

Gymnázium, Brno, Vídeňská 47

Cvičení z fyziky 2013 - 2014

2. seminární práce

Technologie Liquid Crystal Display

Jan Horáček (jan.horacek@seznam.cz)

8. května 2014

Obsah

1	Úvod	3
2	Parametry dnešních displayů	3
2.1	Response time (doba odezvy)	3
2.2	Inputlag	5
2.3	Gamut	5
2.4	Contast (kontrast)	6
2.5	Viewing angles (pozorovací úhly)	7
2.6	Brightness (jas)	7
3	Technologie Liquid Crystal Display (LCD)	7
3.1	Zdroj světla	8
3.2	Tekuté krystaly	8
3.3	RGB maska	9
4	Technologie výroby LCD panelů	10
4.1	Twisted Nematic (TN)	10
4.2	In Plane Switching (IPS)	11
4.3	Další technologie	11
5	Technologie vylepšující tekuté krystaly	11
6	Závěr	13

Abstrakt

Technologie *Liquid Crystal Display*, česky technologie *tekutých krystalů*, je princip, který nás denně obklopuje v nejrůznějších zobrazovacích zařízeních, od hodinek, přes monitory počítačů a televizí až po nejrůznější informační panely. Vedle technologií, jako nastupující *OLED* panely, či starší a v současnosti ustupující *plazmové* obrazovky si po dobu již 15-ti let udržuje stabilní postavení na trhu, spolehlivost a odbyt. A právě to z *LCD* činí technologii, o které se vyplatí něco znát.

1 Úvod

Touto prací bych rád vnesl určité kvantum světla do principů a vlastností dominujících zobrazovacím zařízením, které běžně vidáme kolem sebe - do LCD displayů.

Nejprve popíši parametry charakterizující displye obecně, dále rozeberu jednotlivé zobrazovací a výrobní technologie a na závěr se tyto technologie porovnám.

2 Parametry dnešních displayů

V této sekci popíši jednotlivé parametry charakterizující zobrazovací panely obecně (tzn. nezávisle na výrobní technologii) a jejich význam. Tuto kapitolu bych rád vyzdvihl mezi ostatními, protože právě zde se "běžný člověk" dočte, jak interpretovat parametry, které udává výrobce u svého produktu. Znalost obecných parametrů zobrazovacích zařízení je zároveň nutná pro bezproblémové pochopení rozdílů mezi jednotlivými výrobními technologiemi a pro pochopení konečných dopadů těchto technologií na kvalitu obrazu.

2.1 Response time (doba odezvy)

Jedná se o čas běžně udávaný v *ms*.

Definice: 1. *Doba odezvy udává čas, za který se dokáže změnit pixel z černé barvy na bílou a zpět na černou.*

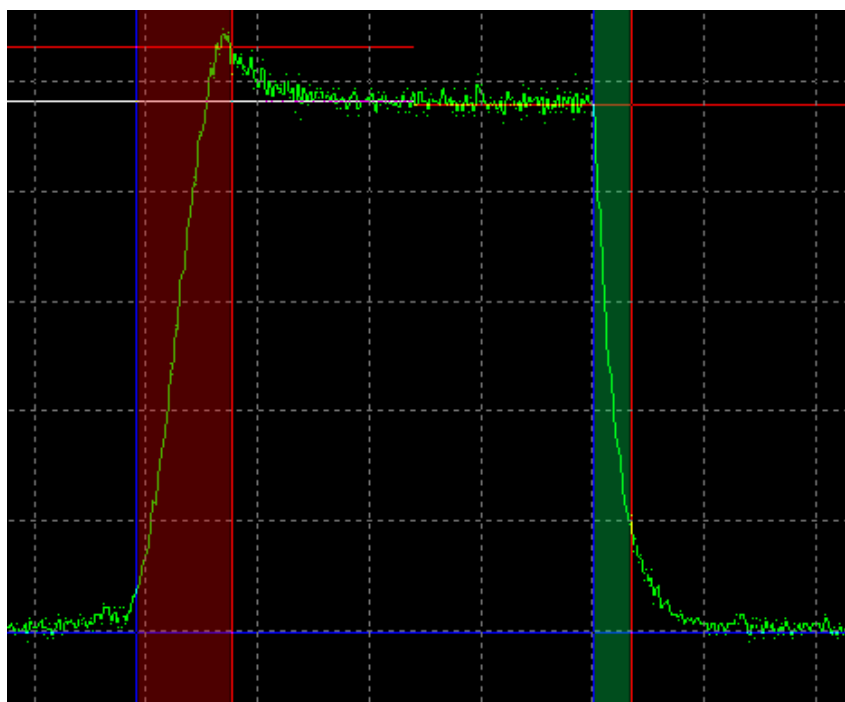
Tento parametr často bývá upřesněn přívlastky *rise*, či *fall*. *Rise* udává dobu potřebnou pro rozsvícení pixelu z černé barvy na bílou a *fall* udává čas potřebný pro změnu z bílé barvy na černou. Celková doba odezvy je v tomto případě rovna součtu obou časů.

