem trenutku je, da je še precej nejasnosti in njihove napovedane lastnosti še vedno niso optimistične. Kljub temu, da imajo dobre mehanske lastnosti, kot so dobra fleksibilnost, imajo slabe optične in električne lastnosti. V bližnji prihodnosti bo trg iskal materiale s prevodnostjo vsaj 1000 S/cm, ki so stabilni in okolju prijazni. Zato bo potrebno še veliko raziskovanja za uspešno optimizacijo lastnosti prevodnih polimerov.

2.3.3 Elektromehanske lastnosti transparentnih anod

Raziskave so pokazale, da se upornost materiala ITO linearno povečuje v teku upogibanja, dokler ne pride do katastrofalnih napak plasti ITO. Plast tako razpoka, da ne prevaja več toka. To bi zelo omejilo uporabo ITO za fleksibilne in zložljive oziroma zvite zaslone (angl. *rollable displays*). Upornost prevodnega polimera PEDOT (polietilendioksitiofen), ki se kot organski prevodnik največkrat uporablja, se ne povečuje linearno, temveč se poveča v začetni fazi, nato ostaja upornost približno enaka tekom upogibanja. Zato je polimer manj podvržen poškodbam oziroma napakam pri nadaljnjem upogibanju. To pomeni, da bi bil tak prevodni polimer primeren za zvite zaslone. Vendar bo potrebnih še veliko raziskav za povečanje prevodnosti, optičnih lastnosti in toplotni odpornosti prevodnih polimerov.



Slika 7: Upornost neorganske (ITO) in organske (polimer PEDOT) plasti v teku upogibanja zaslona. Temna črta prikazuje upornost prevodnega polimera PEDOT, svetla pa upornost ITO (povzeto po [4]).

2.4 Tehnologija vezja

Tako kot pri običajnih tankoplastnih zaslonih obstaja tudi pri fleksibilnih zaslonih več vrst naslavljanja. Najenostavnejše je direktno naslavljanje. Tako naslavljanje uporabljajo segmentni zasloni. Poznamo tudi pasivno matrično (PM) in aktivno matrično (AM) naslavljanje. Pasivno matrično naslavljanje je primerno za manjše zaslone, aktivno matrično naslavljanje pa se uporablja tudi v večjih zaslonih. Najmanj razširjeno je tako imenovano IPS naslavljanje. IPS tehnologija predstavlja velik obet v nekaterih tipih fleksibilnih zaslonov.

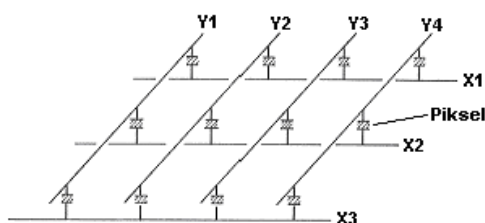
2.4.1 Direktno naslavljanje

Zaslon z direktnim naslavljanjem je razdeljen na segmente, ki so lahko nadzorovani oziroma naslovljeni posamezno preko ene same povezave, ki potekajo do roba zaslona, kjer so nameščeni kontakti. Vsak element je naslovljen neodvisno drug od drugega. Segmenti, ki se vedno aktivirajo skupaj, so lahko povezani preko skupne povezave. Spodnja elektroda takih zaslonov je torej razdeljena na segmente, zgornja pa je skupna. Direktno naslavljanje se uporablja v zaslonih, ki imajo relativno malo pikslov in so namenjeni za prikaz informacij v obliki črk, števil in vnaprej definiranih oziroma določenih ikon. Ta način naslavljanja uporablja na primer segmentni fleksibilni elektronski papir.

2.4.2 Pasivno matrično vezje

Pasivno matrično naslavljanje omogoča neomejeno število vrstic zaslona, se pravi naslavljanje neomejenega števila pikselov. Vendar se z večanjem zaslona hkrati povečuje tudi odzivni čas zaslona. Zato je pasivno matrična tehnologija primerna za manjše zaslone, velikosti nekaj 100 vrstic, ki se lahko uporabljajo v enostavnih aplikacijah, kot so digitalne ure, nalepke s cenami, pametne kartice itd. Pasivno matrična sestava vezja je enostavna, vendar je naslavljanje zahtevnejše in zahteva relativno kompleksno in drago krmilno elektroniko. Za delovanje aktivno matričnih vezij je potreben dokaj velik tok in napetost, zato je poraba energije naprav s pasivno matričnim naslavljanjem večja, kot pri aktivno matričnem naslavljanju.

Piksel je določen s križanjem vrstične elektrode v ozadju in stolpičaste elektrode v ospredju. Za naslavljanje piksla je uporabljena delna napetost na ustrezni vrstici in dopolnilna delna napetost na ustreznem stolpcu. Ostali piksli v vrstici in stolpcu ostanejo le delno naslovljeni. Za preklop piksla je namreč potrebna celotna napetost. Pri pasivno matričnem naslavljanju je zaslon naslovljen po vrsticah. Za celo sliko mora biti vsaka vrstica zaslona naslovljena za $1/N$ časa potrebnega za prikaz celotne slike, kjer je N število vrstic zaslona. To pomeni, da se z večanjem števila vrstic povečuje čas osveževanja slike.

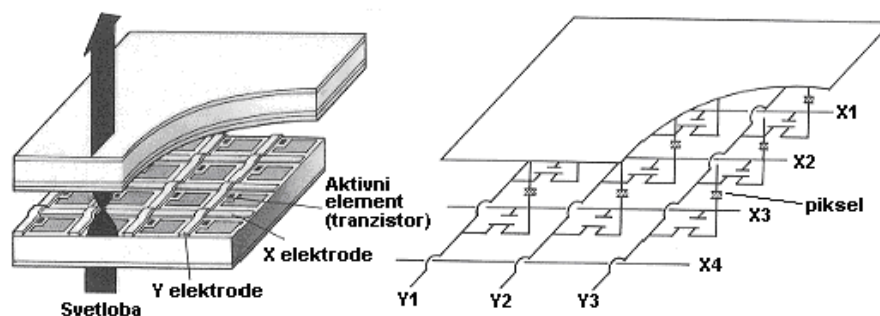


Slika 8: V pasivno matričnih zaslonih matrika električno-prevodnih vrstic (x) in kolon (y) tvori mrežo slikovnih elementov, tako imenovanih pikselov. Tanka plast elektro optičnega materiala, obdana s pravokotnimi vrsticami na eni in kolonami na drugi strani, se aktivira za oddajanje svetlobe s pomočjo električnih signalov, ki so določeni s to mrežo vrstic in kolon (povzeto po [5]).

Pasivno-matrični zaslone ohranjajo stanje točk brez aktivnega električnega napajanja. Se pravi, da se stanje točke osveži šele, ko so določena stanja vseh točk istega cikla.

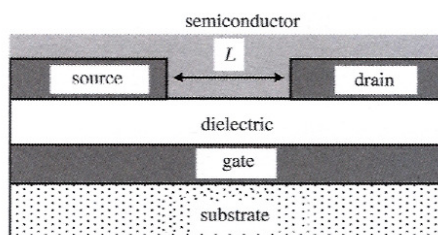
2.4.3 Aktivno matrično vezje

Osnova zaslonov z aktivno matriko je tehnologija tankoplastnih tranzistorjev (angl. *Thin Film Transistor* - TFT). Ta tehnologija omogoča zaslonom boljše odzivne čase in nižjo porabo električne energije, kot pri pasivno matričnih zaslonih. Hkrati omogoča bolj jasno in ostro sliko, dober vidni kot, boljše resolucijo in s tem večje zaslone kot pasivno matrična vezja. Medtem ko pasivno matrični zasloni uporabljajo enostavno prevodno mrežo za dovajanje toka do določenega piksla, aktivno-matrični zasloni uporabljajo mrežo tranzistorjev in kondenzatorjev, ki imajo sposobnost obdržati oziroma shraniti naboj oziroma napetost posameznega piksla za določen čas. Naslavljanje pri teh zaslonih je istočasno. Aktivno-matrična matrika se torej obnaša kot množica stikal, ki nadzorujejo količino toka, ki teče skozi vsak piksel posebej. Ta neprestani električni tok je nadzorovan z vsaj dvema tranzistorjema na vsakem pikslu. Eden začne in konča polniti hranitveni kondenzator, drugi pa omogoča napetostni vir na nivoju, ki je potreben za nastanek konstantnega toka za piksel.



Slika 9: Aktivno matrični zaslon je v osnovi zgrajen iz aktivne matrike (tvorijo piksle), ki je nanešena na prozoren substrat. Aktivna matrika je sestavljena iz tankoplastnega tranzistorskega vezja in ITO plasti. Na to strukturo je nato nanešen elektro-optični material in katoda, ki je skupna vsem pikslom (povzeto po [5]).

Tankoplastni tranzistor je sestavljen iz polprevodniške plasti, ki ima vgrajeno izvorno in ponorno elektrodo (»source« – S in »drain« – D). Območju med tema dvema elektrodama pravimo kanal. Tanka izolacijska plast izolira ti dve elektrodi in polprevodnik pred spodaj ležečo vhodno elektrodo (»gate« – G).



Slika 10: Tankoplastni tranzistor: polprevodniška plast prekriva S in D elektrodi, ki sta električno izolirani pred G elektrodo z izolacijsko plastjo. Območje med S in D elektrodama določa dolžina kanala L (povzeto po [4]).

Značilnost polprevodnikov je v tem, da postanejo prevodni šele z nastankom električnega polja s priključitvijo vhodne elektrode na napetost. S tem med izolatorjem in polprevodnikom nastane tanek prevodni kanal, kjer se elektroni akumulirajo in nato stečejo od izvorne do izhodne elektrode, pri čemer zavisi tok od vhodne napetosti in mobilnosti elektronov, kar je materialna lastnost polprevodnikov. Možni materiali za polprevodnike so lahko organske ali neorganske narave, sama zgradba tranzistorja pa je lahko v celoti organska, neorganska ali pa kombinacija obeh. Napredki v materialih in procesnih tehnikah organskih in neorganskih aktivno matričnih vezij se neprestano izboljšujejo. Številni znanstveniki in raziskovalci poskušajo razviti materiale in tehnike nanašanja za nov tip elektronskega aktivno matričnega vezja, osnovanega na plastiki. Plastično aktivno matrično elektronsko vezje bo pomembno zaradi mehanske fleksibilnosti, lahкости, trpežnosti in enostavnega nanašanja.

Fleksibilni aktivno matrični zasloni na plastičnih substratih so še vedno v fazi raziskovanja in razvoja. Razvitih je bilo kar nekaj prototipov fleksibilnih aktivno matričnih zaslonov, vendar je ta tehnologija zaenkrat premalo razvita za komercialno uporabo.

2.4.3.1 Neorganski tankoslojni tranzistorji

Plastična aktivno matrična elektronska vezja so zaenkrat narejena iz amorfnega silicija (a-Si) in nizko temperaturnega poli silicija (LTPS) kot polprevodnika. Pri klasičnih tankoplastnih tranzistorjih je polprevodnik iz silicija, izolator iz silicijevega dioksida (SiO_2) in elektrode oziroma vodniki iz kovin, kot so aluminij, zlato ali celo ITO. Največji problem teh materialov je ta, da so krhki in togi, zato lahko pri upogibanju počijo. Kot posledica se pojavi okvara tranzistorja. Poleg tega pa so lastnosti polprevodnikov pri nizko temperaturnih nanosih tranzistorskega vezja na plastičnem substratu slabše, kot pri nanosu pri običajnih temperaturah na steklenem substratu. Številne oblike silicija, z izjemo amorfnega, zahtevajo visoko temperaturni nanos oziroma proces, ki presega celo 300°C , zato so nezdržljivi s številnimi plastičnimi substrati. Polisilicijevo aktivno matrično vezje ima visoko mobilnost in ponuja svetlejša zaslona z manj porabe električne energije in se lahko uporablja v visoko

resolucijskih zaslonih. Mobilnost amorfne silicija je relativno majhna in zato omejuje resolucijo zaslonov.

Tehnologija amorfne silicija kljub temu ponuja kar nekaj prednosti pred polisilicijevo tehnologijo. Proces nanašanja amorfne silicija je bolj dozorel in cenejši kot proces polisilicija. Ker amorfni silicij za nanos zahteva manjšo temperaturo procesa, omogoča vgraditev amorfne aktivno matričnega vezja na številne plastične fleksibilne substrate, medtem ko so polisilicijeve tranzistorske vezja omejena na plastične substrate z relativno visoko toplotno stabilnostjo. Zato je potrebno razviti procese, ki omogočajo nanos polisilicijevih polprevodnikov na plastične substrate. Razvit je že bil ultra nizko temperaturni polisilicij (angl. *Ultra Low Temperature Polysilicon* - ULTPS), ki ima procesno temperaturo manj kot 150°C in je primeren za nanos pri deloma zmanjšani mobilnosti.

2.4.3.2 *Organski tankoslojni tranzistorji*

Organska elektronika, ki uporablja organske materiale kot polprevodnike, se pojavlja kot poceni in obetajoča tehnologija za velika integrirana elektronska vezja. Uporaba organskih materialov ima številne pomembne prednosti v primerjavi z običajnimi tehnikami, ki uporabljajo v glavnem neorganske materiale, kot so amorfni silicij in polisilicij. Nizka procesna temperatura ustvarja možnost uporabe številnih plastičnih substratov namesto stekla. Mehanske lastnosti organskih materialov so združljive s plastičnimi substrati. Ta tehnologija zato odpira možnosti plastičnih zaslonov, ki so resnično zložljivi. Organski polprevodnik je lahko nanešen z vakuumskim parnim nanosom ali z nanosom s topljenjem. Organski polprevodniki, nanešeni s paro, imajo v splošnem večje prevodne učinke. Nanos topljivih organskih materialov poenostavi proizvodni proces zaslonov v primerjavi z običajnimi kemijskimi parnimi tehnikami nanašanja. V zadnjih letih so bili razviti organski polprevodniki, ki so v mobilnosti primerljivi z amorfnim silicijem. Največja mobilnost je dosežena večinoma z vakuumskim parnim nanašanjem organskih polprevodnikov.

Pri organskih tranzistorjih je osnova PET substrat, na katerega je neparjen polprevodnik pentacen ali nabrizgan politiofen. Elektrodi S in D sta lahko iz zlata ali pa tudi prevodnega polimera, na primer trialkiltiofena. Vhodna elektroda (G) je lahko iz zlata ali prevodnega polimera, kot sta polianilin in PEDOT/PSS (torej se uporabljata kot vodnika). Za precizno strukturiranje nanosa elektrod, polprevodnikov in izolatorjev se uporabljajo posebne litografske metode, ki uporabljajo za nanos teh materialov zaščitne maske ali elektronsko črnilo. Celotna zgradba organskega tankoslojnega tranzistorja je lahko torej v celoti iz polimera.

Obstajata dve vrsti organskih polprevodniških materialov za organske tankoslojne tranzistorje, in sicer modificirane majhne molekule in polimeri. Majhni molekularni polprevodniki so na splošno bolj odporni na kisik in vodo. Slednji, kot na primer pentacen,

pogosto ne morejo biti proizvedeni s tehniko topljenja oziroma raztapljanja, ker imajo majhno topljivost, in zato zahtevajo vakuumsko parno nanašanje. Tisti polimeri, ki se lahko nanašajo s topljenjem, imajo dobro mobilnost, vendar so občutljivi na dopiranje s kisikom. Polimerni organski tankoslojni tranzistorji so zato obdelani v neaktivnem ozračju za omogočanje visoke mobilnosti.

