

Audiovizuální technika

Obrazové displeje

Karel Fliegel (fliegek@fel.cvut.cz)



České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická Katedra radioelektroniky

Technická 2 166 27 Praha 6 Česká republika



12/5/2025

Obsah přednášky

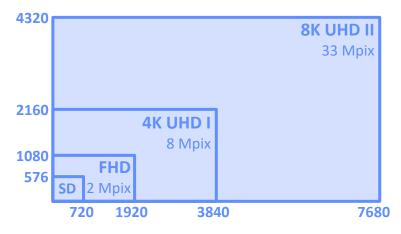
- Motivace pro vývoj nových technologií displejů
 - Požadavky na parametry UHD, WCG, pozorovací vzdálenost, ...
- Displeje s vakuovou obrazovkou CRT
- Displeje s kapalnými krystaly LCD
 - Princip LCD, barevný obraz, varianty TN, VA, IPS, FFS, ...
- Displeje s organickými LED
 - * Technologie OLED a porovnání základních parametrů s LCD, ...
- Projekční zobrazování
 - * Technologie DLP, 1x DMD, 3x LCD, LCoS, ...
- Další technologie zobrazování
 - Vysoký dynamický rozsah HDR, stereoskopické zobrazování, ...
 - Plasmové displeje PDP, displeje s emisí pole FED, SED, ...



Motivace

Rostoucí požadavky na parametry zobrazovačů

- Souvislost se systémy UHDTV
 - Větší rozlišení a ostrost více detailů
 - Realističtější zobrazení
 - Přináší i rušivé jevy
 - Větší náchylnost k nevolnosti vyvolané rychlým nebo nepřirozeným pohybem
 - Nutnost zvyšovat snímkový kmitočet pro vjem plynulého pohybu



- Lepší "kvalita zážitku" QoE (Quality of Experience)
 - Větší prostor pro umělecké úpravy
 - Větší "pohlcení pozorovatele"
 - Požadavky na lepší parametry vedle rozlišení (UHD)
 - Barevný rozsah WCG (Wide Color Gamut)
 - Dynamický rozsah HDR (High Dynamic Range)
 - Snímkový kmitočet HFR (High Frame Rates)











Motivace

Rostoucí požadavky na parametry zobrazovačů

- Dopad kolorimetrie přenosových soustav
 - Moderní systémy pro reprezentaci obrazu s rozšířeným barevným rozsahem WCG (Wide Color Gamut)
 - Porovnání barevných gamutů
 - Standardní gamut...
 - TV doporučení ITU-R Rec. 601 a 709
 - Grafika prostor sRGB
 - Rozšířený gamut...
 - TV doporučení ITU-R Rec. 2020
 - Digitální kino DCI-P3, AMPAS
 - Grafika prostor Adobe RGB

Parametr	Rec. BT.709/ sRGB		Adobe RGB		DCI-P3		Rec. BT.2020		ACES	
CIE 1931	X	У	Х	у	X	у	Х	у	Х	У
R	0,640	0,330	0,640	0,330	0,680	0,320	0,708	0,292	0,7347	0,2653
G	0,300	0,600	0,210	0,710	0,265	0,690	0,170	0,797	0,0000	1,0000
В	0,150	0,060	0,150	0,060	0,150	0,060	0,131	0,046	0,0001	-0,0770
Bílý bod	0,3127	0,3290	0,3127	0,3290	0,314	0,351	0,3127	0,3290	0,32168	0,33767
Pokrytí CIE 1931	35,9 %		52,1 %		53,6 %		75,8 %		100 %	

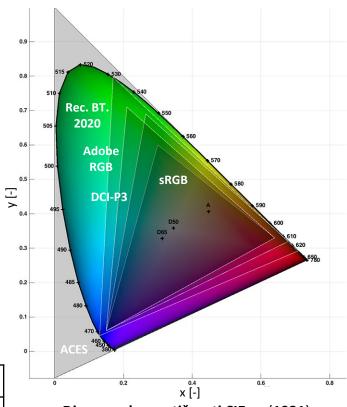
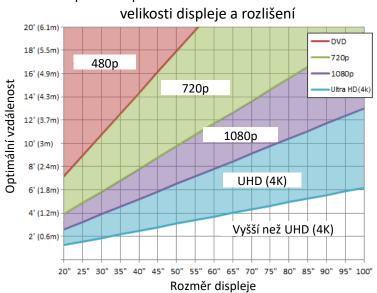