Nyní si položíme důležitou otázku: má tento parametr vůbec význam? Má, ale jen velmi omezený: prudkou změnu z bílé barvy na černou a naopak používáme prakticky jen při editaci dokumentů, mailů apod. Běžný film takto prudkých přechodů dosahuje zřídka a proto chceme spíše vědět, jak dlouho trvá změna jednoho odstínu šedi na odstín jiný. To udává parametr *grey to grey*. Jedná se o dobu potřebnou ke změně z tmavě šedé (např. $[32, 32, 32]$) (RGB model) do světle šedé (např. $[128, 128, 128]$) a zpět. Výrobci se v poslední době zaměřují právě na tuto odezvu a tudíž je často udávána ve specifikacích jejich výrobků. Dříve byla udávána odezva součtová (tedy *rise* + *fall*), právě z těchto důvodů se odezva marketingově výrazně zlepšila zhruba kolem roku 2006.

Problém parametru *grey to grey* spočívá v tom, že výrobce si může zvolit libovolný přechod a tudíž si logicky zvolí ten nejrychlejší. Jiné změny pak mohou být daleko pomalejší (především u TN panelů, až pětinasobně). Z panelu, který má udávanou hodnotu např 8 ms, se stává panel se 48 ms, což je poměrně neúnosná hodnota (zvláště pro hráče her).

Různá délka odezvy na základě rozdílných jasů pixelů je způsobena nelineární závislostí vnějšího elektrického pole (viz kapitola 3.2) a propouštěného světla.

K minimalizaci této odezvy se často využívá technologie *OverDrive*. Cílem této technologie je zrychlit natáčení krystalů v LCD displayích. Toho se dosahuje tak, že do krystalu je krátkodobě puštěno několikanásobně vyšší napětí, než napětí odpovídající cílovému natočení krystalu. Tím se zajistí rychlejší natočení, ale zároveň i riziko nechtěného překonání požadovaného natočení. Tzv. překmit je potřeba následně anulovat napětím opačné polarity.

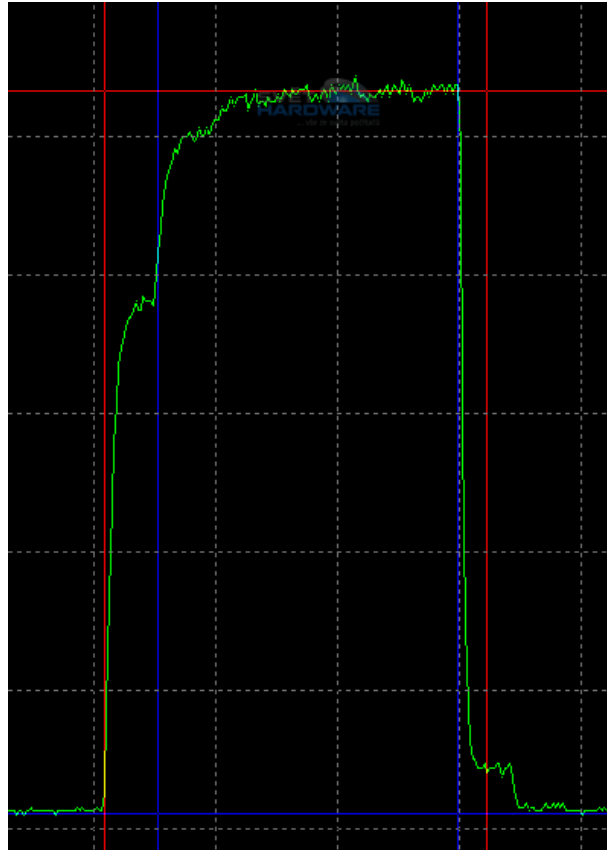


Obrázek 1: Průběh natáčení krystalů v čase

Na obrázku 1 je znázorněn typický průběh natáčení krystalů za použití technologie *OverDrive*. Levá část zvýrazněná červenou barvou je odezva *rise*, pravá označená zelenou je *fall*. Všimněte si překmitu v části *rise*, který je způsoben právě tím, že elektronika do pixelu dodává vyšší napětí po příliš dlouhou dobu a krystal se přetočí nad požadovanou hodnotu. Tyto překmity způsobují nepříjemný šum při sledování videa, her apod.

Dalším jevem spojeným s technologií *OverDrive* jsou tzv. *schody*, jak je zobrazuje obrázek 2. Ty jsou způsobeny tím, že vysoké napětí je odpojeno od krystalů dříve (aby se zabránilo výše zmiňovanému překmitu) - resp. předčasně. Tím se na snímku objeví rozdílná barva (až o 30 % od požadované) a požadované barvy je dosaženo až v dalším schodu. V časově širším hledisku tedy postupné skokové natáčení vytváří tzv. *schody*.