Kemična stabilnost organskih TFT tranzistorjev je zaskrbljujoča zaradi polimerov, ki so občutljivi na kisik in vodo in lahko ob prisotnosti oziroma vdoru le teh degradirajo oziroma propadejo. Vendar za to obstajajo rešitve, in sicer razni zaščitni premazi, ki ščitijo organske plasti pred vdorom vode in kisika v zaslon. Glavni problem organskih tankoslojnih tranzistorjev je nizka mobilnost organskih polprevodnikov. Njihova težava namreč tiči v pomanjkanju ustrezne kristalne strukture, ki jo imajo polprevodniški materiali, kot je na primer silicij. Zaradi ustrezne kristalne strukture elektroni v običajnih polprevodniških materialih potujejo v relativno ravni črti, medtem ko se v organskih polprevodnikih bolj kot ne premetavajo. Potovanje v ravni črti od enega konca polprevodniškega materiala do drugega je ponavadi tudi najkrajša pot, ki jo elektron lahko opravi za prenos energije in iz takšnega razloga imajo silicijevi neorganski tranzistorji v primerjavi z organskimi različicami še vedno mnogo manjšo upornost kanala. Posledično manjša upornost oziroma večja prevodnost kanala vpliva na hitrost delovanja samega tranzistorja, le-ta pa je za današnje aplikacije ključnega pomena, še posebno za zaslone velikih dimenzij. Sodelovanje inženirjev iz nekaterih ameriških univerz je na tem področju rodilo kar zanimive rezultate, saj so omenjeni znanstveniki ugotovili, da je materialu organskega polprevodnika smotrno dodati nano-cevi, s pomočjo katerih se znotraj polprevodnika ustvarijo pomanjkljive kristalne regije z visoko prevodnostjo. Majhne ogljikove nano-cevi (cevke iz ogljika, katerih premer znaša le nekaj nanometrov) predstavljajo zgolj en odstotek nastalega hibridnega polprevodniškega materiala in tako povsem ohranjajo fizikalne značaje in robustnost organskih polprevodnikov. Zaradi prisotnosti nano-cevi sedaj elektroni potujejo po mnogo krajših poteh, kar prinaša kar 60 krat boljše prevodnosti kanala tranzistorja v primerjavi s tranzistorjem, ki je izdelan iz običajnega organskega polprevodniškega materiala. Kljub temu, da sama izboljšava še vedno ne zadostuje zahtevam za komercialne aplikacije, raziskovalna skupina navaja nadaljnje eksperimente, ki bodo dodatno približali organske polprevodnike s komercialnimi aplikacijami. Elektronska vezja, osnovana na organskih tranzistorjih, so zato zaenkrat primerna za naprave, kjer ni zahtevana visoka preklopna hitrost tranzistorjev. Ta vezja so primerna za cenejše mikroelektronske aplikacije, kot so na primer radio frekvenčne identifikacijske ploščice, kjer bi bilo silicijevo elektronsko vezje predrago.

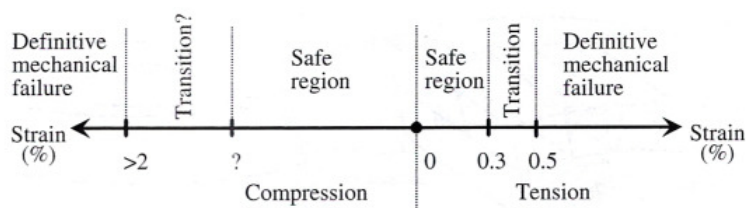
Fleksibilnost, nizka cena in celo transparentnost so torej odlike polimerne elektronike. Kljub temu, da organski tranzistorji po svoji učinkovitosti še vedno zaostajajo za svojimi silicijevimi sorodniki, jih tehnološki napredek neprestano izboljšuje. Razvit je bil že prototip aktivno matričnega zaslona z organskimi tankoslojnimi tranzistorji, osnovanem na plastiki.

Vseboval je 78800 pikselov in je največji fleksibilni aktivno matrični zaslon z organskimi tranzistorji.

2.4.3.3 Mehanske pomanjkljivosti neorganskih tankoslojnih tranzistorjev

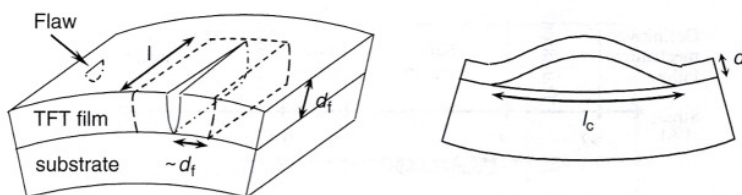
Tankoslojni tranzistorji so narejeni na substratu plast za plastjo. Standardne debeline organskih polimerov so od 50 do 200 mikrometrov. Plasti, ki sestavljajo tranzistor, so tanke od 0.2 do 3 mikrometre, tako da je lahko tranzistorska plast tanka tudi le 1 mikrometra. Tankoplastni tranzistorji prestajajo napetosti tako pri sami proizvodnji kot tudi pri uporabi oziroma upogibanju. Toplotne napetosti povzročajo razlike v toplotnih razteznih koeficientih med plastmi tranzistorja in substratom ter med samimi plastmi tranzistorja. Obnašanje tranzistorjev na substratu pod napetostjo je odvisno od debeline in elastičnosti substrata ter od elastičnosti in debeline tranzistorjev.

Amorfni silicij se pod povečanjem mehanske obremenitve zlomi, oziroma poči. Obstaja prehodno območje, ko pride do prevodne napake v tranzistorju, vendar se električna funkcija obnovi, ko se zmanjša napetost oziroma obremenitev tranzistorja. To povzroča električno odpiranje in zapiranje razpok v kanalu polprevodnika med S in D elektrodama. Pod večjim pritiskom oziroma upogibanjem pride do dokončnih mehanskih napak tranzistorja. Tako tranzistor ne deluje več, ker so napake prevelike.



Slika 11: Odziv tankoslojnega tranzistorja (TFT) na mehanske sile (povzeto po [4]).

Kakorkoli, napake v delovanju tranzistorja povzročijo prevelike raztezne ali krčne napetosti pri upogibanju. Pri raztezanju se tranzistor okvari zaradi loma plasti, pri stiskanju oziroma krčenju pa zaradi odstopa plasti od substrata. S tem pride do upogiba in nenazadnje do loma tranzistorske plasti.



Slika 12: Napake tranzistorskih plasti pri raztezanju (levo) in (desno) krčenju (povzeto po [4]).

Napetosti na tranzistorjih se delno zmanjša tako, da se tranzistorje namesti na trdne otočke. Otočki so trdi in so samo na mestih, kjer so tranzistorji, ne pa po celi površini piksla. Tako zavarujejo posamezne tranzistorje pred upogibanjem in s tem okvaro. To je le delna rešitev, zato bo potrebno razviti nove materiale, ki bodo imeli dobre električne, optične in mehanske lastnosti.

2.4.4 IPS naslavljanje

Pri običajnih tehnologijah naslavljanja se zaslon naslavlja preko spodnje in zgornje elektrode. Pikel torej leži med spodnjo in zgornjo elektrodo. Pri IPS tehnologiji pa sta obe elektrodi v isti ravnini (spodaj), in sicer levo in desno od posameznega piksla. Tako se v osnovi piksle naslavlja s strani.

IPS tehnologija se v današnjih zaslonih zelo redko uporablja zaradi drage proizvodnje in posledično visoke cene. Zato prodaja zaslonov s to tehnologijo žal vse bolj upada. Kljub temu je IPS tehnologija z razvojem novih tehnologij fleksibilnih zaslonov ponovno dobila priložnost za uspešno uporabo. IPS naslavljanje se nekoliko razlikuje pri različnih tehnologijah fleksibilnih zaslonov.

2.5 Elektro-optični materiali

Različni tipi elektro-optičnih materialov za fleksibilne zaslone spadajo v tri kategorije, in sicer emisivni (angl. *emissive*), odsevni (angl. *reflective*) in transmisivni (angl. *transmissive*). Emisivni materiali se uporabljajo v OLED zaslonih, ki pod vplivom električnega toka oddajajo svetlobo. Za odsevne zaslone je značilna nizka poraba električne energije za delovanje. V to kategorijo spadajo polimerno dispergirani tekoči kristali (PDLC), polimerno dispergirani kiralni tekoči kristali in elektronski papir. Večina teh zaslonov je bistabilnih, kar pomeni, da za obstoj slike na zaslonu ne potrebujejo nenehnega osveževanja. Slika se torej ohrani brez električne napetosti. Pod transmisivne zaslone spadajo fleksibilni LCD zaslone, ki za prikaz slike uporabljajo svetlobo iz ozadja. Tekoči kristali, ki sestavljajo tak zaslon, pod vplivom električnega toka spreminjajo strukturo in s tem prepuščajo svetlobo iz ozadja.

2.5.1 OLED tehnologija

OLED (angl. *Organic Light-Emitting Diode*) tehnologija povzroča ogromno zanimanja in se je hitro razvila odkar je bila odkrita elektroluminiscenca pred več kot petnajstimi leti. OLED

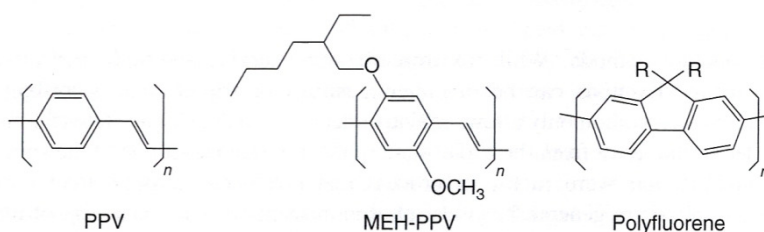
zasloni, osnovani na steklu, so že na trgu. Imajo številne prednost pred običajnimi ploskimi zasloni, vključno z industrijsko prevladujočimi tekoče kristalnimi zasloni (LCD). Posebnost OLED tehnologije so aktivni organski materiali, ki ob prevajanju električnega toka oddajajo svetlobo. Zato zaslon za delovanje ne potrebuje dodatnega osvetljevanja iz ozadja, kot ga na primer LCD zasloni. To omogoča OLED zaslonom izredno tankost, lahkost, majhno porabo energije, širok vidni kot, žive barve in visoko kontrastno razmerje. Ti zasloni imajo tudi hitrejše odzivne čase kot LCD zasloni. Medtem ko imajo standardni LCD zasloni v povprečju 2-8 milisekund odzivnega časa, imajo OLED zasloni manj kot 0.01 milisekund odzivnega časa. OLED tehnologija tako z vsemi svojimi značilnimi lastnostmi predstavlja pravo tehnologijo za fleksibilne zaslone. OLED zaslone v grobem delimo v aktivno matrične in pasivno matrične.

2.5.1.1 Tehnologija materiala

Kot elektro-optični materiali v OLED zaslonih se uporabljajo organski materiali, ki ob prisotnosti električne napetosti oddajajo svetlobo. Temu pojavu pravimo elektroluminiscenca (EL). Obstajata dve tehnologiji materiala, in sicer tehnologija majhnih molekul (SMOLED) in tehnologija prevodnih polimerov (PLED). Izdelava SMOLED zaslonov zahteva vakuumsko nanašanje molekul. Ta proizvodnja tehnika je veliko dražja kot ostale proizvodnje tehnike nanašanja. Nanašanje se izvršuje na steklenih podlagah, zato taki zasloni niso fleksibilni.

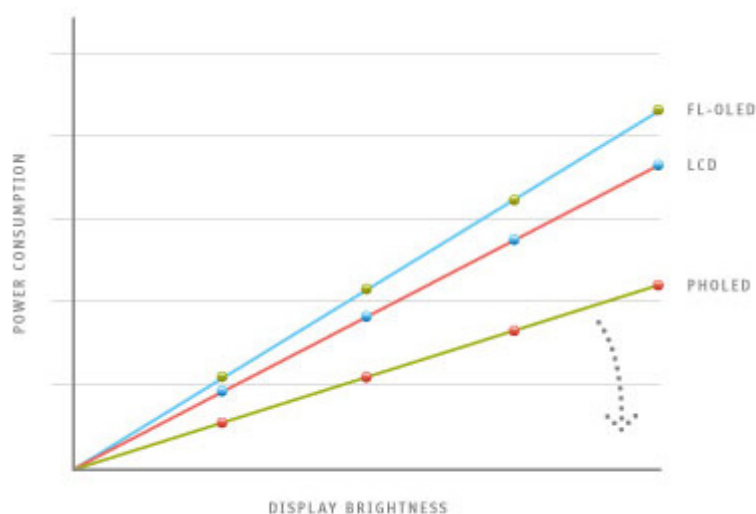
PLED vsebuje neprevodni polimer, vsebovan s prevodnimi molekulami, ki oddajajo svetlobo. S tem ima plast lastnost polprevodnika. Majhne molekule ob prisotnosti električne napetosti oddajajo svetlobo in imajo enako življenjsko dobo kot pri SMOLED zaslonih. Tu ni potrebno vakuumsko nanašanje emisivnih materialov, temveč se uporablja preprosta tehnika nanašanja oziroma vbrizgavanja. Zaradi te procesne tehnike, ki zahteva majhno temperaturo, je lahko podlaga iz gibljivega substrata. Taki fleksibilni PLED zasloni, imenovani tudi FOLED, so primerni za »roll-to-roll« proizvodnjo in bi lahko bili zato proizvedeni veliko ceneje.

Fleksibilni OLED zasloni so tanki, lahki in čvrsti. Sama fleksibilnost OLED zaslonov omogoča večjo svobodo pri proizvodnji aplikacij s takimi zasloni. Trije najpogostejši emisivni polimeri so PPV (polifenilenvinilen), MEH-PPV in PF (polifluoren).



Slika 13: Emisivni polimeri (povzeto po [4]).

Številni faktorji vplivajo na učinkovitost elektroluminiscence. Običajna fluorescentna tehnologija materialov (FL-OLED) pretvori približno 25% električne energije v svetlobo, ostalo se izgubi kot toplota. Z razvojem fosforescentne OLED tehnologije (PHOLED) so se učinkovitosti OLED materialov močno povečale. Ti fosforescentni materiali lahko pretvorijo do 100% električne energije v svetlobo brez izgub. Fosforescentna OLED tehnologija je tako do štirikrat bolj energijsko učinkovita kot običajna fluorescentna tehnologija in se lahko primerja tudi z LCD tehnologijo, kjer je 90% svetlobe iz ozadja zmanjšane zaradi mreže barvnega filtra ter z drugimi komponentami zaslona.

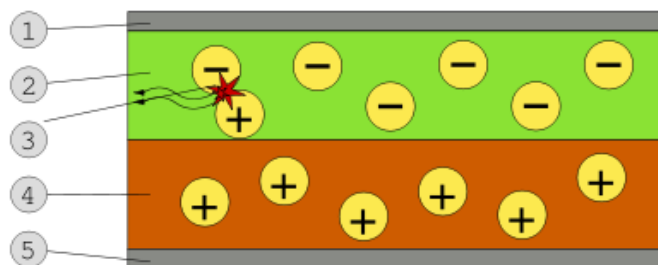


Slika 14: Primerjava porabe energije med PHOLED, LCD in FL-OLED: PHOLED porabi do 50% manj energije v primerjavi z FL-OLED ter 40% manj energije v primerjavi z današnjimi LCD napravami (povzeto po [7]).

Energija, ki se ne pretvori v svetlobo, se oddaja kot toplota. Zaradi visoke izkoriščenosti električne energije za proizvodnjo svetlobe, se PHOLED zasloni manj grejejo, posledično pa se daljša življenjska doba emisivnih materialov.

2.5.1.2 Princip delovanja in zgradba PLED zaslonov

Tipična PLED struktura je sestavljena iz emisivne plasti, prevodne plasti (transportne plasti – HITL – angl. Hole Injection Transport Layer), fleksibilnega substrata, anode in katode. Kot emisivna plast se uporablja prevodni polimer z organskimi molekulami (mešanica polimera in organskih molekul), kot prevodna plast pa prevodnik PEDT. Anoda je prozorna in brezbarvna plast tankega indijskega kositrnega oksida. Katodo pogosto sestavljata kovini kot sta aluminij ter kalcij.



Slika 15: 1. katoda (-), 2. emisivna plast, 3. oddajanje svetlobe (žarčenje), 4. prevodna plast, 5. anoda (+) (povzeto po [9]).

Ko je PLED pod napetostjo električnega toka, je anoda pozitivna glede na katodo. To povzroča tok elektronov preko plasti od katode do anode. Elektroni nosijo negativni električni naboj. Katoda daje elektrone v emisivno plast, anoda pa daje elektronske luknje v prevodno plast. Elektronske luknje nosijo pozitivni naboj. Kmalu postane emisivna plast negativno nabita, prevodna plast pa pozitivno nabita. Elektrostatične sile povlečejo elektrone in elektronske luknje skupaj in ti se ponovno združijo. Ta združitev se zgodi bližje v emisivni plasti, ker so organske polprevodniške luknje bolj gibčne kot elektroni. Združitev povzroči padec energije elektronov in s tem oddajanje svetlobe. Zato pravimo tej plasti emisivna plast, pojavu pa elektroluminiscenca.