Diagram chromatičnosti CIE xy (1931) a porovnání barevných gamutů



Motivace

- Nutno zohlednit i pozorovací podmínky
 - Vzhledem k vlastnostem zrakového systému HVS
 - Vysoké rozlišení a jeho důsledky
 - Menší pozorovací vzdálenost...
 - **− SD (720 x 576) − okolo 6,0 H**
 - HD (1920 x 1080) okolo 3,2 H
 - UHD (3840 x 2160) okolo 1,6 H
 - H výška displeje
 - Doporučeno pro plnohodnotné
 docenění detailů v obrazu
 - Špatný zvyk pozorování z větší vzdálenosti



Optimální pozorovací vzdálenost vzhledem k

- Displeje podle principu vzniku obrazu
 - (1) Přímo vyzařující (zdroje) CRT, OLED, PDP, FED, SED, ...
 - (2) Nepřímo vyzařující (ventily) LCD, DMD, LCoS, ...

Displeje s vakuovou obrazovkou

Barevná obrazovka CRT (Cathode Ray Tube)

Katodová trubice (elektronka)

 Evakuovaná baňka, jedno nebo více elektronových děl (zdroj svazku elektronů) a vrstva luminoforů

Černobílé obrazovky - jediný paprsek

Barevné obrazovky - tři paprsky s maskou

– Delta, in-line (štěrbinová), Trinitron (Sony)



– (1) elektronové dělo (katoda, řídicí mřížky)

(2) svazky elektronů

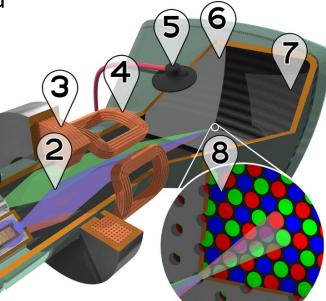
– (3, 4) zaostřovací a vychylovací cívky

- (5) anodové **napětí** (24 \div 32 kV!)

- (6, 7, 8) maska a vrstva luminoforů

Umožnila vznik elektronické TV

Hluboké, těžké, náchylné, nutnost VN... výroba skončila ~2010-2015



TFT

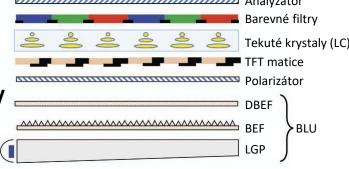
XY adresace

(využití TFT)

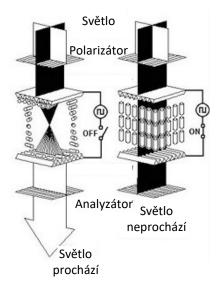
Displeje s kapalnými krystaly

Technologie LCD (Liquid Crystal Display)

- Stále asi nejrozšířenější technologie
 - Typický LCD má několik vrstev...
 - Podsvětlení, vrstva s molekulami LC, elektrody
 - Aktivní LCD matice tenkovrstvých tranzistorů TFT (Thin Film Transistor)
 - Dva polarizační filtry (polarizátor a analyzátor)
 - Podlouhlé molekuly LC stáčí rovinu polarizace
 - Využití tzv. twistově nematické (TN) struktury LC
 - Natočení molekul vlivem vnějšího elektrického pole
 - Světelný ventil tvořen Polarizátor + LC + Analyzátor
 - Podsvětlení...
 - První generace se zářivkou se studenou katodou CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp)
 - Malý kontrast, omezená životnost (~10 let)
 - V současnosti s LED (Light Emitting Diode)
 - Vyšší kontrast, širší gamut, delší životnost (~15 let)



Schematické znázornění struktury TFT-LCD (edge-lit)



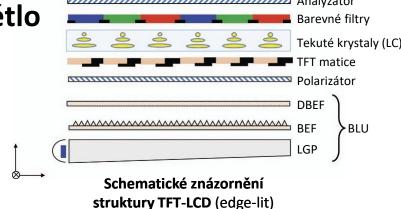
Základní princip funkce twistově nematické (Twisted Nematic) struktury LCD