Z praktického hlediska je doba odezvy důležitá především pro hráče, kteří si nemohou dovolit čekat, až jim nepřítel vpadne do zad. Proto se na dobu odezvy ohlížejí jako na primární parametr a obrazovky vybírají prakticky jen podle ní. Tento trend se částečně přenesl mezi běžné (nenáročné) uživatele. Zde bych rád poznamenal, že pro takového člověka je naprosto zbytečné požadovat tyto extrémy (odezvu pod 20 ms), protože velké množství peněz investovaných do pár milisekund jednoduše neocení.



Obrázek 2: Schody - časový průběh natáčení krystalů

2.2 Inputlag

[1] Nedílnou součástí dnešních LCD monitorů je i takzvaný inputlag. Inputlagem se rozumí doba jakou potřebuje elektronika na zpracování obrazu. Pokud například bude elektronika zpracovávat obraz příliš dlouho, tak se může stát, že při střelení do nepřítele v rychlé akční hře jej vůbec nezasáhnete. Nepřítel totiž sice na obraze bude přesně na mušce, ale ve skutečnosti již bude o dva metry dál. Pro hráče je tedy inputlag hodně důležitý. Extrémní inputlag také vede k pocitu, že myš po obrazovce "plave". Zkrátka kurzor je za pohybem ruky zpožděný. U kancelářské práce to nevadí, ale profi hráči by tento aspekt měli sledovat.

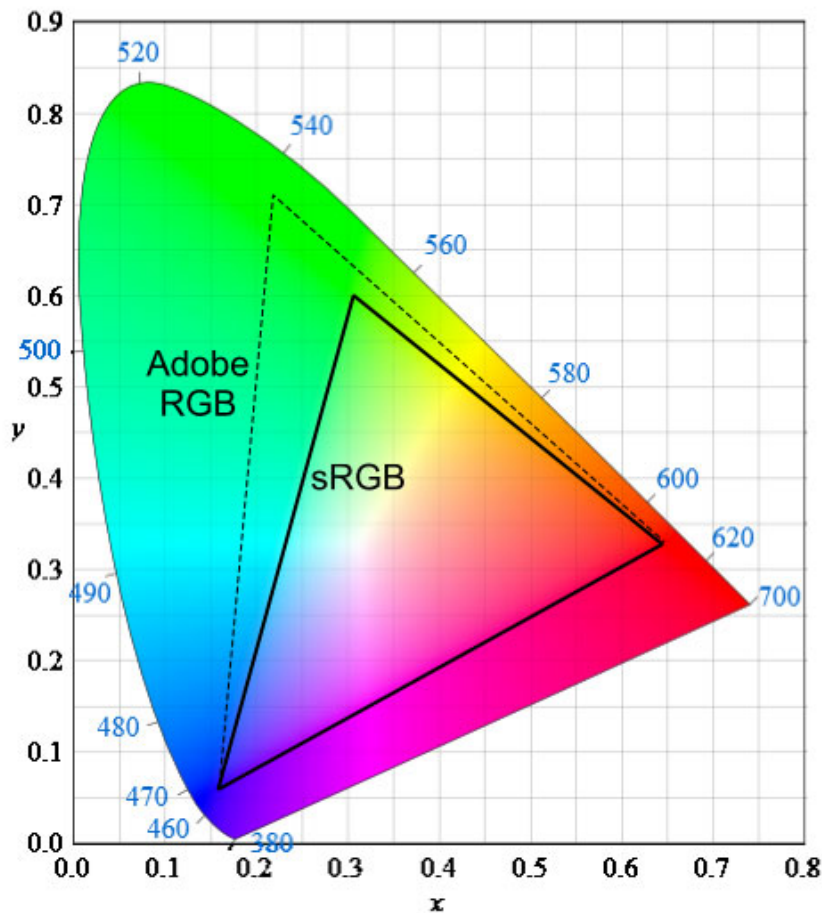
2.3 Gamut

Definice: 2. *Gamut, resp. barevný gamut, je dosažitelná oblast barev v určitém barevném prostoru.*

Prakticky se jedná o to, jaké množství barev z celkového počtu barev rozlišitelných člověkem (resp. jeho okem) je dané zobrazovací zařízení skutečně schopné zobrazit.

Barvy, které je člověk schopen vnímat svými očmi (citlivými na 3 barvy - červená, zelená, modrá), přehledně znázorňuje model *CIR 1931* (zobrazen barevnou oblastí na obrázku 3). Diagram referuje i citlivost lidského oka pro různé barvy - například platí, že lidské oko rozezná mnohem více odstínů zelené barvy, než barvy modré.

Trojúhelníky na obrázku 3 znázorňují tzv. *barevné modely*. To jsou modely, podle kterých zaznamenáváme, ukládáme a zobrazujeme barvy ve fotoaparátech, počítačích



Obrázek 3: Barevné prostory a CIE 1931

a monitorech. Z obrázku jednoznačně plyne, že barevné modely nepokrývají celý rozsah lidského oka a každá fotografie tudíž určitou informaci oproti oku nesporně ztrácí.