2.5.1.3 Aktivna matrika in zaščita PLED zaslonov

Aktivno matrična sestava PLED zaslonov predstavlja še velike probleme za komercializacijo. Zaenkrat so bili razviti samo prototipi PLED zaslonov.



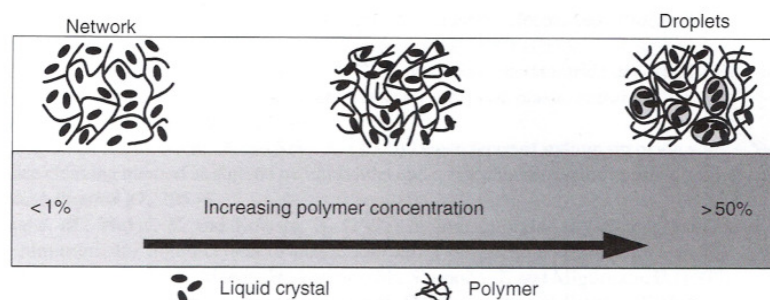
Slika 16: Primer prototipa gibljivega PLED zaslona: prvi visoko ločljivi aktivno matrični OLED zaslon zasnovan na fleksibilni kovinski foliji z uporabo aktivne matrike iz amorfnega silicija (a-Si) in PHOLED tehnologije. To je barvni zaslon z 100 ppi in ima 256 odtenkov na barvo (8 bit). Ta prototip je bil prikazan leta 2007 na srečanju »Society for Information Display Conference and Symposium« v Kaliforniji (povzeto po [7]).

Dokler ne bo tankoplastno tranzistorsko vezje na plastičnih substratih dovolj razvito, bodo PLED naprave omejene na majhne zaslone, in sicer s pasivno matrično sestavo.

Organski emisivni materiali so zelo občutljivi na kisik in vlago. Področja, ki so izpostavljena kisiku in vlagi, propadejo in postanejo nedejavna oziroma neaktivna. Na zaslonu se taka področja vidijo kot črne pike. Zato morajo substrati ščititi notranjost takih zaslonov pred zunanjimi vplivi. Polimerni substrati tipično prepuščajo na dan 1-10 g/m² vode in približno 1-10 mL/m² kisika. OLED zasloni pa zahtevajo na dan največ 10⁻⁶ g/m² vode in 10⁻⁶ mL/m² kisika, da ostanejo še funkcionalni. Tako noben polimer ne ustreza pripisanim zahtevam PLED zaslonov. Zato je za dobro stabilnost in funkcionalnost PLED zaslonov nujno potrebna večplastna zaščita. Ker so zaščitne plasti iz neorganskih materialov, lahko pri upogibanju počijo. S tem se poveča že tako zaskrbljujoča prepustnost zaslona. Razvoj zaščitnih plasti za PLED zaslon je tako velik izziv za razvijalce. Pri steklenih substratih teh težav ni. Zaščitni učinki materialov, ki sestavljajo zaslon, omejujejo življenjsko dobo PLED naprav in predstavljajo precejšnjo oviro za komercializacijo PLED zaslonov.

2.5.2 Polimerno dispergirani tekoči kristali

Razpršitev tekočih kristalov in polimerov omogoča široko skupino materialov, kjer je lahko koncentracija polimerov večja od 80% ali pa manjša od 2%, odvisno od tipa polimera in aplikacije. Tipično je koncentracija polimerov od 30 do 50 %, kjer so tekoči kristali v obliki kapljic oziroma področij naključno razporejeni preko polimernih vezi. Tem materialom se reče polimerno dispergirani tekoči kristali (PDLC), postopku pa polimerna disperzija tekočih kristalov. V primeru nizke polimerne koncentracije polimer tvori mrežo razpršeno v tekočih kristalih, pri veliki koncentraciji pa tvori kapljičasto strukturo tekočih kristalov. Tip polimera in njegova koncentracija narekuje elektro-optične lastnosti zaslona.

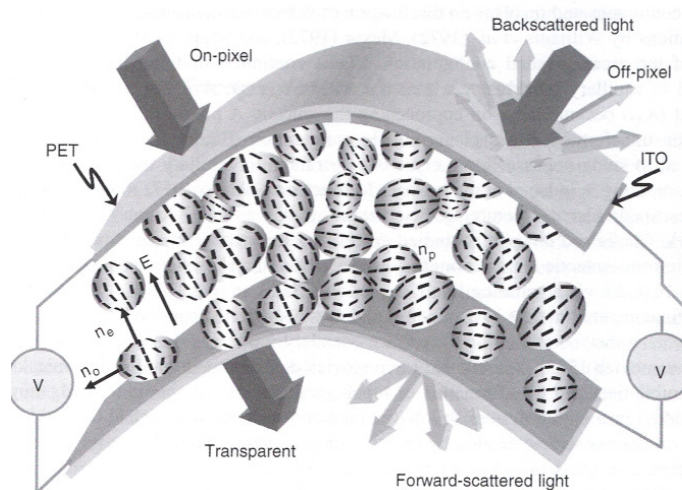


Slika 17: Shematičen prikaz koncentracije polimera v disperziji tekočih kristalov: pri nižji koncentraciji polimer tvori mrežo tekočih kristalov, z večanjem koncentracije pa se začnejo tvoriti kapljičaste strukture tekočih kristalov (povzeto po [4]).

Številne naprave, ki uporabljajo take materiale, niso dosegle komercialnega uspeha zaradi različnih vzrokov. Eden od večjih vzrokov je uporaba visoke električne napetosti teh naprav v primerjavi z običajnimi napravami tekočih kristalov. Svetlobni modulatorji (ki uravnavajo svetlobo po principu PDLC) in odsevne naprave, osnovane na PDLC razprševanju, imajo prednost pred drugimi tekoče kristalnimi tehnologijami, ker ne potrebujejo za delovanje dodatnih optičnih premazov, kot so polarizatorji, antiodbojne plasti, itd.

2.5.2.1 Princip delovanja PDLC zaslonov

Transparentno stanje nastane, ko je električno polje dovolj močno, da uvrsti kapljice tekočih kristalov tako, da je njihova smer lomljenja svetlobe ista s smerjo lomljenja svetlobe polimera, in tako gre svetloba skozi PDLC film skoraj nemoteno. Ko odstranimo električno polje, se kapljice kristalov postavijo v originalno razpršeno stanje. To je stanje, ko so smerne osi kapljic različne in niso skladne s smerjo lomljenja svetlobe polimera.



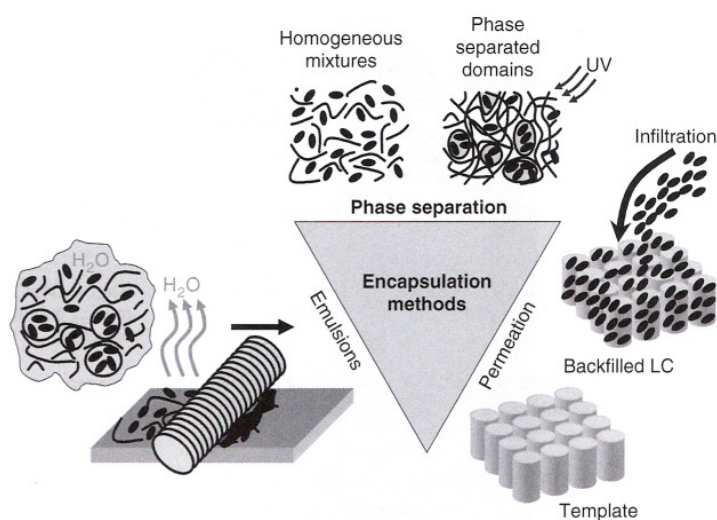
Slika 18: Delovanje PDLC v transparentnem stanju (ON - levi piksel) in v razpršenem stanju (OFF - desni piksel). V prozornem stanju je prisotna električna napetost na pikslu, ki uvrsti oziroma uredi tekoče kristale znotraj kapljic tako, da je njihov lomni količnik enak lomnemu količniku polimera. V razpršenem stanju so simetrije osi kapljic naključno orientirane. Lomni količnik polimera in kristalov se ne ujema. Piksel je prosojen (povzeto po [4]).

2.5.2.2 Tehnike pršenja tekočih kristalov in polimera

Poznamo tri osnovne načine pršenja tekočih kristalov in polimerov. Pri procesu fazne separacije se mešanico tekočih kristalov in fotoreaktivnih monomerov izpostavi ultravijolični svetlobi in s tem se povzroči fotopolimerizacija. Ko polimerizacija napreduje, se tekoči

kristali po fazah združijo v kapljice. Velikost kapljic in njihova oblika je odvisna od polimerizacije. Drug način je uporaba procesa, osnovanega na vodi, kjer se tekoči kristali in polimer razpršijo v mokro okolje. Polimer je tipično topljiv v vodi. Emulzija je nato nanošena na substrat. Ko voda izhlapi iz tanke plasti, se oblikuje tanka polimerna plast, ki omogoča zaščito kapljic tekočih kristalov. Pri zadnjem pristopu je celoten proces izveden z »roll-to-roll« proizvodnjo. Ta proces vključuje nanos polimerne zmesi na prevoden substrat (PET/ITO), nato se v ta polimer vdolbe luknjice in se jih napolni s tekočimi kristali. Po polnitvi se površino zamaši in prekrije z drugo prevodno plastjo (ITO/PET). Temu procesu pravimo »Microcup« proces.

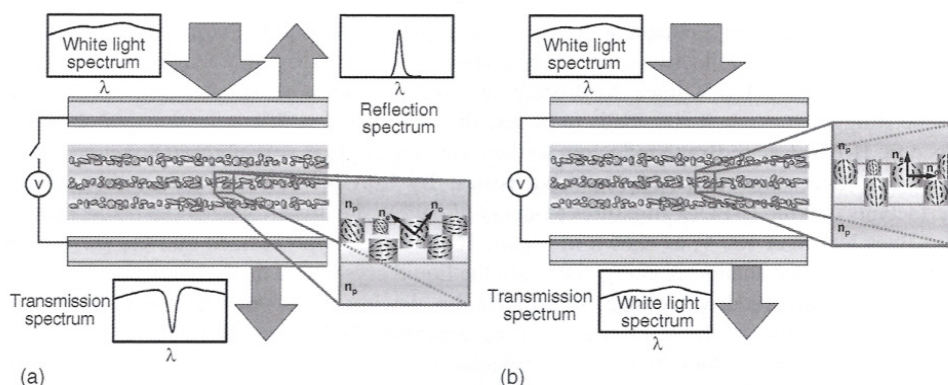
Pri metodi fazne separacije se kapljice oblikujejo potem, ko je material nanešen na substrat, pri emulzijskem procesu pa so kapljice oblikovane pred nanosom.



Slika 19: Metode pršenja tekočih kristalov in polimera: metoda, osnovana na vodi (levo), metoda fazne separacije (zgoraj) in (desno) metoda »Microcup« (povzeto po [4]).

2.5.2.3 Holografski PDLC

Holografski PDLC (H-PDLC) so različica običajnih PDLC. H-PDLC so iz periodične strukture, ki vsebuje izmenično polimerne in tekoče kristalne plasti (LC-plasti). Periodična struktura H-PDLC ponuja edinstvene odsevne lastnosti. Zaradi večplastne strukture zelo dobro odbija svetlobo. Če se smernice tekoče kristalne plasti in polimernih plasti razlikujejo, je zaslon v »off« načinu (odbija svetlobo), če pa sovpadajo, je v »on« načinu (prepušča svetlobo). H-PDLC zaslone so primerni za barvne odsevne zaslonske aplikacije.



Slika 20: Dve stanji holografskega PDLC zaslona: (a) zaslon je v OFF načinu in odbija svetlobo, (b) zaslon je v ON načinu in prepušča svetlobo (povzeto po [4]).

Obstajajo dve izraziti pomanjkljivosti H-PDLC, ki ovirajo njihovo uporabo v odsevnih zaslonih aplikacijah. Prvič, napetost, potrebna za delovanje H-PDLC, je pogosto preko 100 V zaradi majhnosti kapljic. Drugič, vidni kot H-PDLC zaslonov je zelo ozek. Z izboljšavami na napetosti in vidnega kota bo lahko H-PDLC kandidat za fleksibilne odsevne barvne zaslone.

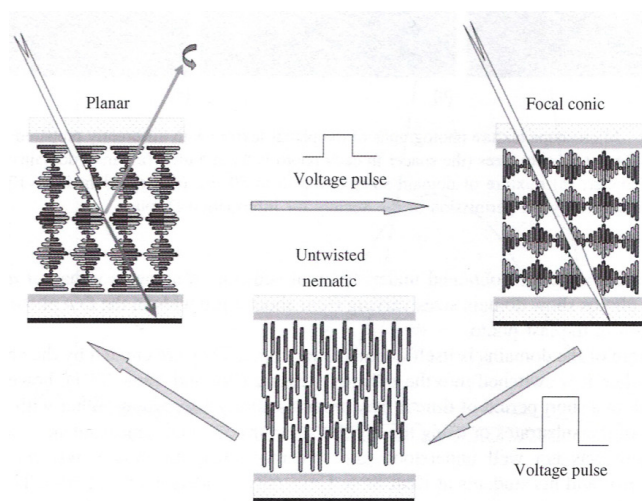
2.5.3 Kolesterični odsevni zaslani

Bistabilni kolesterični odsevni zaslani so bili prvič uvedeni že leta 1991. Sestavljajo jih polimerno dispergirani kiralni tekoči kristali. Značilnost teh materialov je v tem, da imajo spiralno strukturo, kjer so smeri tekočih kristalov zasukane okoli spiralne osi za 360° . Kolesterični material ima vse značilnosti potrebne za poceni fleksibilne zaslone. Ti materiali ne potrebujejo aktivne matrice za zaslone z visoko resolucijo. Bistabilnost in odsevnost kolesteričnih materialov omogočata zelo nizko porabo električne energije za delovanje zaslona. Materiali so primerni za barvne odsevne zaslone in za delovanje pri velikih temperaturnih obsegih. Za proizvodnjo kolesteričnih bistabilnih odsevnih zaslonov se uporablja emulzijski proces in proces fazne separacije.

2.5.3.1 Princip delovanja kolesteričnih tekočih kristalov

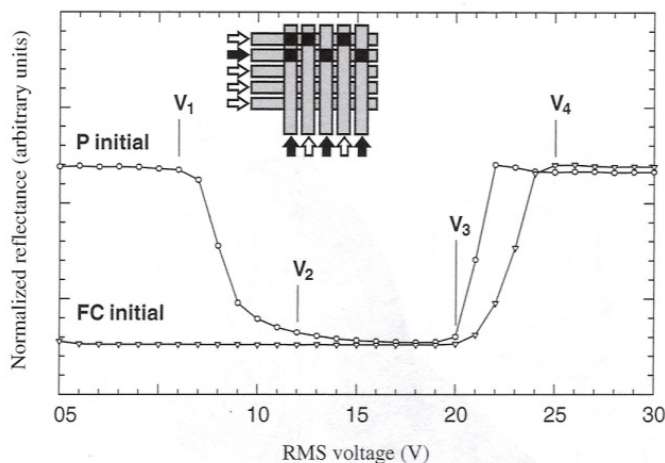
Če se omejimo na celico oziroma piksel zaslona, je lahko kolesterični material električno prestrukturiran v eno od dveh stabilnih struktur, in sicer planarno (angl. *planar*) ali sferično (angl. *focal conic*). V planarni strukturi so spiralne osi usmerjene pravokotno na substrat zaslona. Vpadna nepolarizirana svetloba se razčleni na dve krožno polarizirani komponenti z različnima smerema. Ena komponenta se odbije, ena pa prodre skozi kolesterični material. Ta

selektivno odbita svetloba je posledica spiralne strukture kiralnih tekočih kristalov. S povzročitvijo nizko-napetostnega pulza na elektrodah substrata se spremeni orientacija spiralnih osi vzporedno na substrat in nastane sferična struktura. Ta struktura je izredno stabilna in je prozorna za vse valovne dolžine. Nato povzročen visoko napetostni pulz razplete kolesterični material in z odstranitvijo pulza se material prestrukturira nazaj na planarno strukturo. Pikel v svetlem stanju odbija svetlobo, v temnem stanju pa jo prepušča. V temnem stanju se svetloba absorbira na črni plasti pod kolesteričnim materialom.