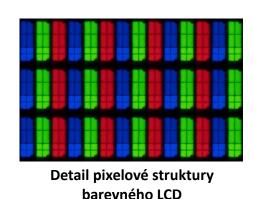


Displeje s kapalnými krystaly

Technologie LCD (Liquid Crystal Display)

- * Tekuté krystaly (LC) neemitují světlo
 - Nutné použít podsvětlení BLU (Back-Light Unit)
 - Barevné LCD využití pole filtrů FA (Filter Array)
- Sendvičová struktura TFT-LCD (edge-lit, thin-film transistor LCD)
 - Podsvětlení BLU (Back-Light Unit)
 - Zdroj světla LED (Light Emitting Diode)
 - Světlovodná destička LGP (Light Guide Plate)
 - Rozptylná fólie pro jas BEF/DBEF
 (Brightness Enhancement Film)
 - Světelný modulátor
 - Polarizátor → TFT matice →
 tekuté krystaly (LC) → barevné filtry (RGB) → analyzátor





MTG

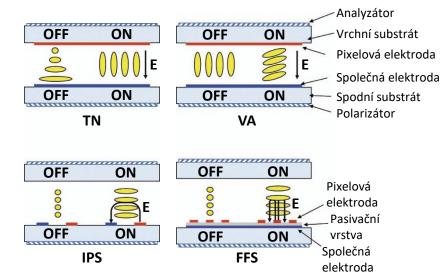
Displeje s kapalnými krystaly

Technologie LCD (Liquid Crystal Display)

- * Čtyři základní uspořádání LCD
 - TN (Twisted Nematic) ~1971
 - (M)VA (Multi domain –
 Vertical Alignment) ~1971/90s
 - IPS (In-Plane Switching) ~1973/90s
 - FFS (Fringe-Field Switching) ~1998

Uspořádání elektrod

Ovlivňuje vlastnosti displeje...



Různá uspořádání elektrod LCD

	TN	MVA	IPS	FFS	
Propustnost (% TN)	100 %	70-80 %	70-80%	88-98%	
Kontrastní poměr	~ 1000:1	~ 5000:1	~ 2000:1	~ 2000:1	
Pozorovací úhel	Uspokojivý	Dobrý	Výborný	Výborný	
Odezva	~ 5 ms	~ 5 ms	~ 10 ms	~ 10 ms	
Dotykový panel	Ne	Ne	Ano	Ano	
Primární aplikace Hodinky, laptop, desktop		TV, desktop, notebook	Desktop, notebook, tablet	Smartphone, tablet, desktop	

Technologie OLED (Organic Light Emitting Diode)

- Podobná struktura jako aktivní TFT LCD
 - Organická vrstva mezi elektrodami místo LC
 - Vrstva tvoří PN přechod z organických materiálů
 - Vrstva vyzařuje světlo po přiložení napětí
 - Tvořena deposicí monomerů ve vakuu
 - Nebo častěji přímým tiskem polymerovými inkousty
- Hlavní výhody OLED
 - Přímé vyzařování (nepotřebuje podsvětlení)
 - Malá tloušťka a hmotnost
- Hlavní nevýhody OLED (většinou již zvládnuté)
 - Nižší životnost organických materiálů
 - Náročné technologie zpracování organických vrstev
 - Zlepšení rovnoměrnosti substrátu
 - Náročná technika řízení jasu





První komerční OLED display Sony XEL-1 z roku 2007



- Technologie OLED (Organic Light Emitting Diode)
 - Organické LED emitují světlo
 - Původní základní struktura (Tang a VanSlyke, 1987)
 - Organické vrstvy mezikatodou a anodou (tenké < 1 μm)
 - Elektrony (electron) a díry (hole) rekombinují → emise světla
- Katoda

 EIL (electron-injection)

 EML (emitting)

 HTL (hole-transporting)

 Anoda

 Katoda

 EIL (electron-transporting)

 EML (emitting)

 HTL (hole-transporting)

 HIL (hole-injection)

 Anoda

Schematický diagram OLED (základní a vícevrstvá struktura)