V dnešní době je nejpoužívanější model *sRGB*. Většina monitorů ho také přímo podporuje. *Adobe RGB* monitory dnes využijí především grafičtí návrháři a fotografové, tento model má dále lepší pokrytí tiskařského prostoru *CMYK*. Při zobrazování dat na monitoru je nutné zobrazovat obraz v takovém barevném profilu, ve kterém byl vytvořený. Například zobrazení *sRGB* fotky na *Adobe RGB* monitoru, který neví o tom, že zobrazuje *sRGB* fotku, vede k přesaturaci této fotografie.

2.4 Contast (kontrast)

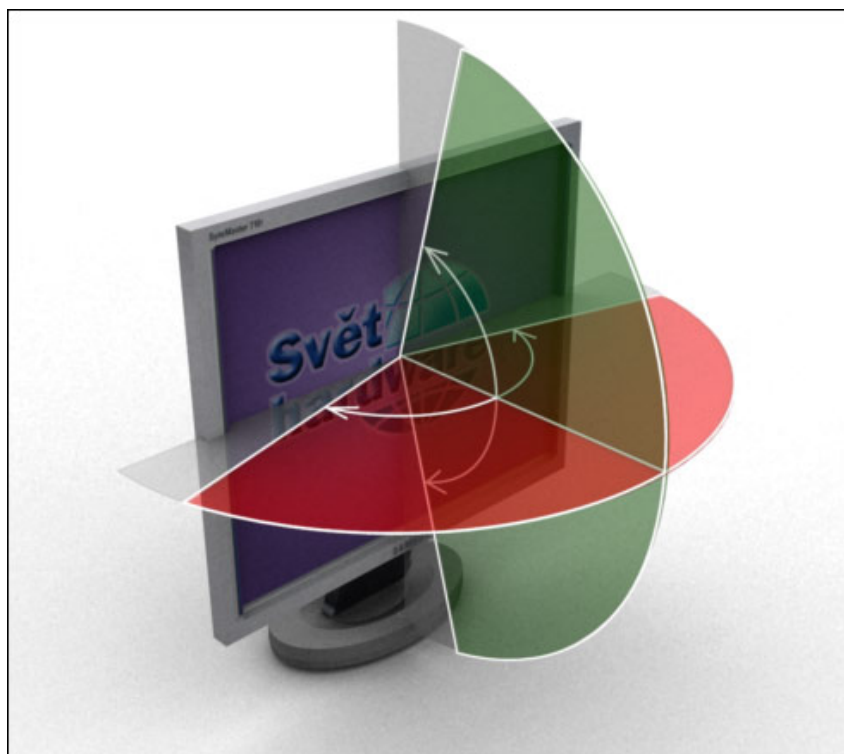
Jedná se o poměr dvou čísel - svítivosti bílé a svítivosti černé barvy. Obě hodnoty jsou měřeny v luxech. Typické kontrasty u *xVA* panelů dosahují hodnot cca $4000-5000:1$, u ostatních technologií (*IPS*, *TN*) cca $700-1000:1$. Kontrast nabývá svůj význam především u sledování filmů, například u hororů silně podporují zážitky.

V dnešní době se často udává tzv. *dynamický kontrast*, který dosahuje hodnot i $20000:1$. Tato hodnota totiž nevyjadřuje přímo kontrast zobrazitelný samotnými tekutými krystaly, ale kontrast, který dokáže zobrazit display v průběhu času. Navýšení poměru je dosaženo ztmavováním a zesvětlováním podsvícení. U filmů to obvykle vypadá velice dobře - působí živěji, ale při klasické práci v operačním systému a při práci s grafikou to může i vadit,

a proto lze u některých panelů dynamický kontrast vypnout. Většina dnešních monitorů však má detekci pro dynamický kontrast zvládnutou velmi dobře a pokud se na obrazovce objeví pár černých a pár bílých míst (typicky práce v operačním systému), tak je dynamický kontrast deaktivován. Naopak při filmech začne pracovat dobře.

2.5 Viewing angles (pozorovací úhly)

Definice: 3. *Pozorovací úhly udávají úhel, pod kterým má obraz kontrast 10:1 popř. 5:1.*



Obrázek 4: Pozorovací úhly

Prakticky se jedná o úhly, před jejichž překročením lze obraz rozumně pozorovat (viz obrázek 4). Po jejich překročení obraz začne šedivět a kontrast klesne na minimální hodnotu. Na tento parametr obrazovek je nutné dávat pozor, pokud chceme například sledovat film z postele atp.