Slika 21: Prikaz celice v planarnem in sferičnem stanju in njen odziv na napetostni impulz (povzeto po [4]).

Pomembna značilnost kolesteričnih materialov je ta, da bistabilnost nastane z napetostnim pragom. Ta prag je pomemben, da se izognemo potrebi po aktivni matriki. Odsevni zaslon z osnovno resolucijo je sestavljen iz enostavne pasivne matrike, pri čemer se posamezne pike zaslona naslavlajo z napetostnim pragom. Napetostni pulzi upravljajo kolesterični material med planarnimi in sferičnimi stanji. Če je material prvotno v planarni strukturi, nizkonapetostni pulz začne preklapljati material (posamezne kapljice) v sferična stanja, ko doseže napetostno mejo V_1 (glej sliko 22). Nad to mejo je področje sivine, kje se odbojnost zaslonskih pik začne manjšati z večanjem V_1 , ker se kapljice v zaslonskih pikah postopoma preklaplajo iz planarnih v sferična stanja. Pri napetosti V_2 so vse kapljice preklopljene v sferična stanja. Slika na sivem nivoju je prav tako stabilna kot brez sivine. Ta sivina omogoča barvne odsevne zaslone. Obratno se dogaja pri napetosti med V_3 in V_4 . Pri višjem napetostnem pulzu kot je V_4 se material v celoti preklopi iz sferičnega v planarno stanje.



Slika 22: Prikaz delovanja kolesteričnega zaslona: pri napetostnem pragu V_1 se začnejo kapljice tekočih kristalov postopoma z večanjem napetostnega pulza preklapljati iz planarjih v sferična stanja. Pri V_2 so vse kapljice v sferičnem stanju. Obratno se zgodi pri napetosti med V_3 in V_4 (povzeto po [4]).

Kolesterični material se torej z električnimi pulzi v celoti ali deloma preklaplja iz ene strukture v drugo in s tem nastajajo sivine.

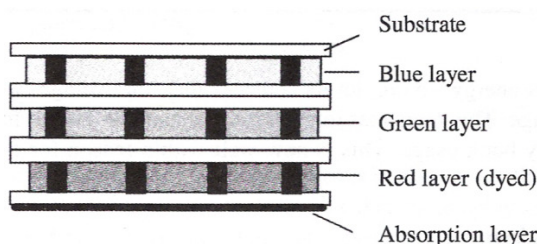
2.5.3.2 Fleksibilnost zaslona in optične lastnosti

Za realizacijo fleksibilnih kolesteričnih zaslonov je potrebna kapljičasta struktura tekočih kristalov. Kolesterični materiali, omejeni s kapljicami, so nujni za ohranitev bistabilnega stanja, ko material upogibamo. Razpršitev kapljic omogoča sliko na zaslonu, da je odporna proti pritiskom in upogibanju. Ker je kolesterični material omejen z kapljicami, ne more preiti iz enega piksla v drugega. Zato ni potrebno ograjevati pikslov, kot jih tipično v drugih tehnologijah kristalnih zaslonov.

S povečanjem gostote kapljic se poveča vidni kot zaslona pod tipičnimi svetlobnimi pogoji. Vsaka kapljica ima rahlo različno orientacijo oziroma smer spiralne osi (osi kapljic so rahlo raztresene), kar predstavlja različne odbojne kote za svetlobo. Zaradi tega se poveča vidni kot zaslona. S povečanjem gostote kapljic se poveča razpršenost odbite svetlobe in daje zaslonu videz papirja. To je zelo dobra lastnost za naprave, kot so elektronske knjige. Na boljšo jasnost zaslona lahko vplivamo s povečanjem kapljic. Vendar s povečanjem jasnosti posledično zmanjšamo vidni kot zaslona. Zato je potrebna za dober vidni kot in jasnost optimalna velikost kapljic. Zaslon mora biti dovolj debel, da lahko odbije vso vpadno svetlobo. Če je kolesterični material pretanek, razpršena svetloba pri sferičnem stanju zmanjša kontrast zaslona. Zato je potrebno najti neko optimalno debelino kolesteričnega materiala. Kontrast zaslona je prvotno kontroliran s prepustnostjo sferičnega stanja, na katero vpliva stopnja razpršene svetlobe. Kontrast zaslona se lahko izboljša tako, da je črno ozadje, ki absorbira oziroma vsrkava svetlobo, čim bližje kolesteričnemu materialu.

2.5.3.3 Barvni zaslon

Obstajata dva principa za barvne kolesterične odsevne zaslone. Pri prvem načinu so rdeči, zeleni in modri odsevni piksli nakopičeni eden vrh drugega. Ker ima lahko vsaka barva svojo sivino, je možen barvni zaslon. Ta zaslon je trikrat jasnejši kot zaslon, izdelan po drugem principu, kjer je vsak piksel razdeljen na zeleno, modro in rdečo barvo. Tu je uporabna samo tretjina področja za odsev posamezne barve, kar omogoča samo tretjino jasnosti. Vendar ima drugi princip prednost pred prvim, ker uporablja samo dva substrata in zato potrebuje manj elektronskih povezav.



Slika 23: Zgradba barvnega zaslona, kjer so modri, zeleni in rdeči piksli nakopičeni eden vrh drugega. Vsak piksel je obdan z dvema substratoma (povzeto po [4]).

Prve prototipe barvnih visoko resolucijskih kolesteričnih zaslonov na plastičnih substratih so razvili že leta 1998, vendar fleksibilni kolesterični zaslone ne bodo dosegli trga, dokler ne bodo materiali prilagojeni za procese nanašanja, primerne za proizvodnjo.

2.5.4 Fleksibilni LCD zaslone

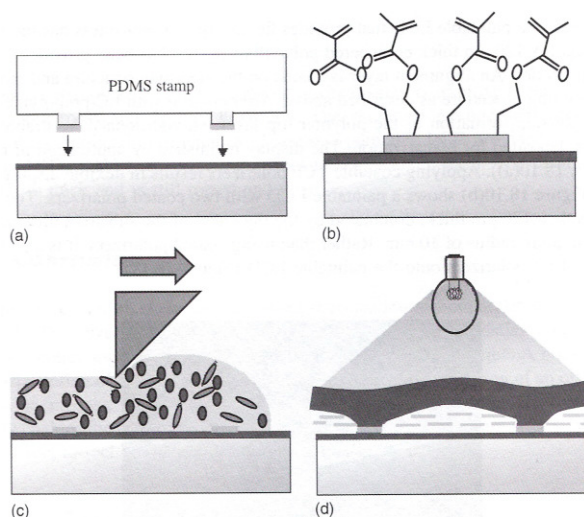
Razviti so bili že številni prototipi fleksibilnih barvnih aktivno matričnih LCD zaslonov, ki so delovali po istem principu kot običajni LCD zaslone. Izdelani so bili tako odsevni, kot tudi transmisivni fleksibilni LCD zaslone. Bili so velikosti od 1.5 palca do 4 palcev in so imeli enake optične in funkcionalne lastnosti kot običajni LCD zaslone. Sestavljeni so bili iz dveh PES substratov. Tankoplastno tranzistorsko vezje je bilo osnovano na amorfnem siliciju in nizko temperaturnem polisiliciju. Za oblikovanje celic oziroma pikselov so bile uporabljene posebne pregrade. Te pregrade so bile iz mehkih kroglic, ki so pod pritiskom (pri upogibanju) spreminjale obliko in debelost. Plast tekočih kristalov je bila z vseh strani zamašena oziroma zaščitena s posebnim pečatom. Ti zaslone ne bodo doživeli komercialnega uspeha, dokler ne bo razvita učinkovita fleksibilna aktivna matrika. Problem predstavlja tudi omejena fleksibilnost. Pri upogibanju zaslona namreč nastajajo notranje sile, ki so osredotočene na pečat v plasti tekočih kristalov. Pečat pri upogibanju počne in zaslon se uniči.

Razvita je bila nova tehnologija proizvodnje, pri kateri je zaslon sestavljen iz enega substrata namesto dveh, zato omogoča izredno tankost, prilagodljivost in fleksibilnost. Glavni proces omogoča kopičenje plasti in tvori tanke, s polimerom prekrivane plasti tekočih kristalov. Procesu se reče »photoenforced stratification« ali drugače PES. Ker ta tehnologija temelji na enostavnem nanašanju plasti, je proizvodni proces relativno enostaven in hiter, in je primeren tako za negibljive kot tudi za fleksibilne substrate.

2.5.4.1 Tehnologija PES

Osnova tehnologije PES je usmerjeno nadzorovanje polimerizacije - povzročitev procesa fazne separacije. Na substrat se nanese tanka plast sestavljenega materiala (zmes tekočih kristalov in monomerov). Ta plast materiala je nato izpostavljena ultravijolični svetlobi. Fotopolimerizacija prevladuje tam, kjer je UV jakost oziroma intenzivnost največja, se pravi na površju plasti, ker je bližja UV viru. Lokalna poraba in posledično izpraznitev monomerov povzroča razpršitev monomerov iz dna plasti proti površju in hkrati razpršitev molekul tekočih kristalov v obratno smer. V trenutku fazne separacije se začnejo tvoriti kapljice tekočih kristalov na dnu plasti. S tem nastanejo dve plasti, spodaj plast tekočih kristalov in zgoraj plast polimera.

Za boljše optične lastnosti LCD zaslona mora biti plast tekočih kristalov bolj urejena oziroma enotna. S spreminjanjem polimerizacijskih pogojev se ne izboljša enotnost plasti tekočih kristalov. To naredimo tako, da rast in združevanje kapljic tekočih kristalov omejimo v majhne predele oziroma bokse. S posebnim postopkom umestitveno plast lokalno prikrojimo s posebnimi podporniki, ki vsebujejo snovi, ki reagirajo s polimerom med polimerizacijo. Ta proces spremeni samo izbrana področja, in ne spremeni ali poškoduje umestitvenih lastnosti plasti v nespremenjenih področjih. Ko prekrijemo spremenjeno umestitveno plast z zmesjo tekočih kristalov in monomerov, z enim samim UV žarčenjem proizvedemo strukturo, ki je predstavljena na sliki 24 (d). S tem ne poenostavimo samo proizvodnega procesa, temveč tudi povečamo čvrstost zaslona.

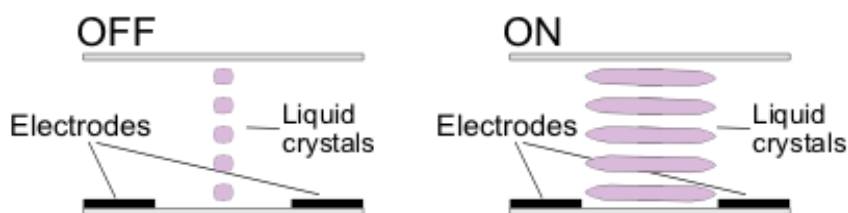


Slika 24: Postopek PES: (a) na umestitveno plast lokalno pritrdijo podpornike, (b) podporniki vsebujejo snov, ki reagira s polimerom med polimerizacijo, (c) nanos mešanice monomerov in LC, (d) UV žarčenje in nastanek boksov z LC (povzeto po [4]).

2.5.4.2 Zgradba in delovanja LCD zaslona, osnovanega na PES tehnologiji

Fleksibilni LCD zaslon je narejen na plastičnem substratu, ki je opremljen s prepletanima elektrodama in prekrit z umestitveno plastjo. Na to strukturo se s PES postopkom tvori plast tekočih kristalov in polimerno plast. Nato se s posebno plastjo zgladi zgornja neravna plast polimera, ki je nastala pri PES postopku. Sledi premaz, ki mehansko in kemično zaščiti spodnjo strukturo pred nadaljnjim procesnim postopkom. Z nanosom polarizatorjev se zaključi LCD zaslon.

Elektrodi, ki sta prepleteni na substratu, omogočata IPS naslavljanje zaslona. Pri IPS naslavljanju se posamezne piksele naslavlja s strani. Zato so tekoči kristali v zaslonu vedno poravnani vzporedno s površino zaslona. Ko je v pikslu prisotna električna napetost, se kristali zasukajo za 90° . Piksel je sedaj v aktivnem stanju (stanje ON) in prepušča svetlobo iz ozadja. V nasprotnem primeru, ko ni prisotne električne napetosti, piksel ne prepušča svetlobe iz ozadja in je v pasivnem stanju (stanje OFF). Iz slike 25 je razvidno, da se IPS matrika razlikuje od navadne matrike ne samo po strukturi kristalov, temveč tudi po načinu naslavljanja. Tu sta obe elektrodi na eni (spodnji) strani piksla, in sicer na levi in desni strani.



Slika 25: Princip delovanja zaslonov z IPS naslavljanjem: v pikslu ni prisotne električne napetosti, zato ne prepušča svetlobe (levo), v pikslu je prisotna električna napetost, kristali se zasukajo za 90° in piksel prepušča svetlobo.

2.5.5 Elektronski papir

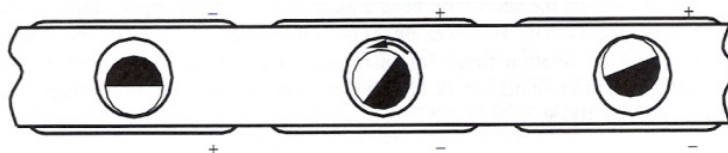
Elektronski papir je prikazovalnik, tehnološko ustvarjen, da oponaša videz običajnega črnila na papirju. Za razliko od običajnih tankih zaslonov, ki uporabljajo osvetljevanje za prikaz pik, elektronski papir odbija svetlobo kot običajni papir in je sposoben hraniti tekst in sliko brez električnega napajanja. Zaradi tega porabi zelo malo električne energije za delovanje. Sama tehnologija elektronskega papirja omogoča odlično fleksibilnost zaslona, pri katerem se slika ne popači ob dotiku ali pri upogibanju. Kljub dobremu kontrastnemu razmerju, širokemu vidnemu kotu, lahкости in odpornosti, mu še vedno primanjkuje dobro barvno prikazovanje. Velika omejitev elektroforeznih zaslonov je njihov odzivni čas. Elektronski papir ne potrebuje tako močne zaščite pred vodo in kisikom kot OLED zaslon. Za izdelavo elektronskega papirja obstaja kar nekaj tehnologij. Do sedaj so proizvajalci zaslonov uspeli samo s tehnologijo elektronskega papirja ustvariti velike fleksibilne zaslone. Trenutno največji elektronski papir, izdelan na Japonskem, je sestavljen iz 272 modulov in je skupno velik 1.2×2.6 metra.

Celoten proizvodni proces elektronskega papirja je popolnoma izvedljiv, dozorel in pripravljen za neomejeno masovno proizvodnjo. Za proizvodnjo samega elektronskega papirja se uporablja tako imenovani »roll-to-roll« proces, ki se nadaljuje z razrezom v različne oblike in velikosti in na koncu s prekrivanjem z zaščitnimi plastmi in vgrajevanjem elektronskega vezja.

2.5.5.1 Gyricon

Prvi elektronski papir, imenovan kot Gyricon, je izdelal Nick Sheridan v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Razvit je bil v podjetju Xerox PARC, ki je bilo ustanovljeno leta 1970. Sestavljen je iz polietilenskih kroglic velikosti med 20 in 100 mikrometra. Vsaka kroglica je sestavljena iz črne in bele poloble, ki sta različnih nabojev. Te kroglice so vgrajene v prozorno gumijasto plast, kjer je vsaka kroglica obdana z oljnim mehurčkom, kar omogoča, da se kroglice prosto rotirajo. Polarnost (pozitivna ali negativna napetost) med dvema

elektrodama omogoča, da se te kroglice rotirajo glede na naboj in prikazujejo črne ali bele pike na zaslonu. Vsaka kroglica se lahko rotira za največ 180° . Sivina je dosežena z delno rotacijo kroglic ($<180^\circ$). Ko ni napetosti, kroglice ohranjajo položaj.