- Současné vícevrstvé struktury
 - Emisní vrstva EML (dopanty, vysoká QE)
 - Transportní vrstvy (ETL, HTL) přivádí elektrony/díry do EML k rekombinaci
 - Injekční vrstvy (EIL, HIL) usnadňují přenos nosičů do organických vrstev
 - Elektrony/díry z katody/anody \rightarrow transport do EML \rightarrow rekombinace \rightarrow světlo
- Vrstvy OLED velmi tenké (< 1 μm bez substrátu)</p>
 - Ideální pro flexibilní displeje
 - Barevné (RGB) OLED → vhodné pro menší displeje
 - Bílé OLED s RGB barevnými filtry (CF) → vhodné pro větší displeje

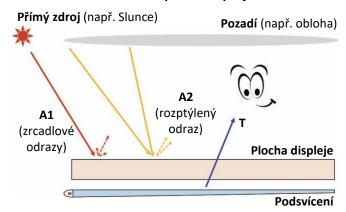
Chen, H.-W., Lee, J.-H., Lin, B.-Y., Chen, S., Wu, S.-T, Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives, Nature - Light: Science and Applications, 20

- Vybrané charakteristiky pro technologie OLED a LCD
 - Kontrastní poměr CR (Contrast Ratio)
 - OLED teoreticky nekonečný ($CR\sim\infty:1$) u LCD konečný ($CR\sim1000:1$)
 - * Ambientní kontrastní poměr ACR (Ambient Contrast Ratio)
 - Kvantifikuje kvalitu vjemu s ohledem na dosažitelný kontrast
 - OLED → teoreticky nekonečný CR → realističtější ACR

$$ACR = \frac{T_{\text{on}} + A}{T_{\text{off}} + A}$$

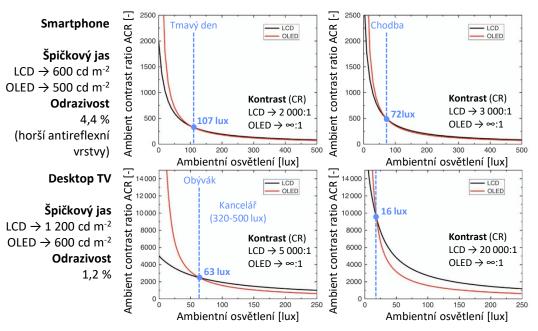
- $-T_{\rm on}$ ($T_{\rm off}$) zapnutý/vypnutý jas displeje
- -A jas odraženého světla
- ACR uvažuje kontrast ovlivněný odrazy
 - Zrcadlové odrazy (A1) lze většinou eliminovat
 - Rozptýlené odrazy (A2) nelze eliminovat

Schematické znázornění nežádoucích odrazů na ploše displeje



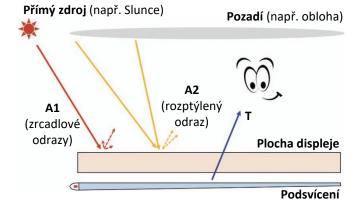


- Vybrané charakteristiky pro technologie OLED a LCD
 - * Kontrastní poměr CR (Contrast Ratio)
 - OLED teoreticky nekonečný ($CR\sim\infty:1$) u LCD konečný ($CR\sim1000:1$)
 - Ambientní kontrastní poměr ACR (Ambient Contrast Ratio)



Spočítaný ambientní kontrast ACR pro různé pozorovací podmínky

Schematické znázornění nežádoucích odrazů na ploše displeje



vizuální technika

Displeje s organickými LED

Vybrané charakteristiky pro technologie OLED a LCD

Barevný rozsah (color gamut)

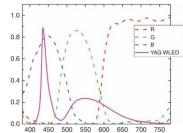
- YAG-WLED ~ 50 % Rec. 2020
- Různé varianty konvenční technologie LCD
 - WLED (white LED) \rightarrow YAG (yttrium-aluminium garnet) luminofor \rightarrow ~ 50 % Rec. 2020

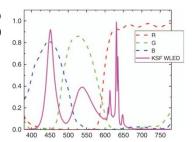
 - **QDEF** (quantum dot enhancement film) \rightarrow **FWHM** (~ 20 nm) \rightarrow ~ **90** % Rec. 2020
 - RoHS (těžké kovy Cd) → InP (indium phosphide)
 → ~ 70-80 % Rec. 2020

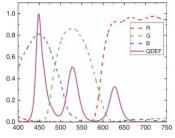




- RGB OLED \rightarrow 3x RGB EML (deep blue fluorescent / deep red phosphorescent) \rightarrow ↓ FWHM \rightarrow > 90 % Rec. 2020
- CFA OLED \rightarrow white OLED + filtry \rightarrow $^{\sim}$ 90 % Rec. 2020