2.6 Brightness (jas)

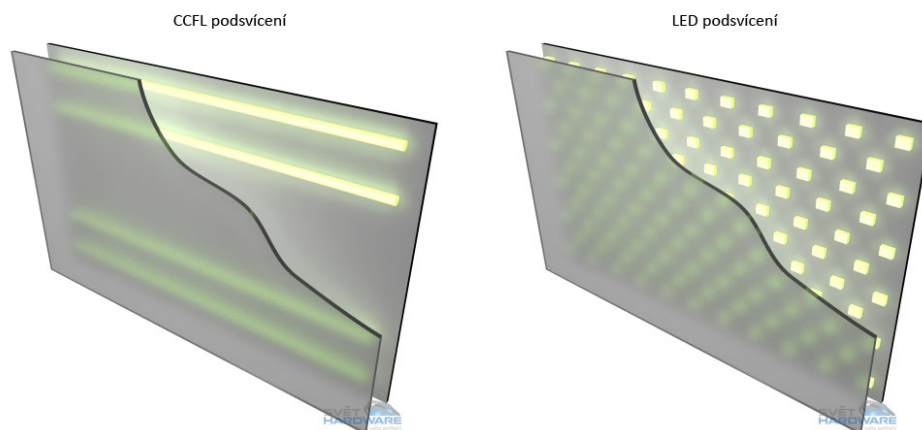
Jedná se o parametr udávaný v jednotce cd/m^2 , je úzce spjatý s kontrastem a jeho hodnota udává, kolik světla získáme z televize (monitoru) při rozsvícení bílé barvy na metr čtvereční. Příliš vysoký jas může oslňovat, nízký jas (při nízkém kontrastu) naopak neprokresluje detaily. Proto je dobré dávat pozor na to, aby display měl rozumný rozsah jasu. Čím je vyšší kontrast, tím je podání černé lepší i při vysokém jasu.

3 Technologie Liquid Crystal Display (LCD)

Technologie LCD je založena na principu tekutých krystalů, které slouží k regulaci intenzity propouštěného světla pro každou ze tří barev (red, green, blue). Zdrojem světla je

bílé světlo v pozadí. Nyní detailně popíši všechny části LCD obrazovky.

3.1 Zdroj světla



Obrázek 5: CCFL a LED podsvětlení

Většina panelů tak, jak je známe, je vybavena aktivním zdrojem světla (výjimkou jsou například digitální hodinky). K podsvícení se používají tenké trubice (tzv. *CCFL tubes*), ve kterých probíhá výboj v plynu. Důraz je kladen na barvu výboje (musí být bílá) a jeho teplotu, která by se neměla odchýlit od 6000 K .

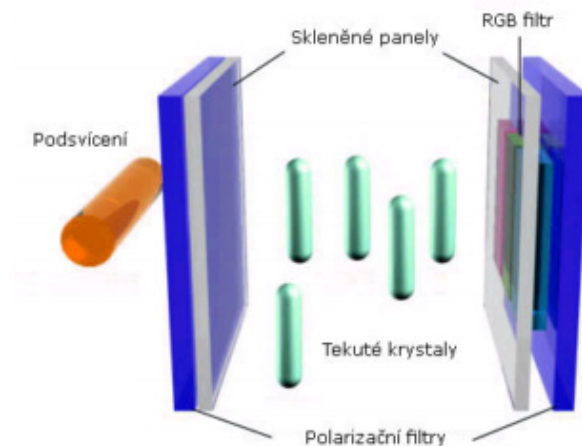
Dále je nutné světlo rovnoměrně rozvést po celé ploše obrazovky. Toho lze docílit například větším počtem trubic (profesionální monitory obsahují až 14 trubic - panely *EIZO*). Zvětšením počtu trubic se také prodlužuje životnost zobrazovacího zařízení (každá trubice je vytavena mnohem menší zátěží). Obvyklá životnost trubic je cca $50\,000$ hodin, což je výrobcem udávaný čas, za který klesne svítivost trubic na $1/2$. O rovnoměrné rozvedení světla po celé ploše obrazu se dále starají sítě optických vláken.

Další metodou podsvícení obrazovek jsou LED diody. U dnešních televizí se vyskytuje výhradně právě LED osvětlení a to díky vyšší životnosti, rovnoměrnosti osvětlení (LED můžeme dát za celou obrazovku) a nižší spotřebě. Dnes se také často setkáváme s lokálním vypínáním podsvětlení za účelem zvýšení kontrastu (tzv. dynamický kontrast, viz 2.4) - další výhodou, kterou poskytuje pouze LED technologie. Pokud se tedy dnes setkáme s označením *LED TV*, neznamená to, že by byl obraz složen z *RGB* LED diod, ale že místo výbojky je pod tekutými krystaly LED osvětlení. Skutečnými LED televizory (kde opravdu existují *RGB* led diody) jsou tzv. *OLED* panely, které k miniaturizaci LED diod (největší problém LED technologie) použily organický materiál (*OLED* = Organic LED).

3.2 Tekuté krystaly

Tekutý krystal je látka, která vykazuje vlastnosti krystalu, ale zároveň se chová jako kapalina. Je tedy na pomezí obou skupenství. Její objev přisuzujeme chemikům Mettenheimer, Virchow a Valentin.

