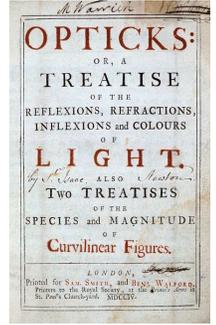
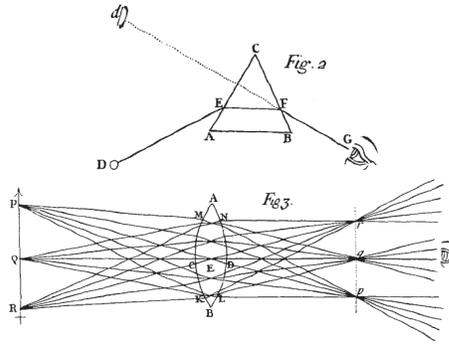




## Opticks – Isaac Newton



Author: Isaac Newton

Title: *Opticks: Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflexions and Colours of Light. The Second Edition, with Additions* (London: 1718)

## Senzory s optickým princípom

Využívajú svetelný tok v rôznej podobe na vytvorenie výstupného signálu.

- **fotoelektrické** – geometrická optika a ovplyvňovanie svetelného toku meranou veličinou, menšia dynamika
- **optoelektronické** – aj vlnová podstata svetla, vysoká dynamika, väčšie nároky na zdroje a snímače svetla
- **ostatné** – spolupracujú s inými princípmi (akustooptika)

Podľa činnosti:

- **spojité** – spojitá zmena výstupu
- **dvojhodnotové** – len "svetlo - tma" (max. a min.)
- **impulzné** – periodický dvojhodnotový režim

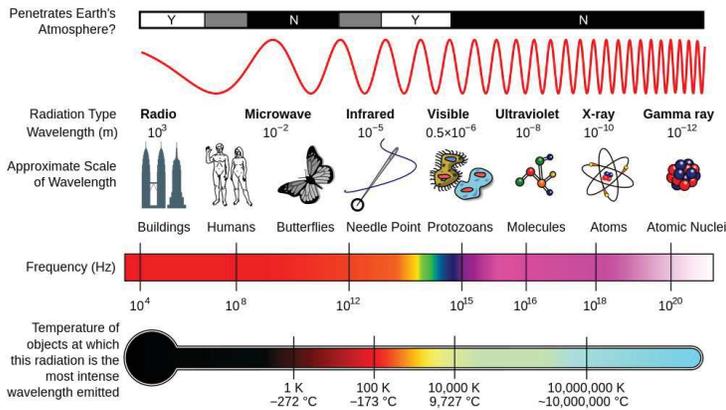
## Svetlo light

Elektromagnetické vlny v rozsahu 360 až 780 nm, ktoré vyvolávajú u človeka zrakový vnem.

Vlastnosti svetla môžeme opísať

- **kvalitatívne** - spektrum, polarizácia, koherencia...
- **kvantitatívne** - fotometria

## Spektrum

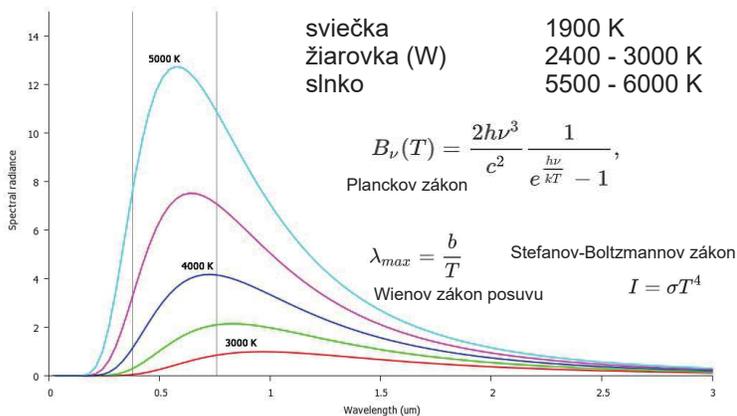


## Vyžarovanie čierneho telesa black body radiation



The image is 1700 pixels wide and represents the temperature range of 0K to 1700K linearly, so the x coordinate in pixels represents the temperature in kelvin.

# Vyžarovanie čierneho telesa



# Teplota chromatičnosti (farebná teplota)

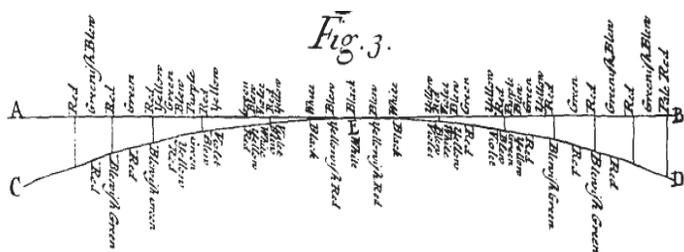
Fiktívna teplota zdroja svetla v [K] :

- sviečka 1900 K
- žiarovka (tungsten) 2400 - 3000 K
- slnko 5500 - 6000 K
- zamrač. obloha 6400 - 7000 K
- biele LED 6500 - 8000 K
- modrá obloha 13 000 K

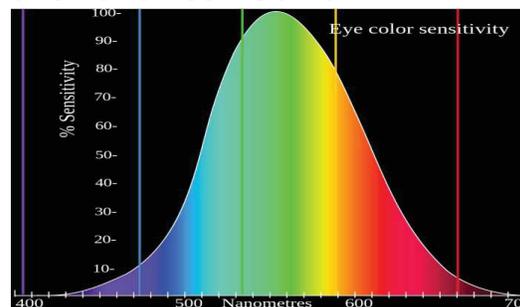


Poznámka: Paradoxne sa "teplými farbami" nazývajú tie, ktoré majú nízku farebnú teplotu.

# Spektrálna charakteristika



# Spektrálna charakteristika

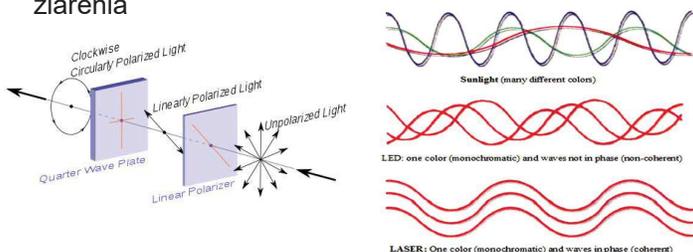


- IR - Infrared - časté využitie pre senzory (760nm)
- UV - Ultraviolet - výbojky, špeciálne oblasti (380nm)

monochromatické žiarenie - LED a laserové diódy

# Polarizácia a koherencia

- polarizované žiarenie (svetlo) - obsahuje kmitanie len v jednej rovine
- koherentné žiarenie - všetky elementárne lúče sú navzájom vo fáze, vznikajú v rovnakom čase v rovnakom mieste (lasery), nutná podmienka je monochromaticnosť žiarenia



# Základné fotometrické veličiny

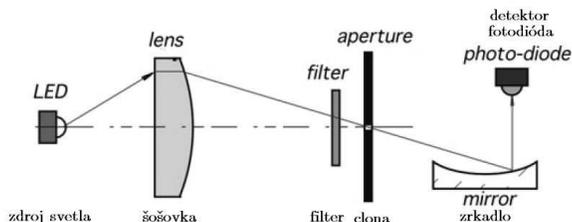
Veličina	Jednotka	Definícia	Vzťahy
žiarivý tok (výkon) $\Phi$ radiant power	Watt [W]	Množstvo energie prenesené cez plochu za jednotku času.	
svetelný tok $\Phi$ luminous flux	Lumen [lm] = cd.sr	Bodový zdroj svetivosti 1cd do uhla 1 steradián. Vzhľadom na oko.	$\Phi = I \cdot \Omega$
svietivosť I luminous intensity	Kandela [cd]	Svietivosť v smere zdroja, monožiarenie 540.10 <sup>12</sup> Hz, žiarivosť 1/683 W/sr.	Základná veličina SI
jas L luminance	[cd/m <sup>2</sup> ] stará: [nit]	Podiel svetivosti a zdanej plochy A (kolmý priemet) v danom smere.	$L = I / A$
Intenzita osvetlenia E illuminance	Lux [lx] = lm/m <sup>2</sup>	Podiel svetelného toku $\Phi$ a plochy A na ktorú dopadá.	$E = \Phi / A$

Pozn. "ANSI Lumen" merané na viac miestach → spríemerenie (projektor)

## Optické systémy

Základné časti optických - fotoelektrických systémov sú:

- **zdroje svetla** - žiarovky, LED, výbojky, oblúkovky
- **snímače svetla** - fotodiódy, fototranzistory, fotoodpory
- **optická cesta** - šošovky, zrkadlá, filtre, clony, štrbiny



Príklad optického systému



## Optické systémy

Zdroje svetla  
Optická cesta  
Snímače

## Zdroje svetla: žiarovky incandescent light bulb



80 % výkonu sa mení na teplo

svetelná účinnosť

$$\eta = \frac{\text{svetelný výkon}}{\text{elektrický príkon}}$$

stúpa s teplotou vlákna



Poznámka: Praktické je vyjadrenie v lm/W

## Zdroje svetla: žiarovky – náplň

Normálne žiarovky:

- vákuum (3V / 0,2-0,3A)
- dusík + argón - znížený tlak (klasické 230 V)
- kryptón, xenón - atmosférický tlak (0,7-0,9A)

Wolfrámové (W, tungsten) vlákno 2900 K,  
η 5-18 lm/W, úbytok počas životnosti 15 %  
Poznámka: podžeravené žiarovky, dlhšia životnosť.