Emisní spektra LED a propustnosti filtrů LCD



Vybrané charakteristiky pro technologie OLED a LCD

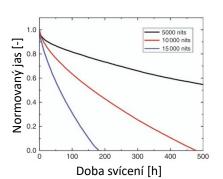
- Životnost...
 - TFT LCD → bezproblémové → > 10 let
 - OLED
 - Degradace \rightarrow RG OLED $T_{50@1000~cd~m^{-2}}$ $> 80~000~h \rightarrow$ bezproblémové
 - Původní řešení \rightarrow Blue OLED $T_{50@1000~cd~m^{-2}} \sim 3~700~h \rightarrow \downarrow 20~\times$ RG OLED
 - Moderní materiály \Rightarrow Blue OLED $T_{50@1000~cd~m^{-2}} \sim 56~000~h$

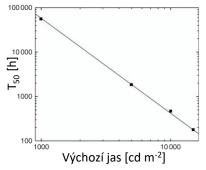
Energetické účinnost

- TFT LCD vs. OLED → účinnější světlý vs. tmavý obraz
 - Mez okolo ~ 65/30 % (průměrný jas pro RGB/CFA OLED)



Zahnuté (curved) TFT LCD vs. plně ohebné (foldable) OLED





Degradace OLED (pokles jasu s časem)

MTG

Projekční zobrazování

- Základní technologie pro projekční zobrazování
 - * Přímá nebo zadní (tzv. projekční TV) projekce
 - V posledních letech dosaženo vynikající kvality
 - Aplikace pro prezentace
 - Domácí kino a profesionální digitální kinosály
 - Využití prostorových modulátorů/ventilů SLM (Spatial Light Modulator)
 - Současné technologie
 - DLP (Digital Light Processing) od Texas Instruments
 - Matice mikrozrcátek DMD (Digital Micromirror Device) na čipu
 - Velice rozšířená a perspektivní technologie
 - micro-LCD
 - Miniaturní prosvětlované LCD
 - LCoS (Liquid Crystal on Silicon)
 - Kapalné krystaly na křemíku
 - Modulace světla odrazem (zrcadlo) s možností lepšího chlazení



Liquid Crystal on Silicon (LCoS)

DMD

Objektiv'

Filtrové kolo

Kondenzor

Projekční zobrazování

Technologie DLP (Digital Light Processing)

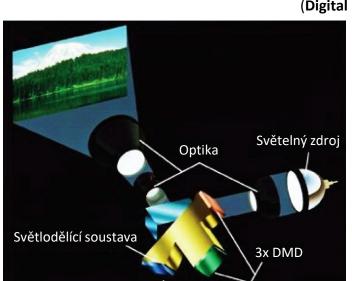
- DMD (Digital Micromirror Device)
 - Mikro-elektromechanická zrcátka $^{\sim}10 \times 10 \mu m$
 - Elektrostatické vychylování (on, off, klidová poloha)
 - Jas ovládán PWM (pulsně šířková modulace, ~kHz)
 - 1992 patenty XEROX, vývoj Texas Instruments
- 1x DMD s filtrovým kolečkem nebo 3x DMD

Projekční objektiv

Projekční

plocha

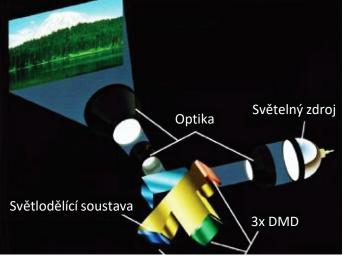
Světelný zdroj



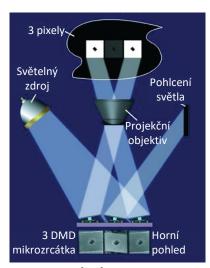


Optika

DLP deska Procesor



DLP projekce se třemi DMD



Princip DMD (Digital Micromirror Device)