Nad zdrojem světla je umístěna vrstva tekutých krystalů, která svým natočením reguluje, kolik světla momentálně propouští. Celý princip je založen na polarizaci. Než

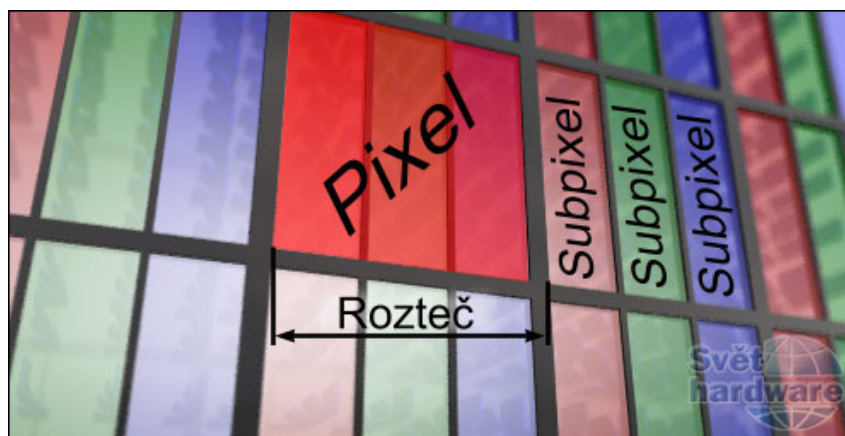


Obrázek 6: Schéma LCD obrazovky

světlo vstoupí mezi tekuté krystaly, projde polarizačním filtrem, který sjednotí jeho rovinu polarizace. Při průchodu tekutými krystaly je rovina polarizace měněna v závislosti na natočení krystalů (resp. na napětí připojeném ke krystalům). Po průchodu má světlo určitou rovinu polarizace a je vystaveno dalšímu polarizačnímu filtru. Světlo pak prochází v závislosti na tom, jak moc (resp. málo) tekuté krystaly změnilo rovinu polarizace.

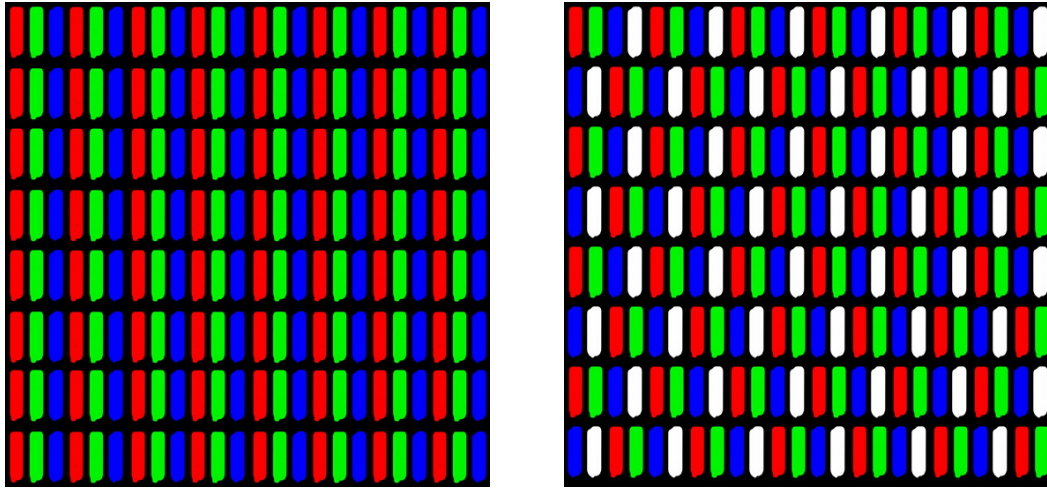
3.3 RGB maska

Nad tekutými krystaly je umístěna tzv. *RGB mřížka*, která zajišťuje, že tento subpixel (viz níže) bude mít určitou barvu.



Obrázek 7: K vysvětlení pojmu subpixel

Každý pixel se skládá ze tří složek: červená (red), zelená (green) a modrá (blue). Tyto složky nazýváme *subpixely*. Vzdálenosti mezi jednotlivými subpixely jsou tak malé, že je lidské oko od sebe nerozezná. Změnou vzájemných intenzit těchto složek získáváme kombinaci RGB barev, kterou v oku vnímáme jako jednu barvu. Takto jsme schopni zakódovat typicky minimálně 16 miliónů barev (hloubka 8 bitů: každý subpixel má rozsah 0-255). Obvyklý display má (samozřejmě opět závisí na použité výrobní technologii) třikrát více subpixelů, než pixelů. Například tedy jeden řádek *full hd* displaye o $1920px$ má $5760spx$.



Obrázek 8: RGB a RGBW mřížky

To znamená 5760 oddělených polí s tekutými krystaly a 5760 samostatných tranzistorů řídicích el. pole v těchto tekutých krystalech na jeden řádek.

Vedle klasické RGB matice existuje například i tzv. *RGBW* matice, kde je každý pixel doplněn navíc o subpixel s bílou barvou, což zvyšuje jas a prodlužuje životnost obrazovky. RGB složky zde v podstatě slouží k obarvení bílého světla. Viz obrázek 8.