Halogénové žiarovky

- plyny HBr (bromovodík), CH<sub>3</sub>Br, CH<sub>3</sub>J, J, Cl, F
- banka - kremičité sklo (vyšší podiel UV)
- vlákno W 3100 K (T<sub>t</sub> 3600), η 20-35 lm/W, T 1000 hod

halogénový regeneračný proces:

W vlákno (> 900°C) → uvoľňovanie W → nie usadenie na vnútornej stene banky (250-900°C) ale → zlučiny (W + halogény) → pohyb zlučín v priestore → usadenie na W vlákne → ak teplota je > 900°C → disociácia (rozklad) → halogény do priestoru, W zostáva na vlákne.

Poznámka: Xenónové výbojky (auto) - zdroj žiarenia je výboj v plyne, vyzadujú vysoké napätie - menič



## Zdroje svetla: Svetlo emitujúce diódy (LED)

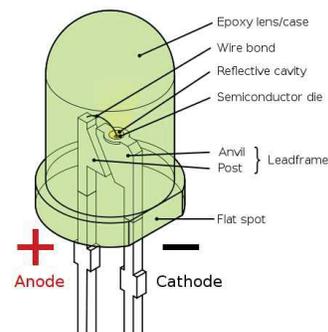


- Electroluminescencia
- viditeľný P - N prechod
- V - A charakteristika ako dióda
- U<sub>prah</sub> podľa typu 1,5 ÷ 3,5 V
- jas (svietivosť) je úmerný prúdu
- Životnosť (svietivosť 50%):  
10<sup>5</sup> ÷ 10<sup>6</sup> hod (t.j. 11 ÷ 114 rokov)
- spínacie časy < 100ns (10ns)
- svetlo je monochromatické
- η<sub>i</sub> → 1, η<sub>e</sub> → 1 -4%

V senzorovej technike  
• IR diódy (800 - 1000 nm)

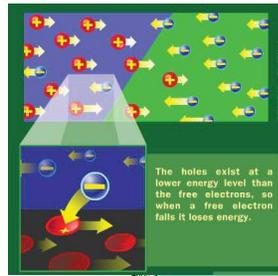
Biele LED (referát!!!)

- s luminoforom (konverzia žiarenia)
- multiprechodové (multichip)

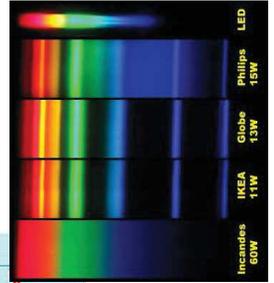
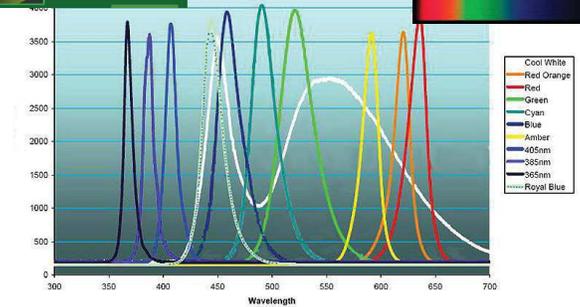


# Zdroje svetla: Svetlo emitujúce diódy (LED)

Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [V]	Semiconductor material
Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[60]} < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
Purple	multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta V < 4.4$	Diamond (235 nm) <sup>[61]</sup> Boron nitride (215 nm) <sup>[62][63]</sup> Aluminium nitride (AlN) (210 nm) <sup>[64]</sup> Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)—down to 210 nm <sup>[65]</sup>
Pink	multiple types	$\Delta V \sim 3$ <sup>[66]</sup>	Blue with one or two phosphor layers: yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, or white with pink pigment or dye. <sup>[67]</sup>
White	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor



High Power LEDs



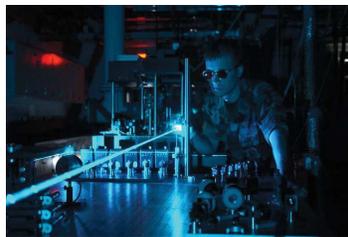
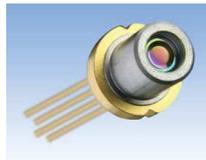
# Zdroje svetla: LASER

Podľa aktívnej látky

- Pevnolátkové**
  - Rubín
  - Safir
  - Nd:YAG laser
  - Polovodič (GaAs, AlGaInP, GaN)**
- Plynové**
  - N, CO<sub>2</sub>
  - He, Ne, Xenón
  - Excimerové (ArF, KrCl, KrF)
- Kvapalinové (farbivové)**
  - organické farbivá
  - anorganickými farbivá

Režim činnosti

- Pulzné (pulsed mode)**
- Spojité (continuous)**



# Zdroje svetla: LASER



Záleží nielen na výkone, ale aj dobe expozície a vlnovej dĺžke

kategória I ( $P_{max} < 0,4 \mu W$ )

relatívne neškodné aj pri priamom pohľade  
CD prehrávače a čítačky čiarového kódu

kategória II ( $P_{max} < 1 mW$ )

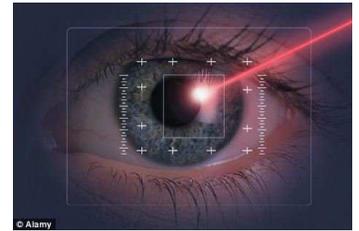
nemali by spôsobiť poškodenia oka (zatvorí sa za 0,25 s)  
laserové ukazovátka

kategória III ( $P_{max} (cont) < 5 mW, P_{max} (imp) < 0,5W$ )

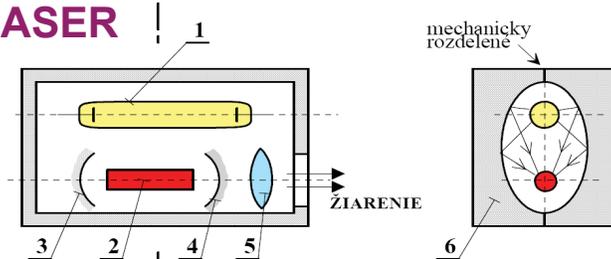
difúzny odraz žiarenia nespôsobuje poškodenie zdravia.  
DVD-R napalovačky

kategória IV

zneprístupnený kľetkou – aj difúzny odraz spôsobuje vážne poranenia vrátane popálenín  
chirurgický laser (30-100 W), vyrezávacie (100-3000 W)  
~50 W ťažké popáleniny, od 200 W prerezá človeka napoly,  
od 10 kW vyššie ostanú z človeka len dymiace topánky



# Zdroje svetla: LASER



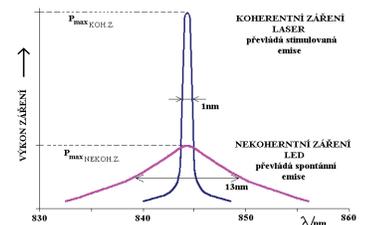
- výbojka (zdroj svetelnej energie)
- aktívna (svetlo emitujúca) látka
- odrazné, nepriepustné zrkadlo
- polopriepustné zrkadlo
- šošovka (kolimačná)
- delené eliptické zrkadlo

Nevýkonové využitie laserov:

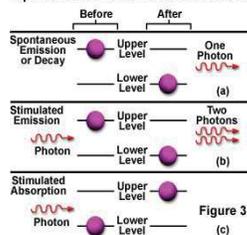
- prenos informácií (optovlákná)
- holografia
- meranie vzdialeností (geometrické, interferenčné)

*Poznámka: Koherentnosť charakterizuje tzv. "koherenčná dĺžka". Na tejto vzdialenosti (rádovo 1 m), je s určitou presnosťou fáza zaručená.*

# Zdroje svetla: polovodičový laser



## Spontaneous and Stimulated Processes



## Stimulated Emission in a Mirrored Laser Cavity

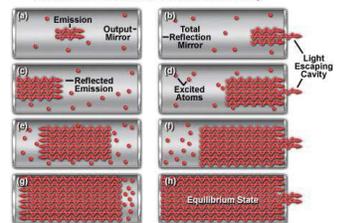
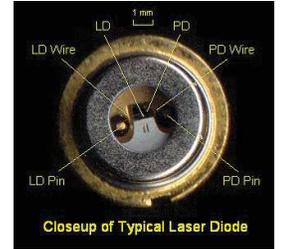
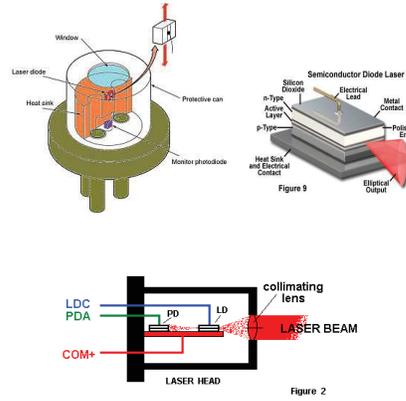
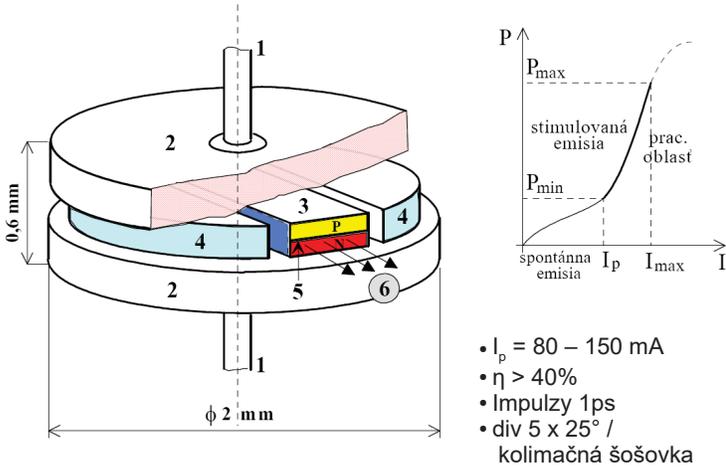
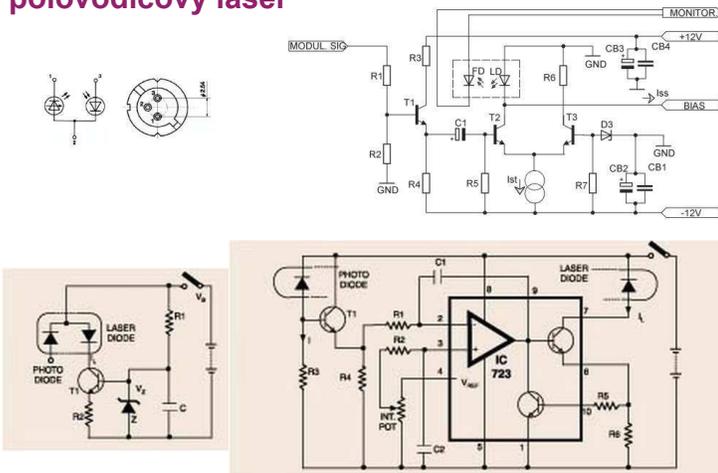


Figure 6

## Zdroje svetla: polovodičový laser



## Zdroje svetla: polovodičový laser



## Optické systémy

Zdroje svetla  
Optická cesta  
Snímače

## Optické prvky: zrkadlá, filtre...

### 3.4.4. Zrkadlá

- \* rovinné
- \* duté - majú ohnisko
- \* vypuklé - zdanlivý obraz
- \* polopriepustné - problémy s polarizovaným svetlom

### 3.4.5. Filtre - selekcia vlnových dĺžok

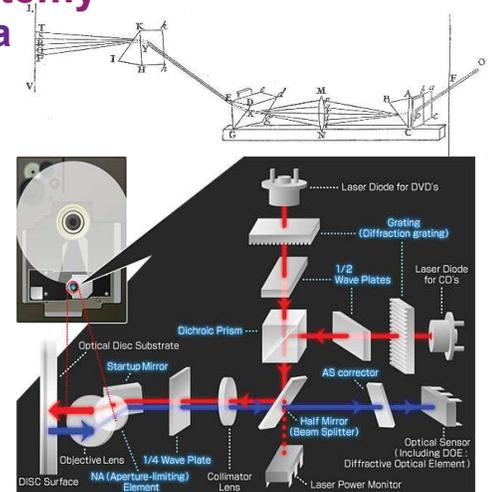
- \* polarizačné filtre - lineárna, kruhová polarizácia
- Pozn: Filtre sa musia aplikovať v rovnobežnom zväzku lúčov, inak pôsobia ako opt. klin - posúvajú priesečník lúčov.

### 3.4.6. Ostatné prvky

- \* hranoly (trojboký, pentagonálny),
- \* clony, štrbiny, tieniace krídelká,
- \* optické mriežky, šedý klin

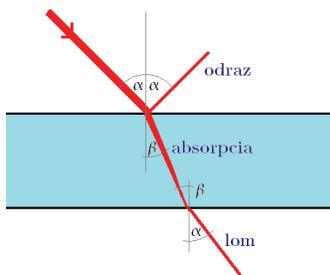
## Optické systémy Optická cesta

- Zrkadlá
- Clony
- Filtre
- Hranoly
- Šošovky
- Mriežky
- 



# Interakcia žiarenia s hmotou

- Odraz
- Lom
- Absorpcia
- Rozptyl
- Emisia žiarenia



**antireflexné pokrytie** – v určitom rozsahu vlnových dĺžok svetlo prechádza šošovkou prakticky bez strát

# Snellov zákon lomu

Snell's law / law of refraction

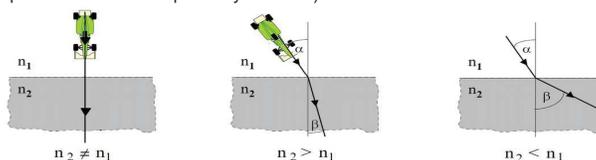
$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- $\alpha$  – je uhol dopadu
- $\beta$  – je uhol lomu
- $v_{1,2}$  rýchlosť vlnenia v prostredí 1,2
- $n_{1,2}$  index lomu v prostredí 1,2



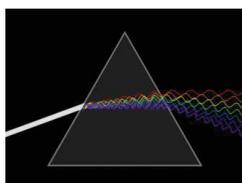
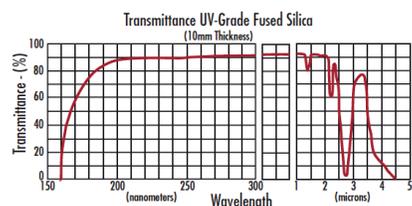
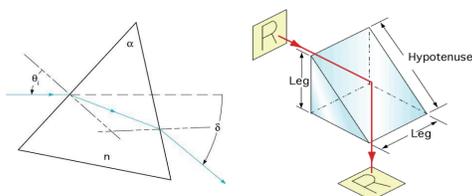
Metamateriály

Lúč sa vo vnútri šošovky láme podľa Snellovho zákona. Okrem toho sa malá časť svetla odráža (antireflexné pokrytie – v určitom rozsahu vlnových dĺžok svetlo prechádza šošovkou prakticky bez strát).