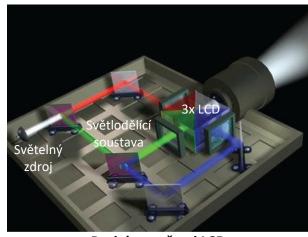
MTG

Projekční zobrazování

Dvě základní technologie 3x LCD nebo 1x DMD

3x LCD transmisní

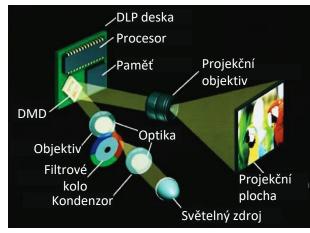
- Světlodělící soustava a 3 LCD modulátory
- Výhody
 - Světelná účinnost, barevná sytost, bez blikání
- Nevýhody
 - Horší konvergence, nehomogenita po ploše
 - Nižší odolnost vůči prachu, časová a tepelná nestabilita



Projekce s třemi LCD

1x DLP reflexní

- Výhody
 - Chlazení z druhé strany, vysoká odolnost
 vůči prachu, vysoká linearita, nepohlcuje
 lze velmi zatížit, vysoký kontrast, stabilita
- Nevýhody jednočipového uspořádání
 - Blikání, pohyblivý prvek, rainbow effect
 - Filtrové kolečko přidává bílou a další barvy (až 7 filtrů)

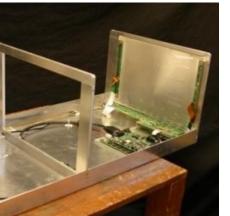


DLP projekce s jedním DMD

Displeje pro HDR

- Vysoký dynamický rozsah HDR (High Dynamic Range)
 - Běžný displej nestačí pro přímé zobrazení HDR mapy jasů
 - Běžný LCD s neproměnným podsvětlením
 - Výbojka CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp) nebo celoplošné LED
 - Dynamický rozsah 300:1 až 1000:1
 - Černá 0,1-1 cd/m², bílá maximálně 300-500 cd/m²
 - Princip zobrazování s vysokým dynamickým rozsahem
 - Systém využívající v čase a po ploše proměnné podsvětlení (nebo OLED)
 - Pole LED (local dimming) nebo zadní projekce → dynamický rozsah ~200 000:1 Distribuce podsvětlení Zobrazený snímek

Podsvětlení LCD pomocí zadní projekce





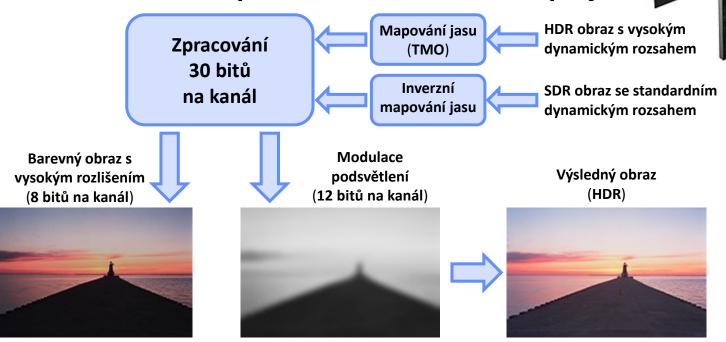


Displeje pro HDR

Vysoký dynamický rozsah HDR (High Dynamic Range)

Podsvětlení oblastí maticí LED (local dimming)

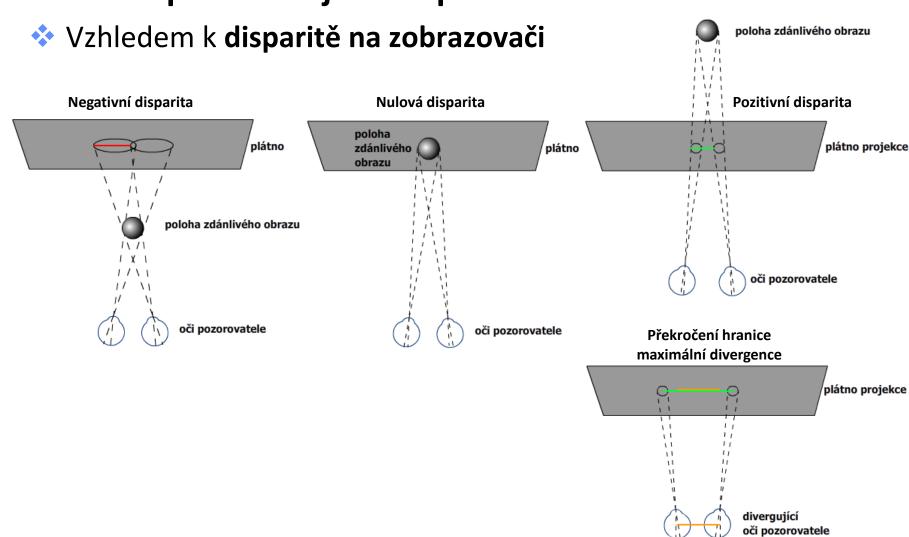
- Například profesionální SIM2 HDR 47E S 4K
- 2202 oblastí 1920 x 1080 pixelů
- Maximální jas 4000 cd/m², kontrast 20 000:1
- Zobrazování v profesionálním HDR displeji