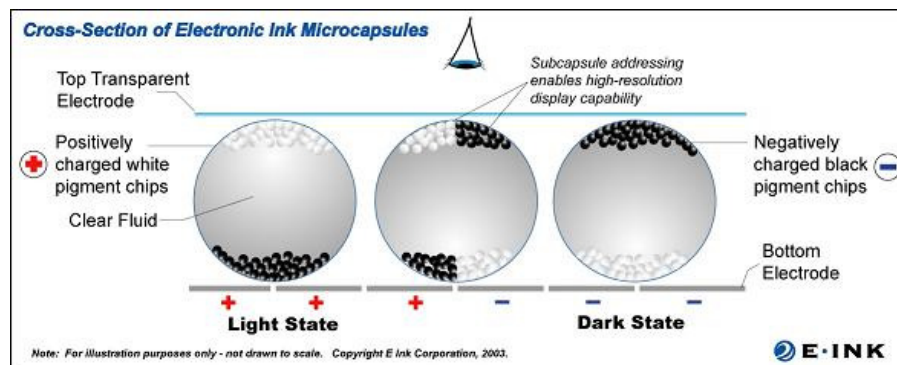


Slika 26: Zgradba zaslona Gyricon: sestavljen je iz kroglic, ki so razpršene v prozoren gumijast film. Vsaka kroglica je obdana z oljnim mehurčkom, ki je prozoren in neprevoden. Kroglice vsebujejo dve barvi, vsaka barva ima različen naboj. Pod vplivom električnega polja se kroglice rotirajo (povzeto po [4]).

Zaslon Gyricon je izredno visoko-uporna naprava, zato je splošno potrebno za delovanje takega zaslona 80 V napetost. Kljub dejstvu, da je Gyrison bistabilen in da potrebuje za delovanje napetostni prag, ni primeren za pasivno naslavljanje, ker se posamezne kroglice primerno odzivajo na napetostni prag, kot skupina pa ne. Za omogočanje aktivno matričnega naslavljanja v Gyricon zaslonih so potrebovali dodatne visoko napetostne gonilnike vgrajene v zadnjo stran vezja. Decembra 2005 je podjetje Xeros prenehalo s proizvodanjem in prodajanjem izdelkov iz Gyricon elektronskega papirja.

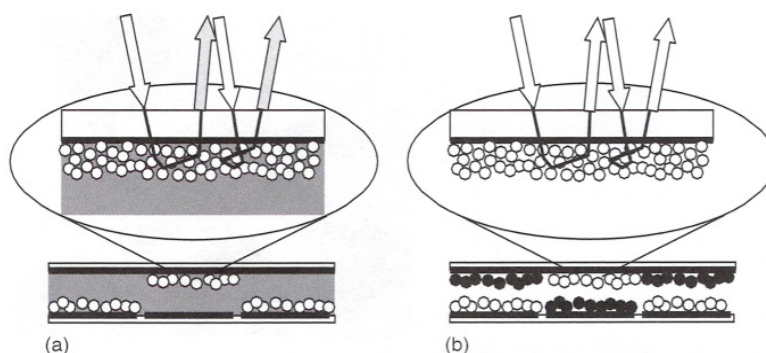
2.5.5.2 Elektroforezni fleksibilni elektronski papir

Elektroforezni elektronski papir deluje po principu elektroforeze. Elektroforeza je prenos nabitih delcev v tekočini v odvisnosti od električnega polja. V devetdesetih letih prejšnjega stoletja je Joseph Jacobson odkril nov tip elektronskega papirja. Kasneje je so-ustanovil podjetje E-Ink, to pa je dve leti kasneje oblikovalo sodelovanje s podjetjem Philips. Ta tip elektronskega papirja uporablja tehnologijo majhnih prozornih mikrokapsul, velikosti okoli 40 mikrometrov, napolnjenih z belimi titanskimi dioksidnimi delci, razpršenimi v obarvani tekočini. Ti delci so rahlo negativno nabiti. Mikrokapsule so vgrajene v plast prozornega polimera, obdanega z dvema elektrodama. Zgornja elektroda je narejena iz prozornega in prevodnega materiala, indijskega kositrnega oksida. Spodnja elektroda je razdeljena na dele oziroma piksele. Ko je uporabljena napetost na teh dveh elektrodah, se beli delci premaknejo k elektrodi z nasprotno nabitim nabojem. Svetla področja na zaslonu povzročajo beli delci (beli delci so na sprednji strani zaslona), temna področja pa obarvana tekočina (beli delci so na zadnji strani zaslona).



Slika 27: Zgradba mikrokapsul z dvojno strukturo delcev – črno in beli delci (povzeto po [3]).

V podjetju E Ink so kasneje razvili mikrokapsule, ki so vsebovale pozitivno nabite bele delce in negativno nabite črne delce, vsebovane v prozorni tekočini. Ko je uporabljena napetost na elektrodah, se beli in črni delci ustrezno premaknejo k elektrodi z nasprotno nabitim nabojem. Svetle pike na zaslonu povzročajo beli delci, temne pike pa črni delci. Ta izvedba je povečala kontrast zaslona. Pri sistemu delci/barvilo se svetloba razprši oziroma odbije od belih delcev, da doseže svetlo stanje, vendar je med špranjami belih delcev ostanek olja, ki povzroča odsev oziroma odboj umazane oziroma potemnjene bele barve. To bi lahko izboljšali z zmanjšanjem koncentracije barvila, vendar bi s tem uničili temno stanje (pika ne bi bila čisto črna). Omenjeni problem bi nadalje lahko rešili s povečanjem širine reže med elektrodama, vendar bi s tem povzročili večji odzivni čas zaslona. Zato ti zasloni trpijo s tremi vzajemnimi omejitvami: kvaliteto svetlega stanja, kvaliteto temnega stanja in odzivnim časom zaslona. Zasloni, osnovani na mikrokapsulah z črnimi in belimi delci, teh težav nimajo in omogočajo velik kontrast zaslona.

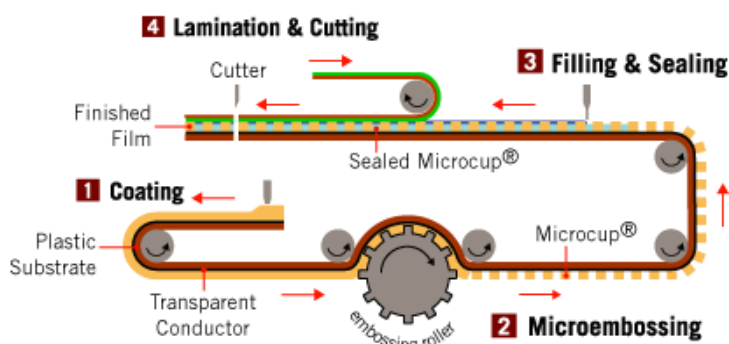


Slika 28: Mikrokapsuli z enojno in dvojno strukturo delcev: (a) med špranjami belih delcev ostaja barvilo, zato je odbita svetloba umazana – potemnjena bela barva, (b) odbita svetloba je čisto bela (povzeto po [4]).

Sivina E-Inkovih zaslonov je dosežena z delnim naslavljanjem med črnimi in belimi stanji. Ta metoda je skupna številnim elektroforeznim zaslonom. Sivine so prav tako bistabilne, tako da je tak zaslon naslovljiv samo ob spremembi slike. Uporaba mikrokapsul je omogočila

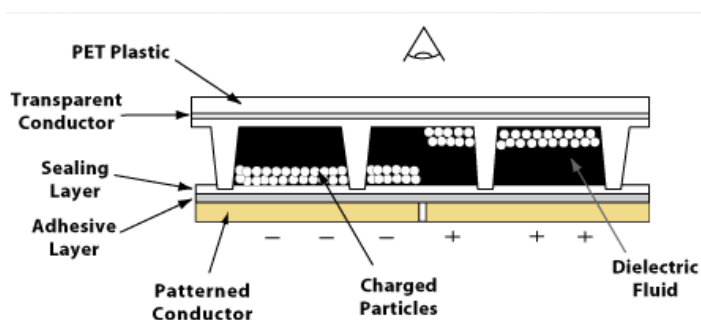
fleksibilne zaslone, osnovane na plastičnih substratih namesto na steklu. Z zmanjšanjem debeline zaslona in z dvojno strukturo delcev se je zelo izboljšala odzivnost zaslona pri nižji napetosti. Pred kratkim je bil razvit E-Inkov film z odzivnim časom 50 ms pri napetosti 15V. Ker so mikrokapsule izredno majhne, omogočajo zelo veliko resolucijo zaslona, ki je lahko velika tudi preko 165 dpi in je odvisna od resolucije, ki jo omogoča aktivno matrično vezje. Elektroforezni zasloni zaradi izredne majhnosti mikrokapsul omogočajo zelo dobro resolucijo, ki presega 300 dpi. Vendar je resolucija pri teh zaslonih omejena zaradi resolucije elektrode same in vezja. Pri aktivno matričnih elektroforeznih zaslonih je torej resolucija omejena na nekaj več kot 165 dpi.

Podjetje SiPix je razvilo »roll-to-roll« proces za proizvodnjo mikroceličnih elektroforeznih filmov. Na plastično prozorno podlago, prevlečeno s tanko plastjo prozornega in prevodnega indijskega kositrnega oksida, nanesejo plast umetne smole (po površini ITO). Nato gre tako dobljena plast skozi posebno napravo, ki v to smolo vtisne zelo majhne vdolbinice, ki jih naprej v procesu zapolnijo z ustreznim materialom (obarvana tekočina, beli delci) in neprepustno prekrijejo s posebno prozorno plastjo (angl. *sealing layer*) ter s plastjo, ki zaščiti elektronski papir, dokler se ta ne pritrdi na elektronsko vezje.



Slika 29: »Roll-to-roll« proizvodnja SiPix-ovega elektroforeznega filma (povzeto po [6]).

Elektronski papir SiPix deluje po istem principu kot E Inkov elektroforezni zaslon.

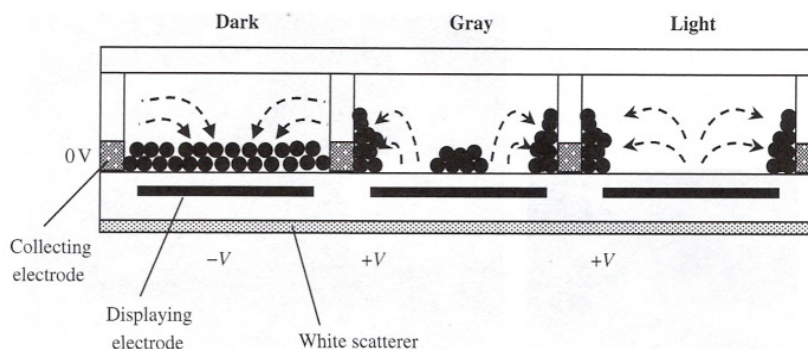


Slika 30: Zgradba mikroceličnega elektroforeznega zaslona (povzeto po [6]).

SiPix je lahko enobarven ali pa področno barvni. Enobarvni zaslon prikazuje črno, rdečo, zeleno, modro in zlato barvo v kombinaciji z belo. Področno barvni zaslon vsebuje kombinacijo črne, rdeče, zelene ali zlate. Kontrastna barva vsakega področja je bela. Pri teh zaslonih ni potreben barvni filter in so sposobni prikazovati tudi sivine. Ta elektroforezni zaslon je tanek 150 mikrometrov (brez elektronskega vezja) in je zelo odporen proti udarcem in pritiskom. Je fleksibilen in enostaven za razrez.

Razvit je bil tudi elektroforezni zaslon, ki namesto tekočine, kjer se premikajo delci pod vplivom električnega toka, uporablja zrak (MikrocellularAir-Gap). Zato se izrazito poveča odzivni čas zaslona, ker je viskoznost zraka izredno majhna. Viskoznost zraka je okoli 0.02 cP, viskoznost tekočine pa okoli 1 cP. Problem pri tem je bilo sprijemanje delcev med sabo in po površini celic, zato je bil razvit poseben, tako imenovani tekoči prah, ki je zmanjšal sprijemanje delcev. Ta mešanica belega in črnega tekočega prahu je nanešena v mikrocelice, ki so narejene po istem principu kot SiPix. Prvi tak prototip je uporabljal visok napetostni prag (70-100V). Odzivnost takega zaslona je zelo hitra, preklopni čas pa je okoli 0.2 ms pri 70 V napetosti.

Elektroforezni materiali so lahko naslovljeni tudi z IPS naslavljanjem. Elektroforezni zaslon, razvit v podjetju Canon, je za razliko od ostalih elektroforezних zaslonov, kjer je optični kontrast dosežen z vertikalnimi premiki delcev, naslovljen s strani. To pomeni, da se delci premikajo horizontalno med navpičnima elektrodama. Tu ni belih delcev, temveč se svetlo oziroma belo stanje doseže s fiksnim belim razpršilnikom, ki leži pod elektroforezno plastjo. Temno stanje se doseže s prekritjem tega razpršilnika s temnimi delci. Vsak piksel ima horizontalno elektrodo (angl. *displaying electrode*) pod elektroforezno tekočino ter dve vertikalni elektrodi (angl. *collecting electrode*) na vsaki strani, ki prekrivata manjši del področja piksla. Stranski elektrodi sta napetosti 0V. Če horizontalna elektroda nosi nasproten naboj, kot je naboj temnih delcev, se ti delci razpršijo preko piksla in s tem omogočijo temno stanje. Če pa je naboj enak z nabojem delcev, se ti delci naberejo ob navpičnih elektrodah in izpostavi se bel razpršilnik, kar pomeni svetlo stanje piksla. Sivina zaslona se doseže z delnim naslavljanjem, in sicer z uporabo nižjega napetostnega pulza. Blizu roba piksla, se pravi bližje vertikalnima elektrodama, je električno polje močnejše, kot na primer na sredini polja. Zato pri delnem naslavljanju, se pravi pri manjšem električnem polju delci na sredini piksla ostanejo in tako se ustvari sivina. Stanje slike je stabilno pri 0 V.



Slika 31: Zgradba in princip delovanja IPS naslavljanja elektroforeznega zaslona (povzeto po [4]).

Ta vrsta zaslona ponuja barvne piksele s kopičenjem treh plasti vrh belega razpršilnika, z uporabo barvila, ki vpija eno barvo in prepušča drugo barvo. Taki pikseli ponujajo boljše jasnost v primerjavi z barvnimi filtri, kjer je piksel razdeljen na tri podpiksle, kar pomeni tretjino jasnosti. Ti pikseli morajo biti vertikalno izravnani eden vrh drugega. Stroški proizvodnje triplastnega zaslona so precej večji kot pri proizvodnji enoplastne strukture.

2.5.5.3 Barvni elektroforezni zaslon

Elektroforezni zaslon je lahko enostavno narejen tako, da preklaplja med dvema barvama (običajni med belo in črno), in sicer tako, da uporabimo par primerno obarvanih delcev ali obarvane delce in barvilo.

Barvni zaslon lahko dosežemo na tri načine. Eden od načinov je uporaba vsaj treh kombinacij dvobarvnih elektroforeznih tekočin, ki bi vsaka predstavljala podpiksel oziroma del piksla, se pravi kombinacija rdeče, zelene in modre. Nanos oziroma oblikovanje takih pikselov bi bil zelo zapleten. Enostavnejši pristop je uporaba barvnega filtra na črno-beli osnovi elektroforeznega filma. Barvni filter vsebuje izmenično rdeče, modre in zelene podpiksle, ki tvorijo en piksel. Se pravi, da trije podpiksli predstavljajo barvni piksel. Za prikaz na primer rdeče, se beli delci premaknejo pod rdeči podpiksel barvnega filtra, črni delci pa se premaknejo pod zelen in moder podpiksel. Tretji način za oblikovanje barvnega zaslona je kopičenje treh elektroforeznih filmov eden vrh drugega. To je seveda možno z uporabo IPS naslavljanja elektroforeznega zaslona, ker so ti filmi lahko preklopljeni v transparentno stanje.