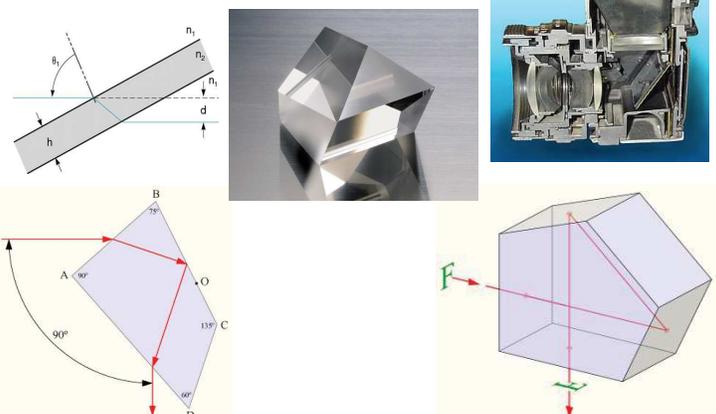
# Optické prvky: hranol

Prism, Prisma, Призма, hranol



# Optické prvky: hranol

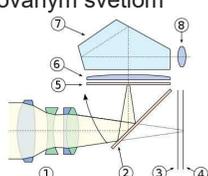
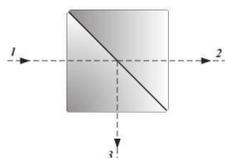
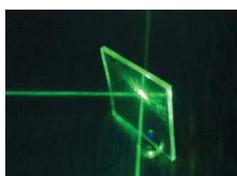
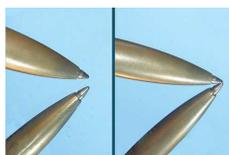
Prism, Prisma, Призма, hranol



# Optické prvky: zrkadlá

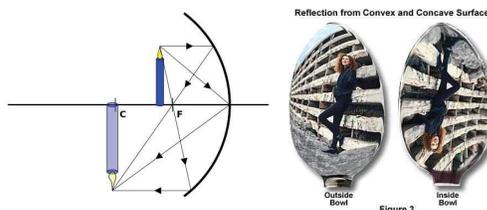
Mirror, Spiegel, зеркало, zrcadlo

- rovinné  
povrchovo  
pokovené
- polopriepustné  
half mirror, beam splitter,  
Strahlteiler  
problémy s polarizovaným svetlom



# Optické prvky: zrkadlá

- duté (concave)  
majú ohnisko
- vypuklé (convex)  
zdanlivý obraz

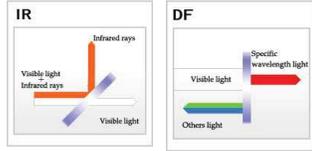
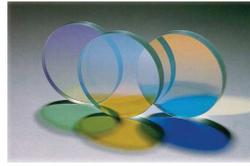


Reflection from Convex and Concave Surfaces

Figure 3

# Optické prvky: filter

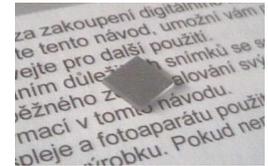
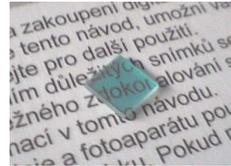
Filter, Светофильтр



# Optické prvky: filter



Skličko z ovladače sa jeví ľudskému oku ako černé. Stejně ho vyfotili i neupravený foťák (vľavo). Webkamera s odstraněným IR filtrem ho však vidí ako čiré (vpravo). Ač to tak vôbec nevypadá, na oboch foťákoch je stejné skličko!



V prípade IR filtru je situace opačná: Vľavo tak, jak ho vidí ľudské oko. Vpravo vyfoceny přes skličko z ovladače - focena byla tedy jen infračervená složka. Filtr se zde jeví jako zcela neprůhledný.

# Optické prvky: šošovky

Lens, Linse, Линза, čočka

Základné typy šošoviek

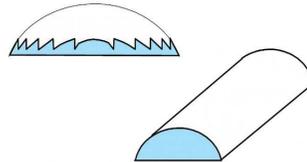
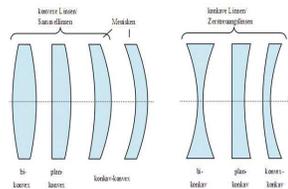
- spojky (spojné šošovky, konvexné šošovky)
- rozptylky (rozptylné šošovky, konkávne šošovky)

Reálny obraz - dá sa zachytiť na priemetni, napr. papier, prevrátený

Zdanlivý obraz - nedá sa zachytiť na priemetni, neprevrátený a zväčšený

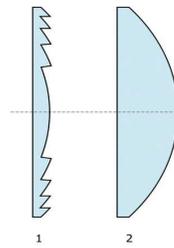
Tvary šošoviek

- spojné (dvojvypuklá, ploskovypuklá, dutovypuklá)
- rozptylné (dvojdutá, ploskodutá, vypuklodutá)
- Fresnelova šošovka
- valcová šošovka



# Fresnelova šošovka

Fresnel lens



# Optické prvky: šošovky

lens

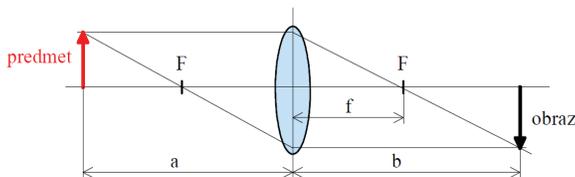
Ostrý obraz - platí zobrazovacia rovnica :

(6 - 1) zväčšenie (6 - 2))

Zaostrovanie

**a** i **f** sú dané, zaostrenie **zmenou b**

Pre predmet v ∞ je **b = f**, pre všetky ostatné **a** je **b väčšie**



# Zobrazovacia rovnica

lens equation

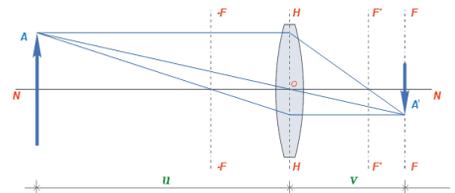
$$Z = \frac{A'}{A} = \frac{-v}{u} = \frac{v-f}{f} = \frac{-f}{u-f}$$

Zobrazovacia rovnica:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

Ohnisková vzdialenosť:

$$f = \frac{v \cdot u}{v + u}$$



Z – priečne zväčšenie šošovky

A – výška predmetu v (m)

A' – výška obrazu v (m)

u – vzdialenosť predmetu od stredu šošovky v (m)

v – vzdialenosť obrazu od stredu šošovky v (m)

f – ohnisková vzdialenosť šošovky v (m)

Prevrátená hodnota ohniskovej vzdialenosti je optická mohunosť (φ)

# Zobrazovacia rovnica

## Znamienková konvencia

predmetová vzdialenosť  $u$   
 kladná ( $u > 0$ ) pred šošovkou  
 záporná ( $u < 0$ ) za šošovkou

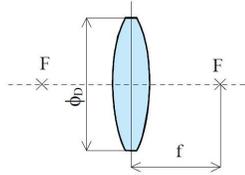
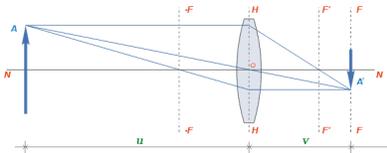
obrazová vzdialenosť  $v$   
 kladná ( $v > 0$ ) za šošovkou → obraz je skutočný  
 záporná ( $v < 0$ ) pred šošovkou → obraz je neskutočný

ohnisková vzdialenosť  
 spojky  $+f$   
 rozptylky  $-f$

optická mohutnosť  $M = \frac{1}{f} \quad [D; m]$

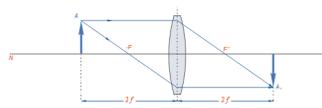
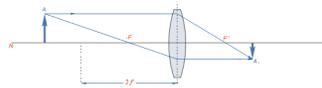
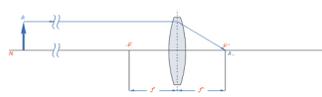
jednotka je *dioptria* D + D spojná  
- D rozptylná

priemer šošovky  $\Phi_D$ , (svetelnosť)



# Optické prvky: šošovky

## zobrazovanie



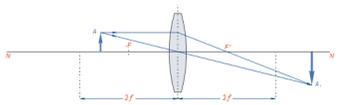
Predmet je nekonečne vzdialený a jeho obraz je nekonečne malý

Predmet je vzdialený viac ako 2x ohnisková vzdialenosť šošovky ( $u > 2f$ ). Obraz je:  
 - skutočný  $v > 0$   
 - zmenšený  $|z| < 1$   
 - prevrátený  $z < 0$