Matice

podsvětlení

Zdánlivá poloha objektu v prostoru



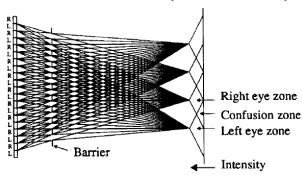


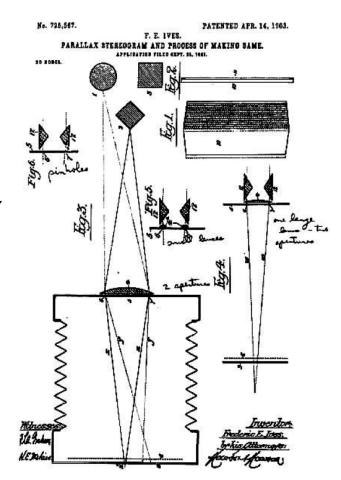
- Historie 3D zobrazování
 - Téměř 200 let historického vývoje
 - 1853 princip anaglyfu s barevnými filtry





- Polarizační brýle (1891) lepší vlastnosti
- 1903 Frederic Eugene Ives popsal použití paralaxní bariéry (bez brýlí)
 - U.S. Patent No. 725, 547 (15. 4. 1903)

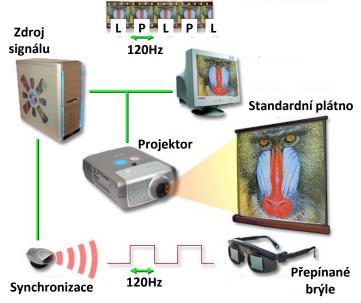




Princip klasických projekčních systémů

- Nejběžnější projekční řešení
 - (a) Pasivní stereoskopický systém s polarizačními brýlemi
 - Výhody: Kvalita obrazu, vysoké rozlišení, bez blikání, výhodné pro velké sály
 - Nevýhody: Dva projektory, speciální "stříbrné" plátno, přeslechy
 - (b) Aktivní stereoskopický systém s časovým multiplexem
 - Výhody: Barevnost, běžné plátno, běžné zobrazovače, dobrá separace
 - Nevýhody: Nákladné přepínané brýle, blikání





(b) Aktivní stereoskopický systém

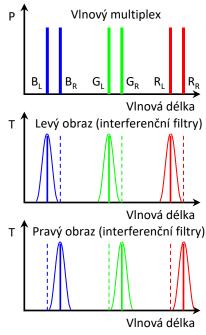
www.gali-3d.com



Technologie interferenčních filtrů

- Používané v současných 3D kinech
 - Pasivní stereoskopický systém s brýlemi
 - Dolby 3D Digital Cinema
 - Jednoduchá instalace do 2D digitálních projektorů
 - Rotační filtrové kolo
 - Instalované mezi světelný zdroj a modulátor
 - Řídicí jednotka synchronizuje filtrové kolo a projektor
 - Lehké brýle pro několikanásobné použití
 - Založeno na technologii INFITEC
 - INterference Filter TEChnology
 - Interferenční filtry v projektoru a v brýlích
 - Vlnový multiplex...
 - Levé oko
- Červená 629nm, Zelená 532nm, Modrá 446nm
- Pravé oko
- Červená 615nm, Zelená 518nm, Modrá 432nm