4 Technologie výroby LCD panelů

Samotný princip natáčení tekutých krystalů nic sám o sobě neříká o tom, jak bude konstrukčně řešeno jeho okolí a tedy podstatná část celého zobrazovacího zařízení. Postupem času se tak vyvinulo celé spektrum technologií využívající princip LCD, které vykazují (mezi sebou navzájem) poměrně rozdílné vlastnosti. Tato kapitola si klade za cíl postihnout tyto vlastnosti a vytvořit koherentní přehled o principech těchto technologií.

4.1 Twisted Nematic (TN)

Typickým parametrem poměrně dobře charakterizujícím celou technologii TN je natočení takové polarizačních filtrů, které ohraničují tekuté krystaly, tak, že v základním stavu krystal propouští světlo. Ve skutečnosti jsou filtry "různě natočené" (resp. vůči sobě propouští světlo s různou rovinou polarizace). To si mohou (a musí) dovolit, protože vychází z faktu, že krystal, který není umístěn v elektrickém poli, zaujímá takovou nativní konformaci molekul, že postupně stáčí rovinu polarizace světla, které jim prochází (jedná se vlastně o jakousi formu šroubovice).

I když takovýto panel má tím pádem nižší spotřebu energie při zobrazování světlých barev (což se může zdát jako výhoda), opak je pravdou. Problém nastává hlavně v případě vadného pixelu, resp. subpixelu, který pak neustále propouští světlo. Stačí jeden vadný subpixel, aby dojem z filmu byl kompletně zničen jedním zeleně svítícím bodem.

Hlavními výhodami této technologie je její nízká cena, díky které jsou TN displaye velmi často montovány například do levných notebooků, a velmi rychlá odezva. Mezi nevýhody této technologie patří horší podání barev (obrazovky obvykle poskytují pouze 6-ti bitovou hloubku a zbylé bity interpolují, což má za následek ztrátu kvality) a velmi malé pozorovací úhly, které navíc silně závisí na tom, jestli se na panel díváte shora, nebo

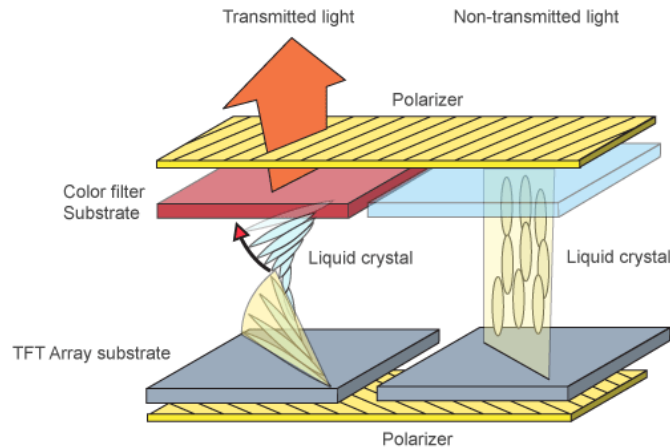


Diagram 2: The Fundamental Photonics of Liquid Crystal (Twisted Nematics)

Obrázek 9: Princip TN panelu

zespona. Tento problém poměrně dobře řeší tzv. *film*, což je vrstva přidaná nad samotný display, která rozptyluje světlo a tím zvětšuje pozorovací úhly. Tyto obrazovky se pak označují *TN+film*, ale protože se dnes s čistým TN (bez filmu) už prakticky nesetkáme, označení *film* se často vynechává.

4.2 In Plane Switching (IPS)

Technologie IPS se vyznačuje tím, že pokud na subpixel není připojeno napětí, tak tento bod nepropouští světlo. V případě vadného pixelu tak IPS panel nevytváří nepříjemné světlo (jako TN monitor), ale subpixel jednoduše zůstane černý. Běžný uživatel vadný pixel nerozezná od smítka spadlého na display. Toho, že pixel propouští světlo pouze při připojení napětí je dosaženo v podstatě jednoduchou změnou vzájemné orientace polarizačních filtrů.

Mezi hlavní výhody IPS panelů patří širší spektrum barev (až 10 bitů) a velké pozorovací úhly. Nevýhodou je naopak vyšší pořizovací cena.

IPS monitory lze najít především v grafických studiích, nebo u fotografů, kde je kvalita podání barev nutnou podmínkou. Vyšší kvalita s sebou ale samozřejmě nese vyšší cenu a proto se s těmito monitory setkáváme spíše zřídka.

4.3 Další technologie

V praxi se lze setkat s nejrůznějšími deriváty dvou výše zmíněných (a nejdůležitějších) technologií, jako jsou například *PLS* displaye, či *(P)VA* panely. Pro bližší pochopení těchto principů doporučuji pročíst [1].

5 Technologie vylepšující tekuté krystaly

V této kapitole se dočtete o nadstavbových technologiích, které se snaží posunout vlastnosti LCD panelů k lepšímu. Rád bych poznamenal, že se jedná pouze o částečná vylepšení

a například sebelepší TN panel nebude ve výsledku nikdy tak dobrý, jako průměrný IPS panel.