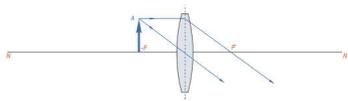
Predmet je vzdialený presne 2x ohnisková vzdialenosť šošovky ( $u = 2f$ ). Obraz je:  
 - skutočný  $v > 0$   
 - rovnaký  $|z| = 1$   
 - prevrátený  $z < 0$

# Optické prvky: šošovky

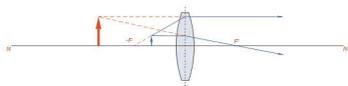
## zobrazovanie



Predmet je vzdialený menej ako 2x a viac ako 1x, ohnisková vzdialenosť šošovky:  $2f > u > f$  Obraz je:  
 - skutočný  $v > 0$   
 - zväčšený  $|z| > 1$   
 - prevrátený  $z < 0$



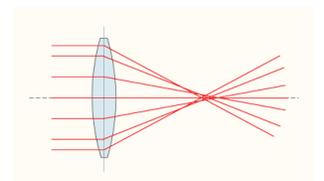
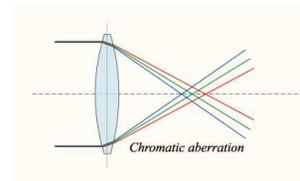
Predmet je rovnako vzdialený ako ohnisková vzdialenosť šošovky:  $u = f$   
 Obraz sa vytvorí v nekonečne



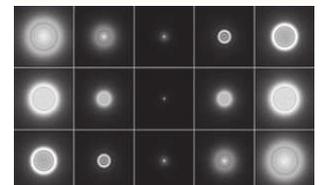
Predmet je vzdialený menej ako ohnisková vzdialenosť šošovky:  $u < f$ . Obraz je:  
 - neskutočný  $v < 0$   
 - zväčšený  $|z| > 1$   
 - priamy  $z > 0$

# Optické prvky: šošovky

## optické vady



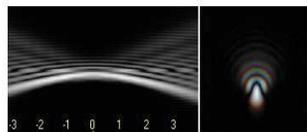
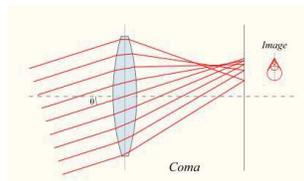
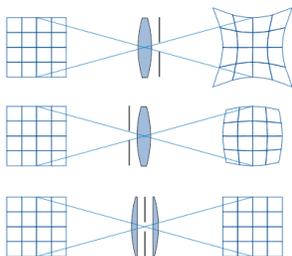
chromatická aberácia  
farebná chyba



sférická aberácia  
guľová chyba

# Optické prvky: šošovky

## optické vady



skreslenie

koma

# Optické prvky: šošovky

## parametre

Relatívny otvor, pri objektívoch svetelnosť  $s$

$$s = \frac{f \text{ [mm]}}{\Phi_D \text{ [mm]}} \quad s \geq 1$$

Každý ďalší člen prepúšťa 1/2, alebo 2x svetla oproti susednému normalizovaný rad 1 – 1,4 – 2 – 2,8 – 4 – 5,6 – 8 – 11 – 16 – 22 –

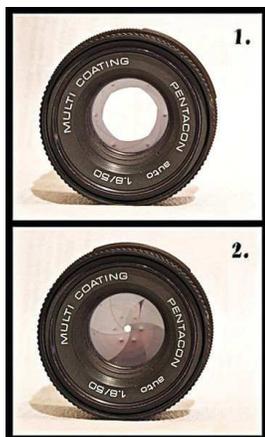
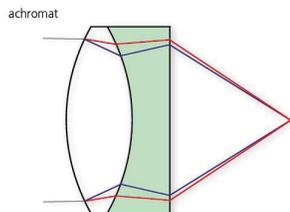
Najznámejšie sústavy sú:

- kondenzor** – 2 až 3 šošovky (jednoduchšie len 1)
- objektív** – 3 ÷ 20 šošoviek, zobrazovanie

## Optické prvky: objektiv

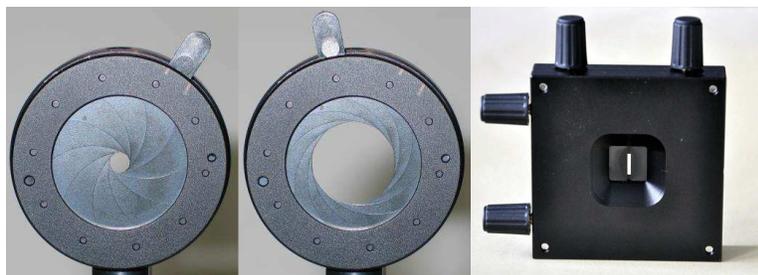
objektív – 3 ÷ 20 šošoviek

tmelené členy - achromat



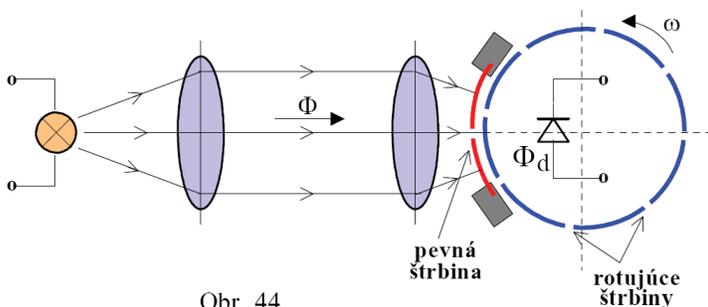
## Optické prvky: clony

Aperture, Blende, Апертура



Zmena hĺbky ostrosti, ale aj spektrofotometer – zúženie spektra za hranolom

## optická štrbina – príklad snímač otáčok

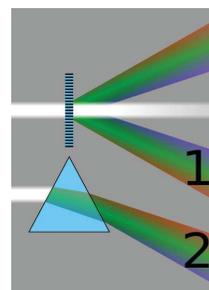


## Optické prvky: optická mriežka

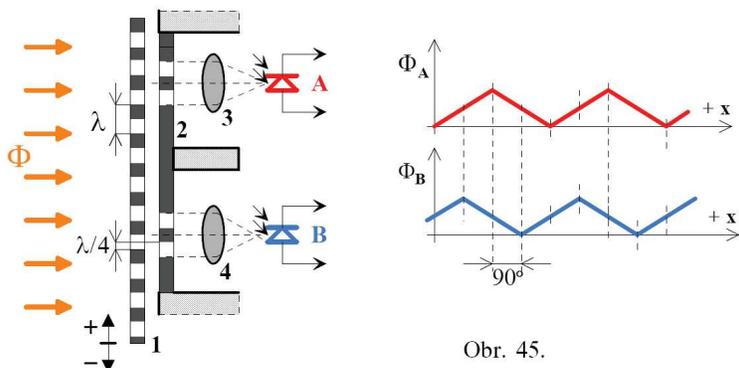
diffraction grating, gitter Дифракционная решётка

• rozlišovacia schopnosť mriežky  
počet vrypov, (600 – 2400 na 1 mm)

• mriežková konštanta  
vzdialenosť medzi dvoma vrypmi



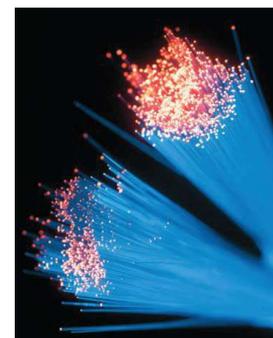
## optická mriežka – príklad snímač polohy



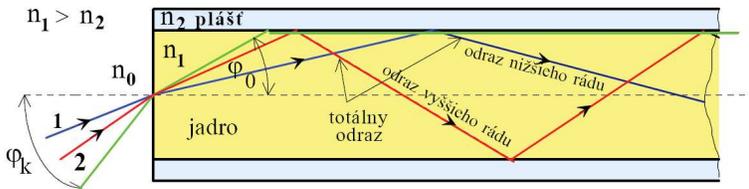
## Vláknová optika

fiber optics

- prenos obrazu zväzkom elementárnych svetlovodov
- prenos analógových signálov (náročné)
- prenos digitálnych signálov
- optovláknové senzory