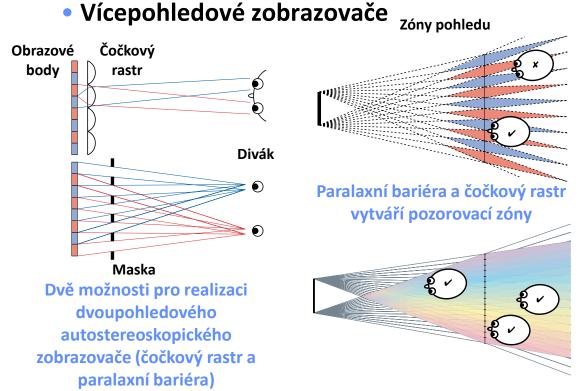


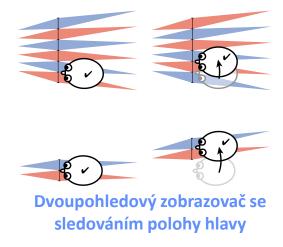


Autostereoskopické systémy bez brýlí

- Typy autosteresokopických zobrazovačů
 - Dvoupohledové zobrazovače (pro levé a pravé oko)
 - Zobrazovače se sledováním polohy hlavy (standardně dvoupohledové)

• Zobrazovace se siedovanim polony mavy (standardne dvoupomedove)







Plasmové displeje

Technologie PDP (Plasma Display Panel)

Tvorba obrazu v PDP

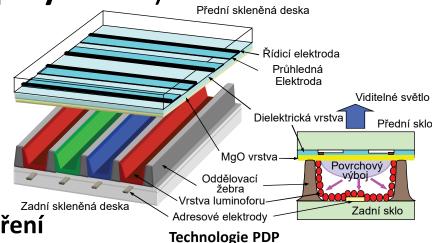
- Luminofory červené, zelené, modré
- Komůrky s inertním plynem (xenon, neon, helium, argon)
- Více jak milion miniaturních zářivek
- Výboj v ionizovaném plynu → UV záření
- Přeměna na viditelné světlo luminoforem



Jasný obraz (nejde o ventil), pozorovací úhel, velké plochy (150", ~3,5m)

Nevýhody oproti LCD

- Nižší životnost, větší energetická náročnost, větší hmotnost
- Vypalování obrazu potlačení (speciální luminofor, posouvání obrazu)
- Omezení funkčnosti ve vyšších nadmořských výškách
- ❖ Výroba PDP ukončena ~2016

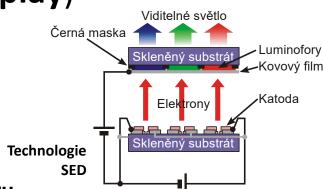


MTG

Displeje s emisí pole

Technologie FED (Field Emission Display)

- Princip podobný jako u obrazovky CRT
 - Elektrony uvolňované ze studené katody
 - Miliony miniaturních elektronových děl
 - Realizace pomocí nanotrubic
 - Každá trubice budí vymezenou plošku luminoforu
 - Lepší energetická účinnost než u PDP a LCD
 - Lepší kontrastní poměr ale problém vypalování obrazu
- Varianta technologie SED (Surface conduction Electron emitter Display)
 - Luminofor je buzen emisí elektronů díky povrchové vodivosti
- Pouze prototypy komerční vývoj neúspěšně ukončen
 - Vývoj FED zejména Sony, vývoj ukončen 2010
 - Vývoj SED zejména Toshiba a Canon, vývoj přerušen 2010
 - Pouze speciální aplikace v medicíně a filmovém průmyslu, ...





MTG

Použitá a doporučená literatura

- Wolfe, J.M., et al., Sensation and perception, Sinauer Associates, 2018.
- Westheimer, G., Depth rendition of three-dimensional displays, J. Opt. Soc. Am. A 28, 1185-1190, 2011.
- □ Son, J.-Y., Javidi, B., Kwack, K.-D., **Methods for displaying three-dimensional Images**, Proceedings of the IEEE, 2006.
- Dogson, N. A., Autostereoscopic 3D displays, IEEE Computer, 2005.
- Bovik, A. C. Handbook of Image and Video Processing, Elsevier, 2005.
- Schreer, O., Kauff, P., Sikora, T., 3D Videocommunication, Wiley, 2005.
- Chen, H.-W., Lee, J.-H., Lin, B.-Y., Chen, S., Wu, S.-T, Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives, Nature Light: Science and Applications, 2018.



Audiovizuální technika

Děkuji za pozornost!



České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická Katedra radioelektroniky

Technická 2 166 27 Praha 6 Česká republika



12/5/2025