2.5.5.4 Integracija elektroforeznih filmov v zaslone in njihova uporaba

Elektroforezni zaslone so popolnoma primerni za fleksibilne zaslone zaradi njihove tankosti in same tehnologije. Večina elektroforeznih filmov ne zahteva transparentnega ozadja, zato so združljivi z neprepustnimi substrati, kot je na primer kovinska folija. V podjetju E Ink so leta 2001 začeli prodajati prve fleksibilne segmentne zaslone. Fleksibilni segmentni zaslone so že

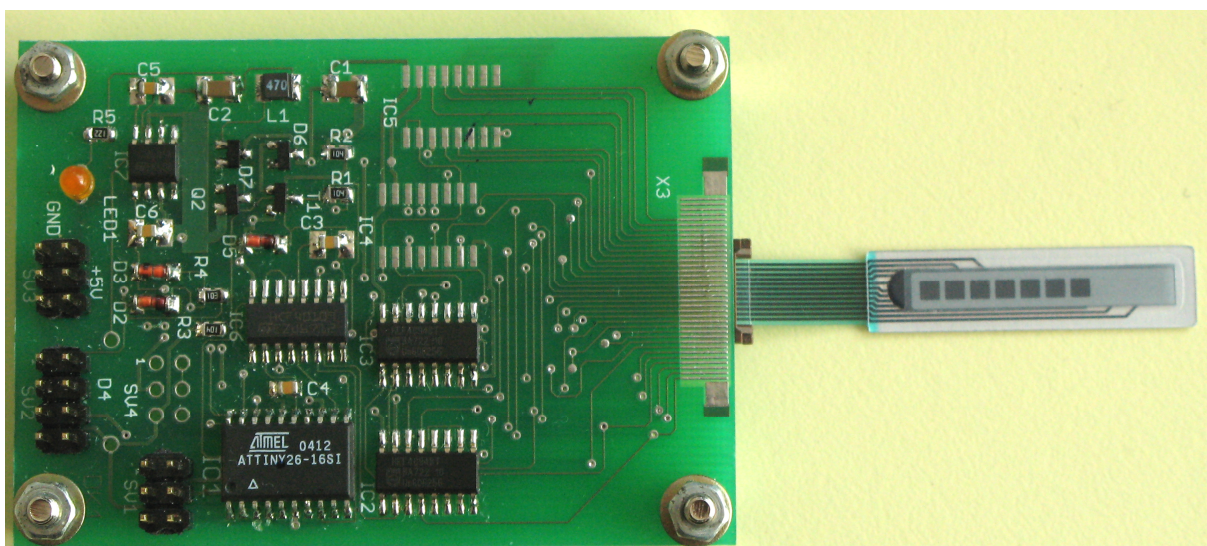
dostopni na trgu in se uporabljajo v raznih aplikacijah, ki zahtevajo močne in robustne zaslone, odporne na udarce. Proizvajalci, ki kupijo segmentni elektronski papir, mu nato dodajo elektroniko in jo integrirajo v njihove končne produkte. Ti zaslone so primerni za razne aplikacije, kot so zaslone pametnih kartic, indikatorji kapacitet (npr. pri USB ključku), elektronske nalepke oziroma etikete na policah trgovin, razni reklamni napisi, opozorilni znaki in komunikacijske naprave, zaslone ur itd.

Medtem ko materiali za izdelavo elektronskega papirja že omogočajo popolnoma fleksibilne zaslone, je tehnologija fleksibilnega vezja za zaslone z visoko resolucijo in aktivno-matrično strukturo še v stopnji razvoja. V E Inku so razvili že številne prototipe aktivno matričnih fleksibilnih zaslonov, osnovanih na organskih in neorganskih silicijevih polprevodnikih. Aktivno matrična vezja so proizvedli tako na kovinski foliji, kot tudi na plastičnem substratu. Na ta način je bilo razvitih kar nekaj prototipov. Maja 2007 je podjetje LG.Philips razvilo 14.1 palčni fleksibilni barvni zaslon iz elektronskega papirja, enak velikosti navadnega A4 papirja. Ima resolucijo 1280 X 800 in lahko prikazuje 16.7 milijonov barv. To je aktivno-matrični zaslon, ki uporablja substrat iz kovinske folije in je tanjši od 300 mikrometrov. Ta zaslon vsebuje tudi barvni filter, ki prekriva zaslon in mu omogoča, da prikazuje slike in tekst v barvah. Kljub številnim prototipom aktivno matrični elektroforezni zaslone ne bodo primerni za uporabo oziroma komercializacijo, dokler ne bo dovolj razvita tehnologija fleksibilnega aktivno matričnega elektronskega vezja.

3 Vzpostavitev in uporaba razvojnega okolja za delo z elektronskim papirjem

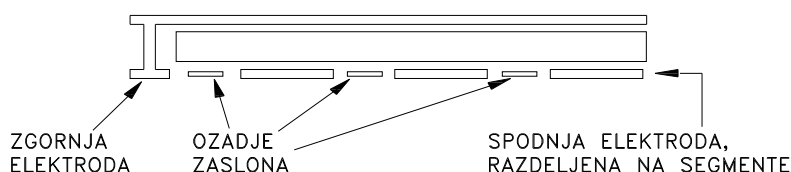
3.1 Opis delovnega okolja

Za reševanje naloge smo uporabili elektronsko vezje, ki omogoča krmiljenje 10-segmentnega elektronskega papirja (slika 32). Vezje vsebuje 8-bitni ATMEL-ov mikrokrmilnik tipa ATtiny26 (IC1), dva pomikalna registra, preko katerih mikrokrmilnik naslavlja zaslon (IC2 in IC3), napetostni generator, ki omogoča 15 V napetost (SPS – switching power supply), napetostni pretvornik, ki oskrbuje zaslon s 15 V napetostjo (IC6), serijski periferni vmesnik (SV1) in dva vhoda (SV2, SV3). Serijski periferni vmesnik (SPI) je namenjen za programiranje mikrokrmilnika in za 5 V napajanje elektronskega vezja.

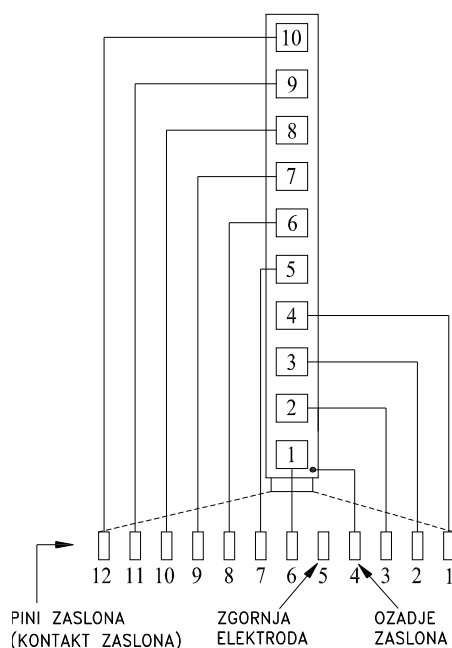


Slika 32: Elektronsko vezje z 10-segmentnim elektronskim papirjem.

Uporabili smo E Inkov elektronski papir z desetimi segmenti, ki je priključen na elektronsko vezje preko konektorja. Zaslon deluje po principu elektroforeze. Sestavljen je iz mikrokapsul, ki vsebujejo pozitivno nabite bele delce in negativno nabite črne delce, vsebovane v prozorni tekočini. Segmenti so posamično povezani preko direktnih povezav do kontakta oziroma pinov zaslona. Kontakt ima 12 pinov, 10 jih je namenjenih za segmente, ostala dva pa za ozadje in zgornjo elektrodo zaslona. Povezave med pini in segmenti niso urejene po vrsti, temveč mešano. Slika 34 prikazuje povezave segmentov s pini zaslona.



Slika 33: Prečni prerez zaslona: spodnja elektroda je razdeljena na segmente; ozadje zaslona predstavlja en segment; zgornja elektroda je povezana s pinom 5.



Slika 34: Prikaz povezave segmentov s kontaktom zaslona. Povezava 5 vodi do zgornje elektrode.

3.2 Odziv elektronskega papirja na različne temperature

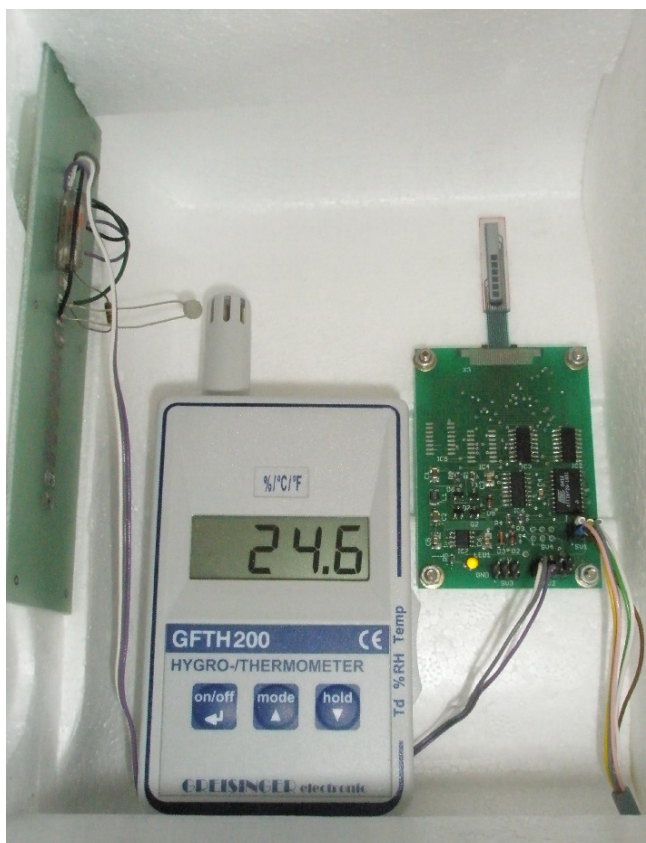
3.2.1 Opis problema

Namen pričujoče naloge je spoznati princip delovanja elektronskega papirja s programerskega vidika. V ta namen smo izbrali mikrokrmilnik in ga sprogramirali tako, da je sposoben brati spremembe temperature s pomočjo temperaturnega senzorja in te spremembe prikazovati na zaslonu iz elektronskega papirja. Zaslona naj bi deloval tako, da bi pri določenem temperaturnem obsegu oziroma razponu prikazoval ustrezno število obarvanih segmentov. Pri nižji temperaturi bi prikazoval manj obarvanih segmentov, pri višji temperaturi pa več obarvanih segmentov. Če se na primer omejimo na naraščanje temperature, bi se vsak dodatno obarvani segment obarval pri točno določeni temperaturi.

3.2.2 Priprava

Za realizacijo zadane naloge smo uporabili torej še temperaturni senzor, ki je priključen oziroma povezan na mikrokrmilnik preko vhoda SV2 na elektronskem vezju. To je neke vrste upor, ki mu pravimo termistor. Port A1 na mikrokrmilniku služi kot 5 V napajanje za termistor. S spreminjanjem temperature se spreminja upornost in s tem napetost na termistorju. Mikrokrmilnik zaznava to napetost preko vhoda A0 (glej prilogo 1).

Za izvedbo naloge smo uporabili še škatlo iz dobrega toplotnega izolatorja - stiropora, s katero smo zmanjšali hitrost padanja oziroma naraščanja temperature. S tem smo lahko izmerili dokaj natančne rezultate delovanja zaslona. Za merjenje temperature v škatli smo uporabili digitalni merilnik temperature (slika 35).



Slika 35: Na elektronsko vezje (desno) je preko vhoda SV2 priključen termistor (levo). Na sredini je digitalni merilnik temperature, s katerim se razbere temperaturo v škatli in s tem temperaturo termistorja. Vse skupaj je v škatli iz stiropora, s čemer je zmanjšano padanje oziroma naraščanje temperature.

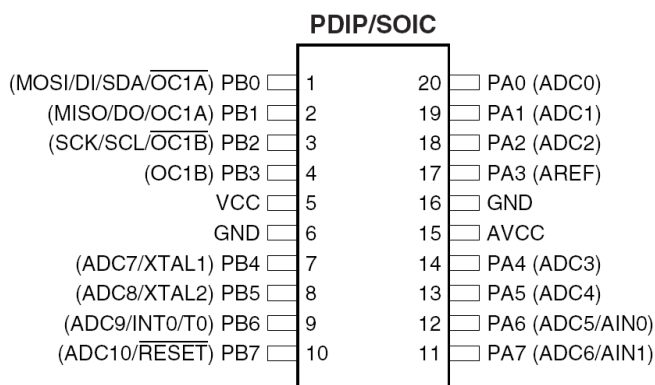
3.2.3 Princip delovanja mikrokrmilnika in temperaturnega senzorja

Poleg zgradbe oziroma strukture zaslona je potrebno poznati tudi delovanje temperaturnega senzorja in mikrokrmilnika.

3.2.3.1 Mikrokrmilnik ATtiny26

Mikrokrmilnik je elektronsko vezje, ki začne svojo funkcijo opravljati šele, ko vanj vpišemo program. Po zgradbi in načinu delovanja je zelo podoben osebnemu računalniku. Sestavljen je iz enostavnega mikroprocesorja, pomnilnika in V/I enote. Mikroprocesor je sestavljen iz aritmetično logične enote in registrov. Mikrokrmilnik je povezan z zunanjim svetom preko številnih nožic, ki ga obdajajo. Mikrokrmilniki so dandanes prisotni skoraj v vsaki, še tako enostavni elektronski napravi. Zahtevnost dela z njimi je v velikem razponu, od enostavnih aplikacij, kot je prižiganje raznih lučk, do zahtevnejših.

V pričujoči nalogi smo uporabili mikrokrmilnik ATtiny26, ki je integriran v elektronsko vezje, s pomočjo katerega krmili zaslon iz elektronskega papirja. To je nizkonapetostni (4.5 V – 5.5 V) 8-bitni mikrokrmilnik družine AVR, osnovan na RISC arhitekturi. Sestavljen je iz 32 splošno namenskih registrov, ki so direktno povezani z aritmetično logično enoto (ALU). Vsebuje še 2KB Flash pomnilnika za program, 128B programirljivega EEPROM-a, 128B SRAM pomnilnika, več kot 16 splošno namenskih vhodno/izhodnih linij, dva 8-bitna časovnika/števca, programirljiv »Watchdog« časovnik, notranji in zunanji oscilator, 11 kanalni 10-bitni A/D pretvornik, itd. Atmel izdeluje mikrokrmilnik v dveh oblikah ohišij, prva je PDIP/SOIC, ki ga smo ga uporabili mi, druga pa je MLF oblika.



Slika 36: ATiny26 vsebuje 20 nožic oziroma pinov: VCC omogoča napajanje mikrokrmilnika; GND sta ozemljitvena pina - masa; AVCC omogoča napajanje Porta A in A/D pretvornika; Port A je 8-bitni splošno namenski V/I port in ima izmenične funkcije kot analogni vhodi za A/D pretvornik in analogni primerjalnik; Port B je tudi 8-bitni splošno namenski V/I port in ima izmenične funkcije za ADC, uro, števec, USI, SPI programiranje, itd (povzeto po [1]).

Kljub majhnosti je zmogljivost mikrokrmilnika ATtiny26 zelo velika, zato bi bilo nesmiselno opisovati celotno zgradbo in delovanje. Omejili bi se na analogno digitalni pretvornik (ADC), ki ga potrebujemo za branje napetosti na temperaturnem senzorju.

ADC pretvori analogno vhodno napetost v 10-bitno digitalno vrednost. Ta vrednost zato ne presega 1024. Uporabili smo notranjo referenčno napetost, ki je običajno 2,56 V. To pomeni, da ADC pretvornik ne more pretvoriti analogne napetosti, ki presega 2,56 V, v neko vrednost, ker bi ta vrednost pri več kot 2,56 V napetosti presegala 1024. ADC potrebuje za delovanje vhodno frekvenco ure med 50 in 200 kHz. ADC modul zato vsebuje preskaler, ki razdeli sistemsko uro na sprejemljivo frekvenco ure za ADC.

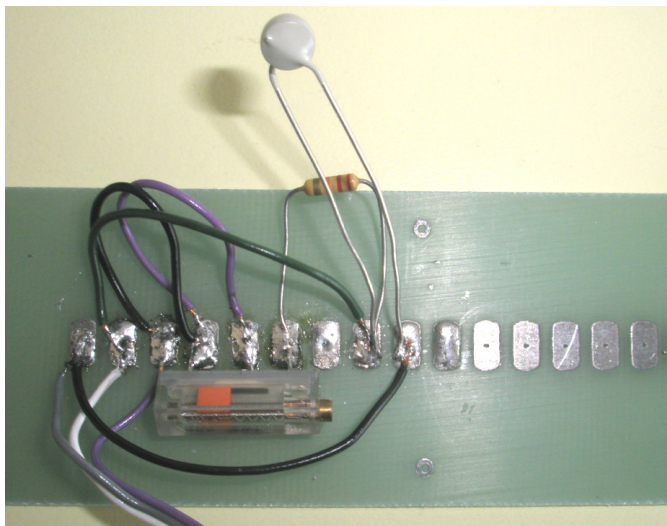
A/D pretvorba se izvede po izrazu

$$ADC = \frac{V_{IN} * 1024}{V_{REF}}, \quad (1)$$

kjer je V_{IN} napetost na izbranem vhodu, V_{REF} pa je referenčna napetost. Pri vhodni napetosti 2,56 V bi bil tako rezultat A/D pretvorbe 1024, pri napetosti 0V 0, pri 1.28 V 612, itd.