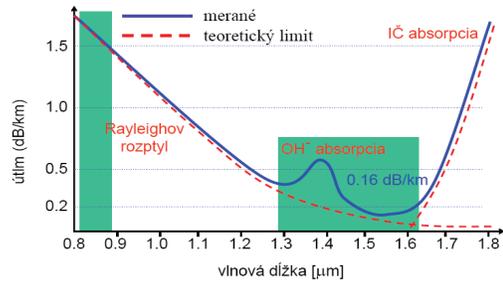
# Elementárny svetlovod



absolútny odtaz od rozhrania dvoch prostredí

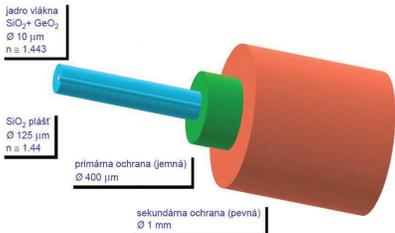
- MM – multimódové / mnohovidové
- SM – jednovidové / monomódové
- Materiál: SiO<sub>2</sub> (sklo), plastové

# Vláknová optika – útlm



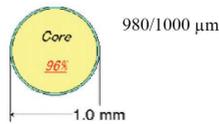
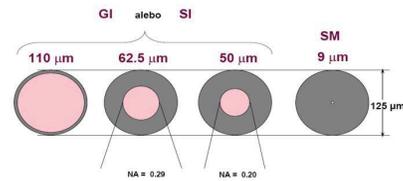
- $\lambda = 1 \mu\text{m}$  (min. straty pre  $1,2 \mu\text{m}$  – perspektívne  $1,5 \mu\text{m}$ )
- $\alpha = 0,3 \text{ dB / km}$
- IČ absorpcia, Rayleighov rozptyl, OH absorpcia  
(optické vlákna sú citlivé na vlhkosť, potreba zabaliť do ochranného obalu)

# Konštrukcia optovlákien



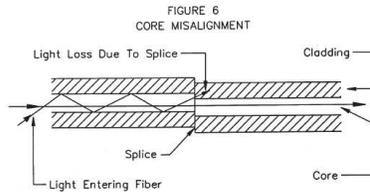
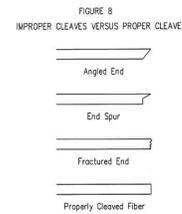
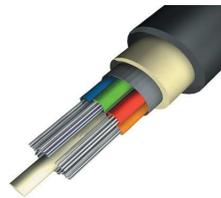
konštrukcia Single-Mode (SM) vlákna

konštrukcia plastového MM vlákna



Štandardné prierezy komunikačných optických vlákien

# Konštrukcia optovlákien



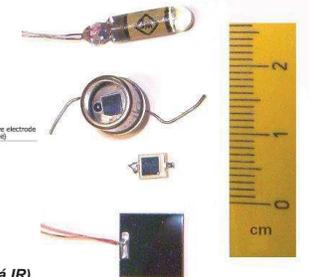
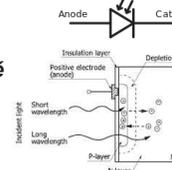
# Optické systémy

Zdroje svetla  
Optická cesta  
Snímače

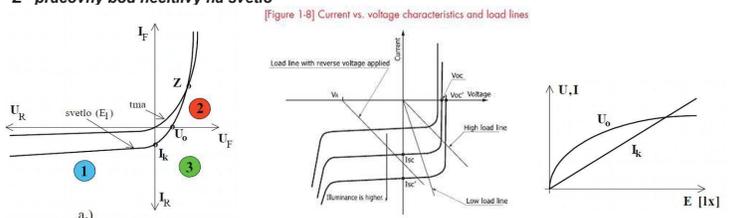
# Detektory: fotodióda

photodiode

rýchle, málo citlivé



- 2 - odporový režim v priepustnom smere (rastie E → klesá IR)
- 3 - hradlový režim (U<sub>0</sub> je výst. napätie naprázdno, I<sub>k</sub> je výst. prúd nakrátko)
- Z - pracovný bod necitlivý na svetlo



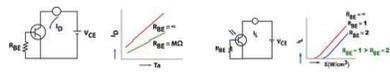
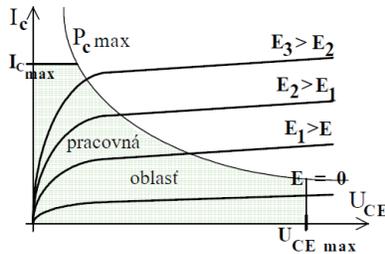
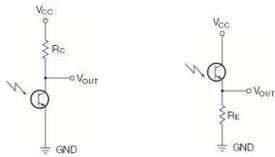
# Detektory: fototranzistor

## phototransistor

- citlivejšie, ale i zotrvačnejšie ako fotodióny.
- v obvodoch samostatne, alebo s diódami, prípadne Darlington.

Hodnotu  $P_{Cmax}$  treba dodržať, kritická pri "polootvorenom" tranzistore.

Spektrálne skôr v IR oblasti (800 ÷ 1000 nm).



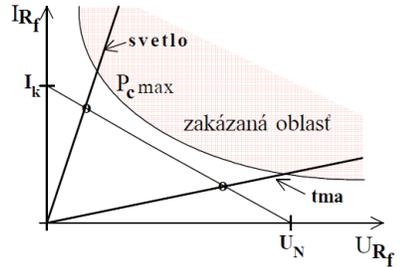
# Detektory: fotodpor, fotorezistor

## photoresistor

najcitlivejšie, ale aj najzotrvačnejšie spektrálne skôr do viditeľnej oblasti (500 ÷ 600 nm).

$U_{Rf}$  a  $I_{Rf}$  sú napätie a prúd fotodporu priamka – obvod, v sérii je R s fotodporom, napájanie sústavy  $U_N$ ,  $I_k = U_N/R$

časovo a teplotne závislé. odpor sa mení v rozsahu cca 100 ÷ 10 M (úplná tma)



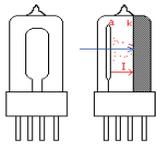
V - A charakteristika

# Detektory: fotónka, fotonásobič

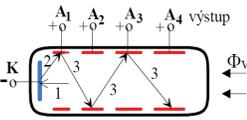
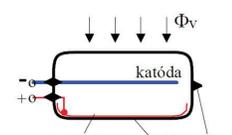
## photocell, photomultiplier tube (PMT)

vákuová súčiastka

svetlo po dopade na katódu vyrazí niekoľko elektrónov (červené body), tie sú priťahované anódou, elektrónko tečie prúd



- 1 foton
- 2 elektrón
- 3 sekundárny elektrón



# Detektory: integrované

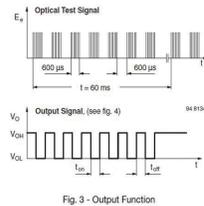
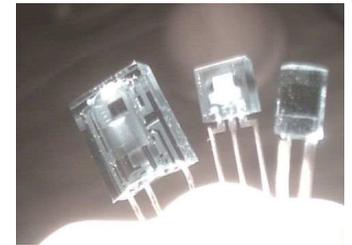
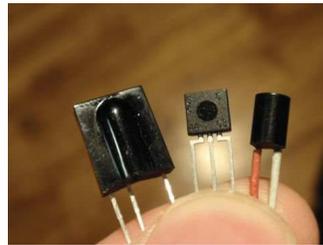


Fig. 3 - Output Function

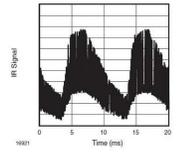
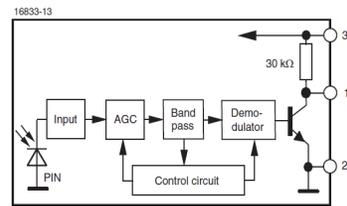
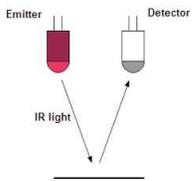


Fig. 14 - IR Disturbance from Fluorescent Lamp

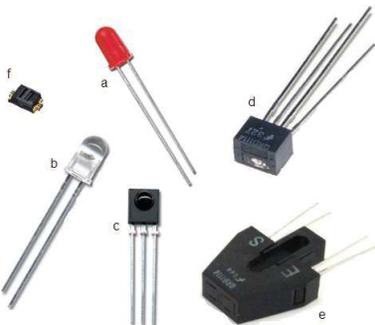
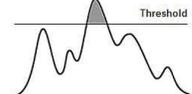


Black = no reflection (0)  
= reflection (1)