Mezi tyto technologie patří především:

- **OverDrive**

O této technologii (a jejích problémech) jsem se již zmiňoval v kapitole 2.1. Princip této technologie byl poměrně dobře vysvětlen a proto bych rád pouze dodal, že display s technologií OverDrive bývá často označován popiskem *RTC (Response Time Compensation)*.

- **Dynamický kontrast**

K pojmu již vysvětleném v kapitole 2.4 je nutné dodat, že u dnešních televizorů se ve velkém procentu setkáváme s LED podsvětlením, kde se možnost dynamického kontrastu vyloženě nabízí. Typický panel má například 16 sektorů, ve kterých nastavuje jas podsvětlení odděleně a právě tím dosahuje dynamického kontrastu.

- **Frame Rate Control (FRC)**



Obrázek 10: Technologie Frame Rate Control

Tato technologie využívá rychlosti panelů a hlavně nedokonalosti lidského oka. Pokud panel nedokáže určitou barvu zobrazit (má malou barevnou hloubku), tak ji v jednom snímku zobrazí např. více světlou a v dalším naopak tmavší. Ve výsledku si oko tyto dvě různé barvy spojí do jedné a vidí vlastně správnou barvu. Samozřejmě je to problém, pokud se pixel v každém novém snímku má změnit na novou barvu. V tom případě zkrátka nedokáže zobrazit správnou barvu a obraz je degradován (nastává prakticky jen u her).

- **Film**

Viz 4.1.

- **Dotykové vrstvy**

Nejedná se ani tak o technologii vylepšující samotný obraz, ale spíše o určitou nastavbu, která umožňuje konstruovat dotykové displaye. Protože dotykové ovládání samo o sobě přesahuje rozsah této práce, uvedu jen, že existují dvě hlavní technologie detekce dotyku: kapacitní a odporová.

Kapacitní display má výhodu v tom, že není nutné na obrazovku mechanicky tlačit, naopak mezi nevýhody patří, že je zapotřebí použít lidský prst, popřípadě materiál o podobné vodivosti (to je problém například v zimě, když chceme ovládat mobil

přes rukavice). Dotykové plochy založené na této technologii se dnes běžně montují například do mobilů a tabletů.

Druhá technologie, odporová, je založena na fyzickém promáčknutí jedné vrstvy do druhé (tedy fyzickému styku elektrod). To s sebou nese požadavek na určitý mechanický tlak, ale zároveň umožňuje použití technologie například v prašných prostředích, nebo jinými nástroji, než je ruka. Proto se tyto dotykové plochy montují například do CNC strojů.

6 Závěr

Pokud po přečtení této práce váháte, jaká technologie je nejlepší třeba pro vás a jestli taková vůbec existuje, vězte že je jí *e-IPS*, která v současné nabízí perfektní pozorovací úhly, obvykle rychlou odezvu a velmi slušné barvy za rozumnou cenu. Jedná se o univerzální technologii pro celé spektrum aplikací, ale samozřejmě platí, že pro specifické účely se mnohem lépe hodí technologie a konkrétní panel, který dominuje právě takovými vlastnostmi, které vyžadujete.

Rád bych zmínil, že prakticky celá tato práce je založena na článku [1], který za mě vlastně (bohužel) udělal všechnu práci. Všechny části textu, kde jsem použil přímou citaci článku, jsou řádně ocitované.

I přes původní plánovaný rozsah, kde jsem chtěl psát např. i o 3D technologiích, potažmo například o *OLED* technologii, si myslím, že práce splnila svůj účel. Další obsah navíc by byl absolutně neodprezentovatelný v přiděleném čase.

Pevně doufám, že tato prakticky zaměřená práce vám pomohla pochopit některé jevy, které pozorujete například u vašich monitorů a především vnesla určité světlo do toho, jak se chovat, na co brát ohled a co chápat jako marketingový tah třeba při koupi vlastního televizoru.

Reference

- [1] [http://www.svethardware.cz/Technologie LCD panelů](http://www.svethardware.cz/Technologie%20LCD%20panelů)
<http://www.svethardware.cz/technologie-lcd-panelu/14465>
- [2] Wikipedia
LED TV
http://en.wikipedia.org/wiki/LED-backlit_LCD_display
- [3] [http://www.svethardware.cz/Tekuté krystaly - Jak to všechno začalo?](http://www.svethardware.cz/Tekuté%20krystaly%20-%20Jak%20to%20všechno%20začalo?)
<http://www.svethardware.cz/tekute-krystaly-jak-to-vsechno-zacalo/12311>
- [4] [http://atlas.pristine.com.tw/Princip LCD](http://atlas.pristine.com.tw/Princip%20LCD)
http://atlas.pristine.com.tw/mcclay/clients/cmo/images/tft_lcd-2.gif
- [5] [cnews.cz](http://www.cnews.cz/clanky/jak-funguji-monitory-crt-lcd-plazma)
Jak fungují monitory (CRT, LCD a plazma)
<http://www.cnews.cz/clanky/jak-funguji-monitory-crt-lcd-plazma>