3.2.3.2 Temperaturni senzor

Kot temperaturni senzor smo uporabili torej NTC termistor. Značilnost termistorja je, da je njegov upor zelo odvisen od temperature. Z višanjem temperature se upornost NTC termistorja manjša za $-4\%/^{\circ}\text{C}$, kar pomeni posledično manjšo napetost na termistorju in s tem na vhodu mikrokrmilnika in obratno. Termistor je serijsko povezan z dvema uporoma. Z dodatnima uporoma smo zmanjšali občutljivost in prilagodili napetost na termistorju in vhodu mikrokrmilnika, ki ne sme presegati 2,56 V. ADC uporablja notranjo referenčno napetost 2,56 V, kar pomeni, da pretvarja v digitalno vrednost samo do te napetosti. Mikrokrmilnik s pomočjo ADC pretvori analogno vhodno napetost na vhodu A0 v digitalno vrednost, na podlagi katere nato krmili oziroma naslavlja zaslon.



Slika 37: Temperaturni senzor, serijsko povezan z dvema uporoma.

3.2.4 Orodja za programiranje

Pri programiranju mikrokrmilnikov AVR uporabljamo različna orodja, od programov za pisanje kode, prevajalnikov, do simulatorjev. Za pisanje kode uporabljamo različne programske jezike. Najpopularnejši so C, C++ in BASIC, za zahtevnejše programiranje in za uporabo hitre in kratke kode pa se uporablja zbirni jezik. Napisani program je nato potrebno s pomočjo programatorja prenesti v mikrokrmilnik. Programator je enostavna naprava, ki nam strojno kodo vpiše v mikrokrmilnik na dva načina. Lahko ga vstavimo v podnožje programatorja ali pa ga programiramo direktno v ciljnem vezju, kar nam zelo poenostavi programiranje, saj nam ni potrebno vstavljati mikrokrmilnika v programator. Programiranje mikrokrmilnika v vezju imenujemo tudi ISP programiranje (angl. *in system programming*). Za našo nalogo smo zaradi enostavnosti uporabili kar ISP programiranje. Mikrokrmilnik smo programirali z ATMEL programatorjem preko serijskega perifernega vmesnika (SPI) na elektronskem vezju. Program smo napisali v programskem jeziku BASIC, in sicer s pomočjo programskega orodja BASCOM-AVR.

3.2.5 Opis programa

Najprej določimo pogoje in nastavimo parametre za pravilno delovanje mikrokrmilnika. Z ukazom \$REGFILE povemo prevajalniku, kateri tip mikrokrmilnika uporabljamo. S tem prevajalnik dobi vse podatke o mikrokrmilniku. Določimo še frekvenco ure in ostale podatke, ki so pomembni za pravilno delovanje programa v mikrokrmilniku (na primer prostor za

povratne naslove ob klicih, za lokalne spremenljivke, itd.). Parametri za pravilno delovanje mikrokrmilnika so:

```
$regfile = "Attiny26.dat"  
$crystal = 8000000  
$hwstack = 16  
$swstack = 8  
$framesize = 16
```

Sledi konfiguracija portov A in B. Posamezne porte nastavimo kot vhode ali izhode. S funkcijo ALIAS nekatere porte preimenujemo z drugim imenom zaradi lažjega razumevanja programa. Definiramo še spremenljivke in jim določimo podatkovne tipe. To naredi sledeči del kode:

```
Config PORTA.0 = Input  
Config PORTA.1 = Output  
Config PORTA.2 = Input  
Config PORTA.3 = Input  
Config PORTA.5 = Input  
Config PORTA.6 = Output  
Config PINA.7 = Input  
Config PORTB = Output
```

```
Shiftr_str Alias PORTB.6  
Shiftr_data Alias PORTB.5  
Shiftr_clk Alias PORTB.4  
Shiftr_oe Alias PORTB.3  
Switchps Alias PORTA.6  
Feedbackps Alias PINA.7
```

```
Dim L As Bit  
Dim U As Bit  
Dim Del As Integer  
Dim I As Byte  
Dim S As String * 12  
Dim Ss As String * 1  
Dim W As Word  
Dim Switchps_count As Byte  
Dim Count As Byte
```

Nato je potrebno konfigurirati ADC, ki vrača vrednost tipa SINGLE. S funkcijo AUTO dovolimo prevajalniku, da sam izbere optimalno vrednost za preskaler. Določimo še notranjo referenčno napetost, ki je običajno 2.56 V.

S pomočjo porta A6 mikrokrmilnik aktivira SPS, ki napaja zaslon z napetostjo 15 V. Zaenkrat ga nastavimo na 0, ker še ne naslavljamo zaslona. Port A7 služi kot varnostno stikalo in prekine delovanje SPS - napajanje, ko napetost preseže 15V. Ko napetost pade pod 15 V, se delovanje SPS spet aktivira. Port A1 nastavimo na 1 in s tem omogočimo 5 V napajanje temperaturnega senzorja. Zaženemo ADC in s tem sprožimo konverzije meritev. Konfiguracija ADC in posameznih portov je razvidna iz sledeče kode:


```
Config Adc = Single , Prescaler = Auto , Reference = Internal
```

```
Reset PORTA.6
Set PORTA.7
Set PORTA.1
Reset Shiftr_str
Reset Shiftr_data
Reset Shiftr_clk
Reset Shiftr_oe
Set Shiftr_oe
```

```
Start Adc
```

Konfiguriramo Timer0, da deluje kot ura in nastavimo preskaler na vrednost 64. Timer0 je 8-bitna notranja ura, ki vsebuje 10-bitni preskaler. Nastavimo in omogočimo ga tako, da ob prekinitvi skočimo in izvedemo subrutino oziroma podprogram Tim0_isr. Z ukazom Enable Interrupts omogočimo prekinitve, nato zaženemo uro Timer0 in s tem omogočimo, da se subrutina »Tim0_isr« izvaja glede na urino periodo, določeno z nastavitvijo preskalerja. Subrutina »Tim0_isr« v svoji aktivnosti krmili SPS in tako občasno polni kondenzator na napetost 15 V. Zaslona namreč ne porabi veliko energije in zato ni potrebno, da se subrutina Tim0_isr vseskozi izvaja. SPS se torej izvaja v odvisnosti od urine periode in v primeru, da napetost ne presega 15 V. Konfiguracijo in zagon ure izvedemo s sledečimi stavki:

```
Config Timer0 = Timer , Prescale = 64
On Timer0 Tim0_isr
Enable Timer0
Enable Interrupts
Start Timer0
```

Preden se začne izvajati program, moramo očistiti oziroma resetirati zaslon. Program se začne izvajati z Do – Loop zanko. V tej zanki se izvaja naslavljanje zaslona glede na vrednost, ki jo pretvori ADC. V spremenljivko W se vpiše vrednost, ki jo ADC pretvori na vhodu PA0. Glede na vrednost W se nato ustrezno naslovi oziroma obarva zaslon. V zanki kličemo dve subrotini. Z eno čistimo zaslon (_clear disp), z drugo (_data) pa ga naslavljamo glede na vrednost W. Do-Loop zanka se izvaja na sledeči način:

```
Gosub _clear disp
```

```
Do
```

```
W = Getadc(0)
Gosub _clear disp
```

```
Select Case W
```

```
Case Is < 300 : S = "111001111111" // vsi segmenti so obarvani
Case 301 To 350 : S = "111001111110"
Case 351 To 400 : S = "111001111100"
Case 401 To 450 : S = "111001111000"
```

```

Case 451 To 500 : S = "111001110000"
Case 501 To 550 : S = "111001100000"
Case 551 To 600 : S = "111001000000"
Case 601 To 650 : S = "011001000000"
Case 651 To 700 : S = "001001000000" // obarvana sta dva segmenta
Case 701 To 750 : S = "000001000000" // obarvan je en segment
Case Is > 751 : S = "000000000000" // noben segment ni obarvan
End Select

Gosub _data
S = "000000000000"
Gosub _data

Wait 5
Loop
End

```

Sledijo subrutine, ki jih uporablja Do – Loop zanka. Subrutina »_data« naslovi zaslon glede na string S, ki je odvisen od vrednosti W. Mikrokrmilnik naslavlja zaslon preko napetostnega pretvornika (IC6), ki pretvori 5 V izhodne napetosti mikrokontrolnika na 15 V napetosti, potrebne za zaslon. Napetostni pretvornik napaja z napetostjo 15 V SPS na vezju. Preko dveh Shift registrov (IC2, IC3) se nato naslavlajo posamezni segmenti zaslona. Subrutina »_cleardisp« očisti zaslon. Subrutina »Tim0_isr« s pomočjo SPS napaja zaslon z električno napetostjo. Ta subrutina se za razliko od ostalih dveh, ki se izvedejo ob klicu, izvaja glede na urino periodo. Subrutine so napisane na koncu programa, in sicer na sledeči način:

```

_data:

For I = 12 To 1 Step -1

    Ss = Mid(s , I , 1)
    Select Case Ss
        Case "0" : Reset Shiftr_data
        Case "1" : Set Shiftr_data
    End Select
    Set Shiftr_clk
    Waitus 2
    Reset Shiftr_clk
Next I
Set Shiftr_str
Waitus 2
Reset Shiftr_str

Waitms 500
Return

_cleardisp:

S = "000010000000"
Gosub _data
S = "111101111111"
Gosub _data
S = "000010000000"
Gosub _data

```

```

Return

Tim0_isr:
  If Feedbackps = 1 Then
    Reset Switchps
    Set Switchps
    Waitus 7
    Reset Switchps
  End If
Return

```

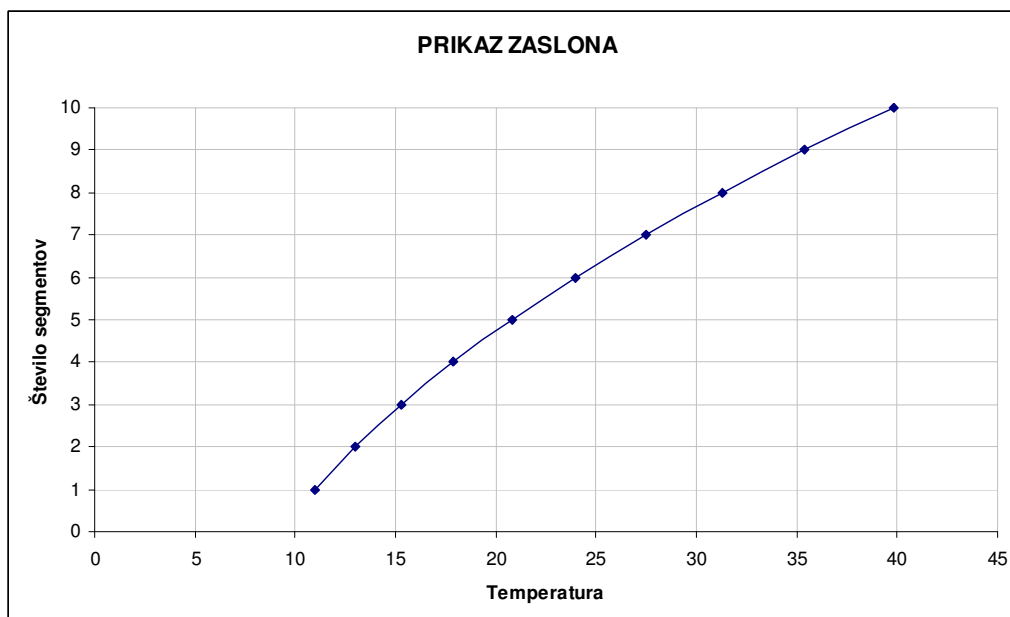
3.2.6 Rezultati

Ko smo program napisali in prevedli, smo ga prenesli v mikrokrmilnik. Program smo optimizirali tako, da zaslon prikazuje spremembo temperature približno med 10° C in 40° C. Z višanjem temperature se večja število obarvanih segmentov, in sicer eden za drugim, z nižanjem temperature pa manjša. Vsak posamezni segment se obarva pri točno določeni temperaturi.

Meritev smo izvedli tako, da smo škatlo popolnoma izolirali in jo segreli do dovolj visoke temperature. Ko je temperatura v škatli postopoma padala do sobne temperature, smo sprti beležili temperature, pri katerih so se posamezni segmenti izbrisali oziroma obarvali. Nato smo škatlo ohladili in opazovali naraščanje temperature in s tem odziv zaslona. Rezultat je prikazan v preglednici 2.

Temperatura (os X)	11	13	15,3	17,9	20,8	24	27,5	31,3	35,4	39,8
Št. segment. (os Y)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Preglednica 2: Preglednica prikazuje število obarvanih segmentov pri določenih temperaturah: pri 11° C se obarva 1 segment, pri 13° C se obarvata dva segmenta,..., pri temperaturi >39,8° C so obarvani vsi segmenti zaslona.



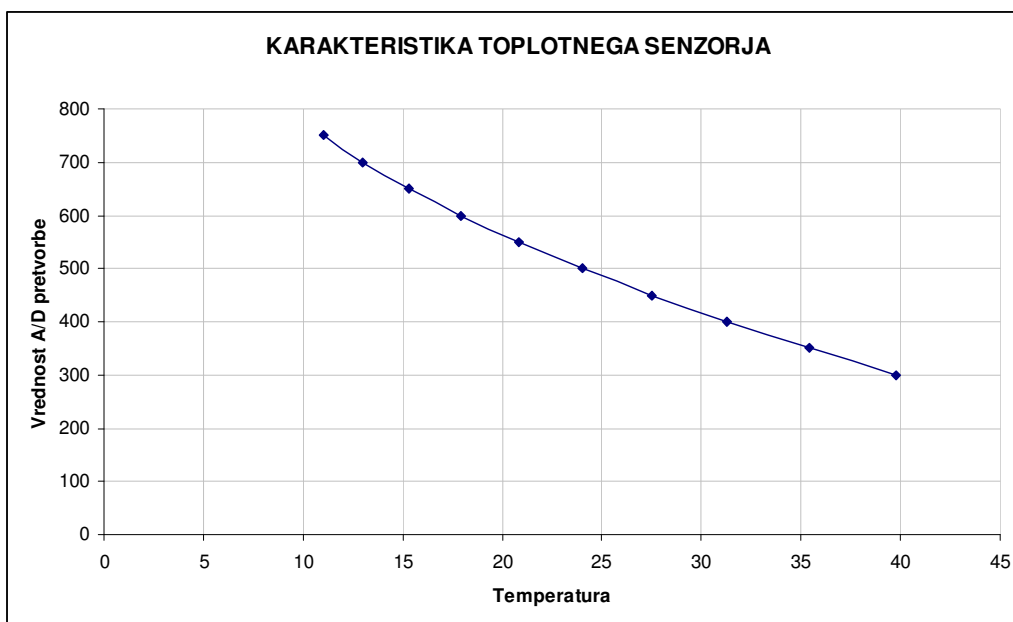
Slika 38: Grafični prikaz rezultata delovanja zaslona.

Program je napisan tako, da se segmenti zaslona naslavljajo konstantno glede na vrednost ADC. Pri vrednosti 750 se obarva en segment, pri vrednosti 700 dva, pri 650 trije, itd. Vrednosti se torej zmanjšujejo oziroma povečujejo konstantno za korak 50. Vendar krivulja prikaza segmentov zaslona ni linearna glede na temperaturo, pri čemer lahko sklepamo, da karakteristika temperaturnega senzorja tudi ni linearna. To pomeni, da z naraščanjem temperature upornost temperaturnega senzorja pada nelinearno. Potemtakem bi bila karakteristika temperaturnega senzorja glede na rezultate takšna, kot je prikazana v preglednici 3.