Output  
DIGITAL 0 and 1  
ANALOGUE 0-100%

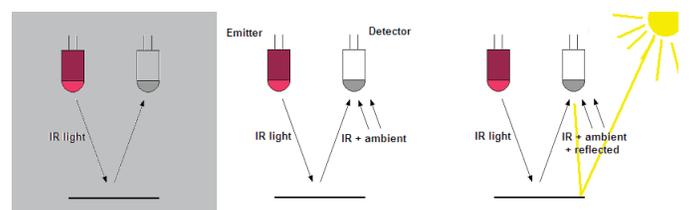
Sources of failures

- Ambient light
- Shadows
- Sun, lamps
- Sources of IR
- Dust, dirt
- Distance!
- Speed



Sensors and detectors:  
a) red LED b) Infra red LED c) Infra detector  
d) combination emitter + sensor e) larger version  
f) miniature SMD version of E+S

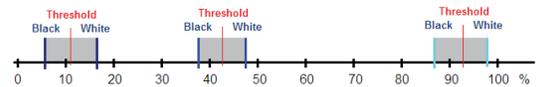
## Optical line sensor principle



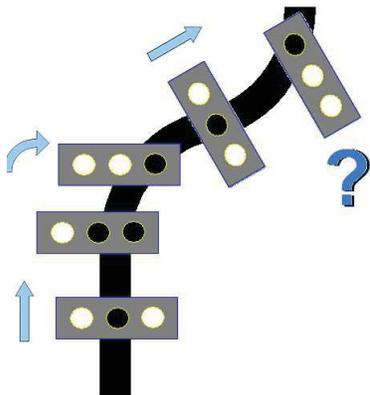
Sensor output

Sensor detector measures not only the reflected IR light, but also the amount of the ambient light

- Shields!
- Calibrate!



## Sensor calibration



### Three sensors

Sensor	Action
010 (line)	go.forward
011 (right)	turn.right
001 (right)	sharp.right
100 (left)	sharp.left
110 (left)	turn.left
111	???
000	???
101	???

### Algorithms

67

67

### More sensors?



Adds more reliability  
Different width of line



### Proportional control

controller output is **proportional** to the error, which is the difference between the desired and actual positions.



Different shapes enable to determine sharp turns in advance.



### Algorithms

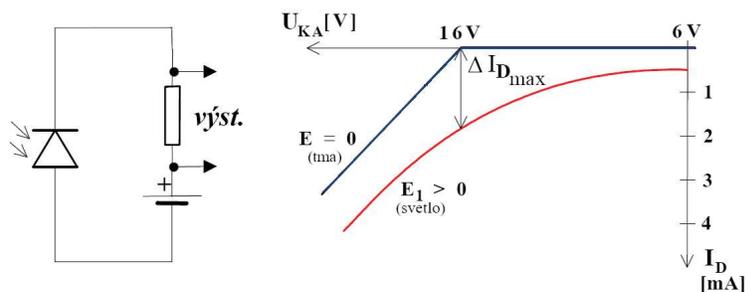
68

68

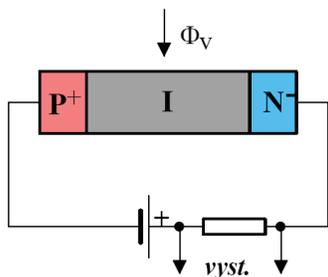
## Špeciálne optické snímače

- Lavínová fotodióda
- PIN fotodióda
- PSD prvky
- CCD prvky
- CMOS prvky
- 

## lavínová fotodióda avalanche photodiode

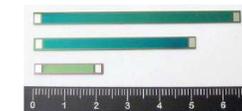
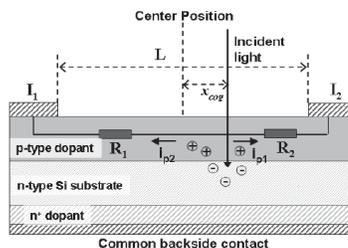


## PIN fotodióda avalanche photodiode



- I – intrinzičná časť
- – prijíma fotóny, izolácia
- vysoké U → rýchlosť 10<sup>-12</sup> – 10<sup>-15</sup> s

## PSD prvky position sensitive device

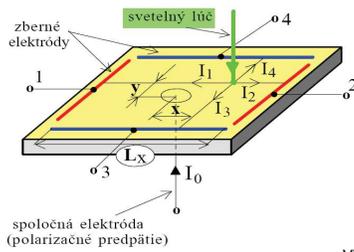


$$x = \frac{L}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$$

- informácia o POLOHE, nie o intenzite
- celkový prúd (cez spoločnú el.) I<sub>0</sub> = 1μA!
- rozlíšenie 12μm, chyba ±0,9%
- obvykle laser, modulovaný – lepšie SNR

# PSD prvky

position sensitive device

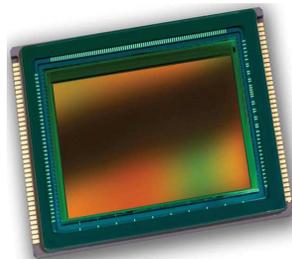
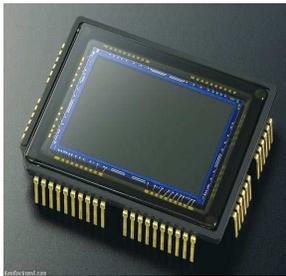


vyhodnotenie 4 prúdov voči zbernej elektróde  
x a y sú vzdialenosti od stredu

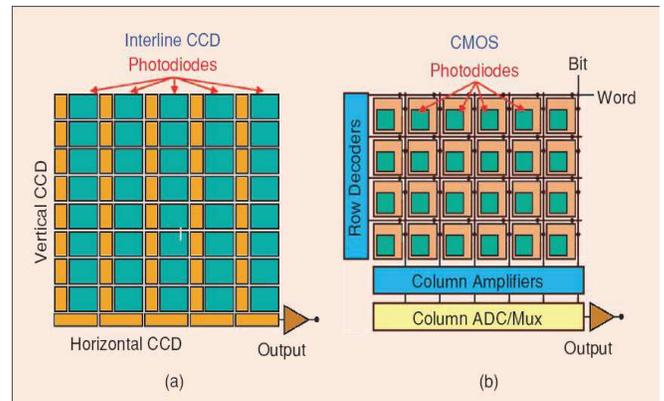
$$x = \frac{L_x}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad y = \frac{L_x}{2} \frac{I_4 - I_3}{I_4 + I_3}$$

## 6. Optické snímače

CCD a CMOS

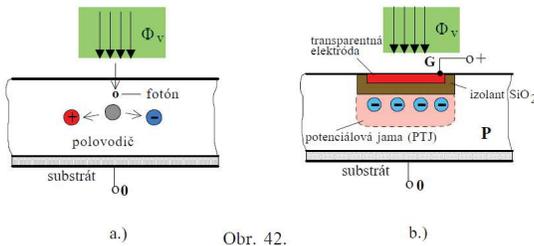


## 6. Optické snímače



### 6.1. CCD prvky

charge coupled device

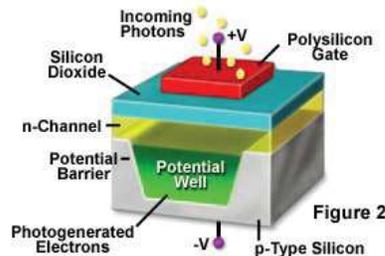


- Uchovávame tzv. menšinové náboje, teda v P polovodiči elektróny. Tieto môžu vzniknúť :
- tepelnou generáciou - parazitný jav (šum)
  - injekciou svetlom - vlastný snímací efekt
  - injekciou z blízkeho PN prechodu - odovzdanie výstupného signálu

### 6.1. CCD prvky

základná CCD bunka

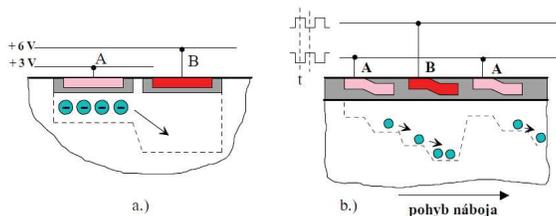
Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor



Charge-Coupled Device

- Invented at Bell Labs in 1970
- 2009 Nobel Prize in Physics
- Widely used in TV, medical, astronomy cameras
- Array of light sensitive MOS capacitors (pixels)
- Incoming light generates electrons which are captured in a potential well
- Electrodes, or gates, move the charge

## 6.1. CCD prvky prenos náboja



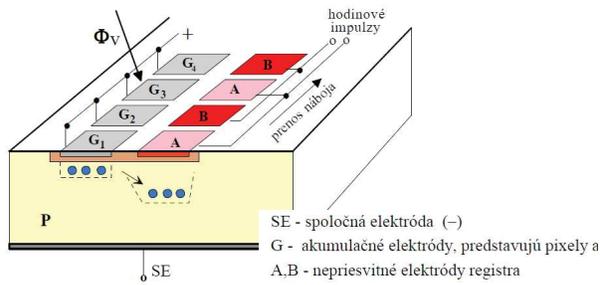
Obr. 43.