Temperatura (os X)	11	13	15,3	17,9	20,8	24	27,5	31,3	35,4	39,8
Vrednost (os Y)	750	700	650	600	550	500	450	400	350	300

Preglednica 3: Preglednica prikazuje vrednosti A/D pretvorbe pri določenih temperaturah.

Vrednosti A/D pretvorbe izhajajo iz vhodne napetosti in s tem napetosti temperaturnega senzorja. Kot vemo, je napetost sorazmerna z uporom, kar pomeni, da z naraščanjem upora narašča tudi napetost na temperaturnem senzorju in obratno. Zato lahko enačimo vrednosti z upori temperaturnega senzorja v grafičnem smislu.



Slika 39: Grafični prikaz karakteristike temperaturnega senzorja.

Prikazana karakteristika je omejena na temperaturo med 11°C in 40°C . Če vzamemo namesto vrednosti A/D pretvorbe upornost temperaturnega senzorja, je razvidno, da se upornost spreminja nelinearno glede na temperaturo.

3.3 Delovanje elektronskega papirja pri nizkih temperaturah

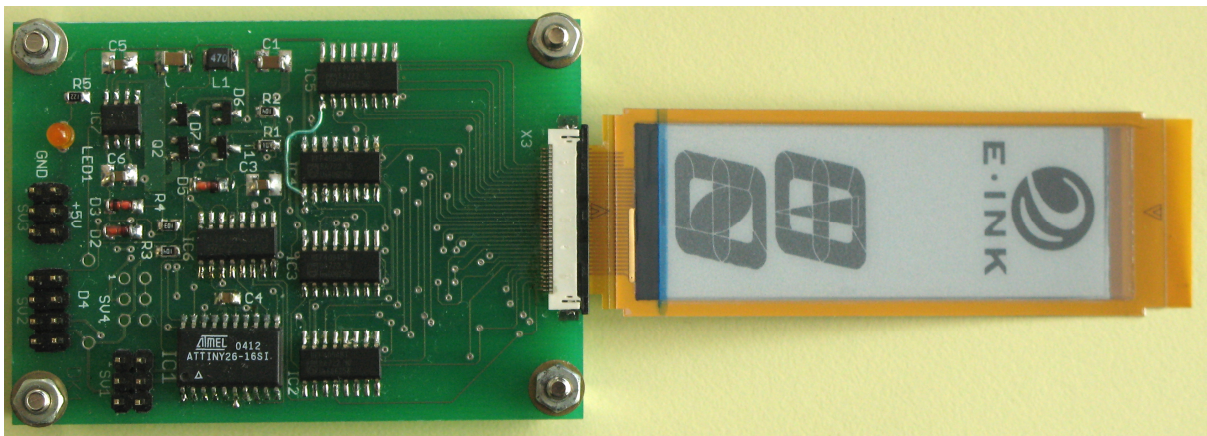
3.3.1 Opis problema

Kot že vemo, elektroforezni elektronski papir deluje po principu elektroforeze, kar pomeni, da se nabiti delci v tekočini premikajo pod vplivom električnega polja. Pri tej nalogi smo uporabili E Inkov elektronski papir, ki deluje po tem principu. Sestavljen je namreč iz mikrokapsul, ki vsebujejo bele in črne delce, vsebovane v prozorni tekočini. Vemo tudi, da je odzivnost takih zaslonov slaba. K slabi odzivnosti zelo pripomore tudi viskoznost tekočine v mikrokapsulah. Znano je, da se viskoznost tekočine spreminja s temperaturo, in sicer s padanjem temperature se viskoznost tekočine večja in obratno. Zaradi tega razloga smo prišli do ideje, da bi opazovali odziv zaslona pri nizkih temperaturah.

3.3.2 Priprava in način delovanja zaslona

Pri tej nalogi smo uporabili zaslon s 43 segmenti. Zaslon je večji in je zato lažje opazovati kontrast prikaza slike. Nekateri segmenti imajo skupne povezave, zato ima zaslon le 27 pinov na kontaktu namesto 43. Krmiljen je s podobnim elektronskim vezjem kot pri prvi nalogi. Razlika je v tem, da elektronsko vezje pri tem zaslonu vsebuje štiri pomikalne registre za naslavljanje, namesto dveh (slika 40).

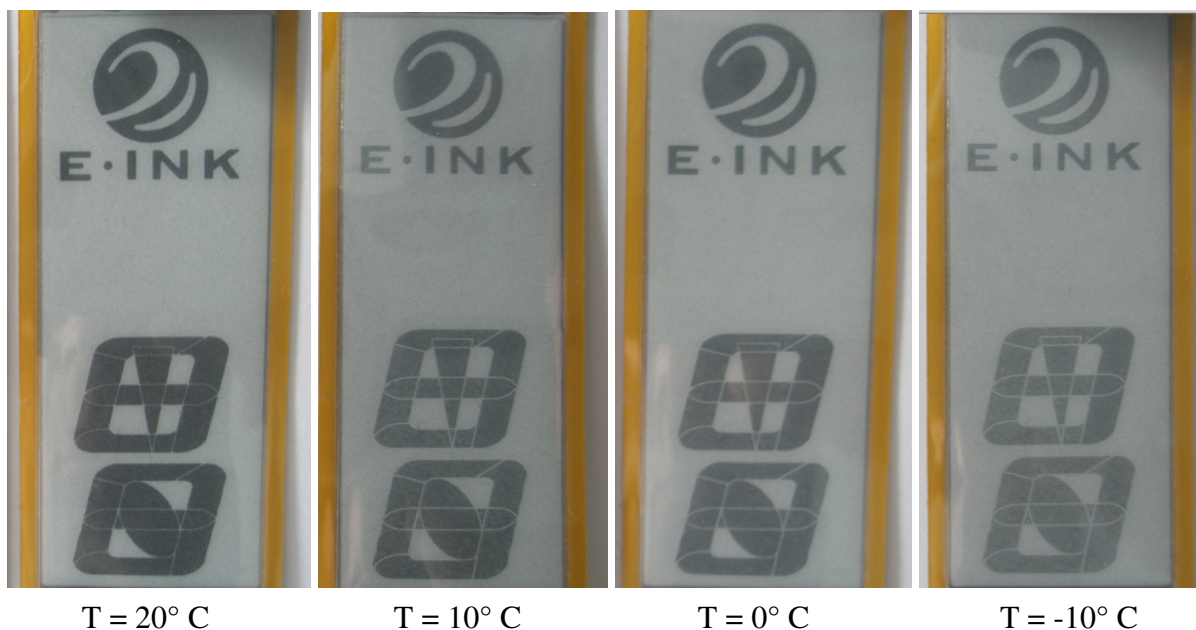
Program v mikrokrmilniku tega zaslona deluje po enostavnem algoritmu. Napisan je tako, da se segmenti postopoma naslavlajo oziroma obarvajo, pri čemer na koncu tvorijo celotno sliko. Odzivni čas vsakega segmenta je 100 ms, kar pomeni, da je odzivnost zaslona tudi 100 ms.



Slika 40: Elektronsko vezje z 43-segmentnim elektronskim papirjem.

3.3.3 Rezultati

Opazovali smo delovanje zaslona pri različnih temperaturah, in sicer pri -10°C , 0°C , 10°C in 20°C . Rezultat je prikazan na sliki 39.



Slika 41: Iz slike je razvidno, da je pri nižjih temperaturah kontrast zaslona manjši. Pri temperaturi 20° C, se pravi pri sobni temperaturi, je kontrast zaslona normalen, pri temperaturi -10° C pa se kontrast zaslona občutno zmanjša.

Na sliki 41 se dovolj očitno vidi, da se z manjšanjem temperature zaslona manjša kontrast aktiviranih segmentov. Razlog je v tem, da se s padanjem temperature viskoznost tekočine v mikrokapsulah povečuje, kar pomeni posledično zmanjševanje mobilnosti delcev. Črni in beli delci se zaradi povečane viskoznosti tekočine zato le delno razporedijo po zaslonu.

To smo seveda pričakovali, kajti že sama tehnologija elektroforeznega zaslona kaže na to, da je odzivnost zaslona močno odvisna od viskoznosti tekočine v mikrokapsulah. Odtod ima elektronski papir zelo nizko odzivnost v primerjavi z LCD in številnimi drugimi zasloni. Iz tega razloga na njih ne morejo teči aplikacije, ki zahtevajo hitro menjavanje slik ali menijev, kaj šele filmov, hitrih premikov miškinih kazalcev itd. Kljub nizki odzivnosti pa ima elektronski papir številne prednosti, ki omogočajo njegovo uporabo v številnih aplikacijah.

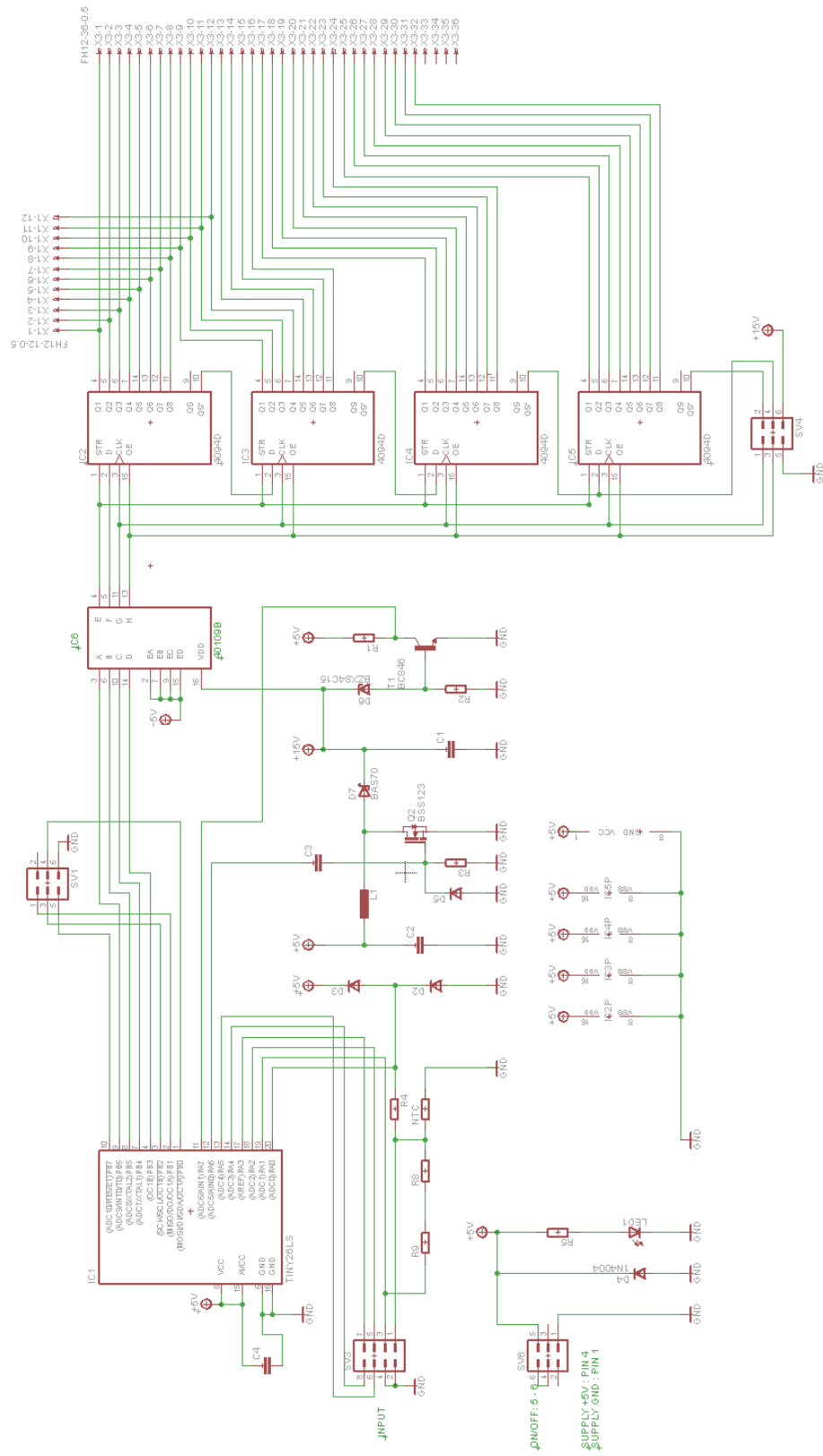
4 Zaključek

Tehnologija fleksibilnih zaslonov trenutno še ni dovolj razvita, da bi se zaslone uspešno uveljavili na trgu, vsaj tisti z aktivno matriko ne. Razviti so bili sicer že številni prototipi, vendar imajo še preveč pomanjkljivosti, da bi se uspešno uporabljali v raznih aplikacijah. Razlog je v pomanjkanju fleksibilnosti, ker je zaslon sestavljen iz organskih in neorganskih plasti. Neorganski materiali imajo slabšo fleksibilnost kot organski, zato lahko počijo pri upogibanju. Dokler ne bodo fleksibilni zaslone v celoti organski, ne bodo omogočali polne fleksibilnosti. Za polno fleksibilnost zaslonov bo torej potrebno razviti nove organske materiale, ki bodo nadomestili neorganske plasti v zaslonu. Še največji tržni uspeh je dosegel elektronski papir, ki se v obliki segmentnih fleksibilnih zaslonov uspešno uporablja v nekaterih aplikacijah.

Cilj mojega dela v podjetju EPTS d.o.o. je bil natančneje spoznati delovanje elektronskega papirja. Pri prvi nalogi sem moral napisati program, ki je preko krmilnika krmilil zaslon glede na temperaturo, ki jo je zaznaval temperaturni senzor. Čeprav se mi je naloga na prvi pogled zdela enostavna, sem kmalu spoznal, da temu ni tako. Spoznati sem moral princip delovanja mikrokrmilnika, temperaturnega senzora, elektronskega vezja in zaslona. Naučiti sem se moral programskega jezika BASIC in uporabljati programsko orodje BASCOM-AVR, s pomočjo katerega sem napisal program. Pri spoznavanju opreme in orodij so mi veliko pomagali zaposleni, prebrati pa sem moral tudi veliko dokumentacije, še posebno o mikrokrmilniku in samem programiranju. Šele ko sem v grobem spoznal celoten sistem delovanja, sem se lotil programiranja. Program sem moral večkrat prenesti na mikrokrmilnik in ga s tem postopoma optimizirati, da mi je zaslon prikazoval želene rezultate. S to nalogo sem dosegel zadani cilj in spoznal delovanje zaslona s programerskega vidika. Prepričan sem, da bi s pridobljenim znanjem lahko postopoma reševal tudi kompleksnejše probleme oziroma naloge.

Druga naloga ni zahtevala veliko znanja in je temeljila zgolj na opazovanju odziva elektronskega papirja na nizke temperature. Zaradi same tehnologije zaslona sem predpostavljal, da se bo kontrast zaslona pri nižjih temperaturah manjšal. Posledica manjšega kontrasta je večanje viskoznosti tekočine, ki zmanjša mobilnost delcev. Pri tej nalogi sem potrdil svoja pričakovanja. Zaslon se je odzival počasneje pri nižjih temperaturah. Problem kontrasta bi rešili tako, da bi v programu podaljšali čas krmiljenja segmenta pri prehodu iz belega v črno stanje. Vendar bi z rešitvijo problema kontrasta zmanjšali odzivnost zaslona, ki pa je že tako nizka. Hkrati pa ima elektroforezni zaslon tudi mejo, do katere lahko povečujemo čas krmiljenja.

Priloga



Priloga 1: Shema elektronske vezja.

Literatura

- [1] ATtiny26, Atmel Corporation. Dostopno na:
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1477.pdf
- [2] E Ink, Electronic Paper Displays. Dostopno na:
<http://www.eink.com/>
- [3] Electronic Paper and Technology Solutions. Dostopno na:
<http://www.eptsolutions.com/>
- [4] Gregory P. Crawford, Flexible Flat Panel Displays, Brown University, USA, 2005
- [5] LCD zasloni. Dostopno na:
<http://www.marsnjak.com/sergej/?menu=lcd>
- [6] SiPix. Dostopno na:
<http://www.sipix.com/technology/index.html>
- [7] Universal Display Corporation. Dostopno na:
<http://www.universaldisplay.com/>
- [8] Wikipedia, Electronic paper. Dostopno na:
http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_paper_display
- [9] Wikipedia, OLED. Dostopno na:
<http://en.wikipedia.org/wiki/OLED>