Vyšší potenciál vytvorí hlbšiu PTJ, nosiče do nej prepadávajú.  
Tvarované elektródy - tvarovaná PTJ  
Elektródy A a B - výstupný register

## 6.1. CCD prvky riadkový CCD senzor

### Riadkový CCD senzor

1. Svetelný tok  $\Phi_v \rightarrow$  náboj pod  $G_1, G_2, \text{atd.}$
2. Po dobe expozície presun náboja pod A,B
3. Fázo posunuté impulzy na A,B - vysúvanie nábojov



## 6.1. CCD prvky riadkový CCD senzor

### Princíp elektronickej uzávierky

Doba snímania (pre 1728 pixelov)  $\rightarrow$  hodinové impulzy :

10 kHz  $\rightarrow$  doba snímania = 86 ms (1/12 [s])

10 MHz  $\rightarrow$  doba snímania = 86  $\mu$ s (1/12000 [s])

Optimálne cca 10 ms (1/100 [s]), čomu zodpovedá 86 kHz.

Výhody: netreba mechanickú uzávierku - cena

Nevýhody: pomalé vysúvanie - akumulujú svetlo aj počas vysúvania (náchylnejšie na smearing, blooming)  
rýchle vysúvanie - nekvalitné (rýchle) odčítanie náboja

*T/2 spôsobí posun o jedno miesto, resp. T vysunie polovicu pixelov (párne - nepárne)*

$E = 10 \text{ lx}$  dáva 0,2 V na výstupe.

Citlivosť na svetlo: ASA (DIN) a je 100  $\div$  3200 ASA (21  $\div$  36 DIN).

*Poznámka: Horná hranica je už 6000 - 12000 ASA, diskutabilná je kvalita (malé snímače)*

Rozlíšenie úrovni šedej 8 - 32 bitov  $\rightarrow$  256 - 4,295.  $10^9$  úrovni. (štand. 24 bit)

## 6.1. CCD prvky

Množstvo nosičov závisí od intenzity osvetlenia E a od času t:

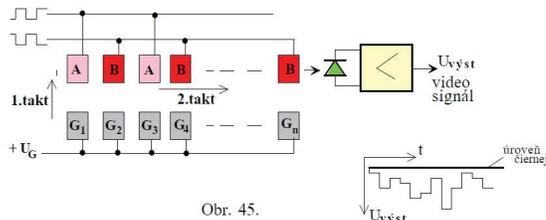
expozícia (osvit)  $e$  : ( $e$  býva označené tiež H)

$$e = E \cdot t \quad [\text{lx} \cdot \text{s}; \text{lx}; \text{s}]$$

(6 - 2)

*Poznámka: Doba existencie náboja v PTJ je asi 100 ms  $\div$  10 s. (vyrovnanie tepelnou generáciou). Dlhé časy - problém, už cca 5  $\div$  10 s vyžadujú chladenie prvkov, napr. polovodičové, resp. softvérové potlačenie. (následné zosnimanie bez obrazu a odčítanie)*

## 6.1. CCD prvky riadkový CCD senzor



Obr. 45.

Video signál:

- poloha bodu - čas od začiatku prenosu
- osvetlenie bodu - amplitúda.

Počet pixelov - 128 (termovízia), po 6 - 10 tis. (profil scannery...)  
Rozmery : od 6 x 6  $\mu$ m do 17 x 8  $\mu$ m.

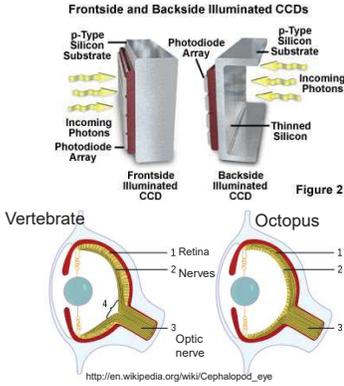
## 6.1. CCD prvky riadkový CCD senzor

Použitie riadkových CCD :

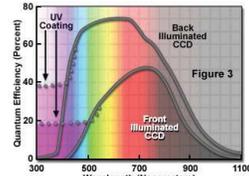
- nepolyblivé obrazy (scannery...) - snímanie po riadkoch
- snímanie polohy (ako PSD)
- iné, napr. zaostracie systémy - vyhodnotenie kontrastu (krížový senzor, hrany)

Ako zobrazovacie systémy potrebujú vysokokvalitnú optiku s vysokým rozlíšením pre malé ohniskové vzdialenosti (3 - 8 mm)

## 6.1. CCD prvky Front or Back Illuminated

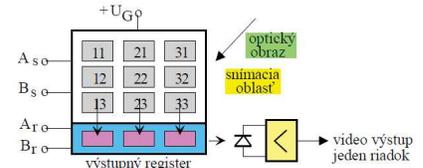


- Traditional, front-illuminated have wiring in front of photosensitive region
- This blocks some light, reducing QE
- Back-illuminated CCDs:
  - Back side of the CCD is etched to 10-15 microns
  - More fragile and costly, but higher QE



From <http://learn.hamamatsu.com/articles/quantumefficiency.html>  
Image from <http://www.microscopy.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html>

## 6.1. CCD prvky maticový CCD senzor: Full frame



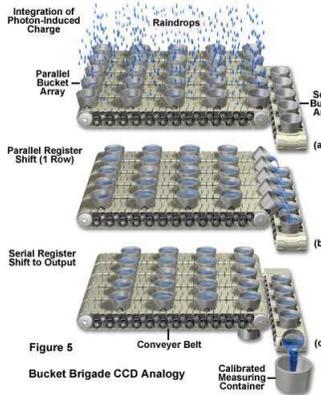
Obr. 46.

Činnosť:

- obraz sa premietne na snímaciu časť → pod elektródami náboj
- hodinové impulzy na  $A_s, A_r$  (1 fáza), a  $B_s, B_r$  (2 fáza) → jeden riadok do výstupného registra.
- hodinové impulzy na  $A_r, B_r$  → obsah registra po pixeloch do výstupu.

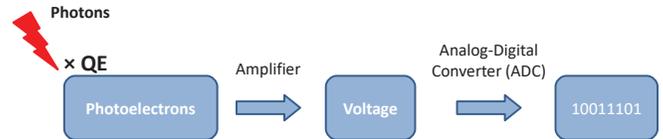
- častejšie pre väčší formát (24 x 36 mm) - pridaný "bočný register"
- pri vystúvaní by nemal reagovať na svetlo - zakrytie (mechanic. uzávierka)
- lacnejší

## Bucket brigade analogy for read out



- Rain accumulates in buckets
- Rows of buckets shifted to readout row
- Readout row shifted bucket-by-bucket to measuring device
- Unless rain stops, last bucket to be read out will have much more water than the first

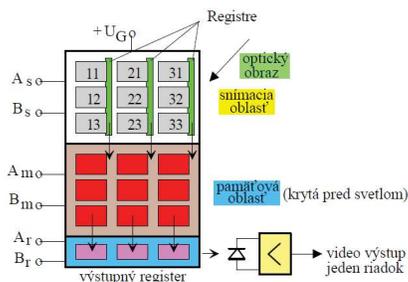
## 6.1. CCD prvky vyčítanie obsahu...



Bit Depth	Number of gray levels
8	28 = 256
10	210 = 1024
12	212 = 4096
14	214 = 16384
16	216 = 65536

## 6.1. CCD prvky maticový CCD senzor: frame transfer

- pridaná pamäť (rovňaká)
- pridaný zvislý register k sĺpcom v sn. časti (Al elektródy, krytý pred svetlom)
- úbytok plochy (citlivosť) - nad pixelom mikrošošovka (HAD)



Obr. 47.

## 6.1. CCD prvky snímanie farby

RGB systém

tri základné farby:

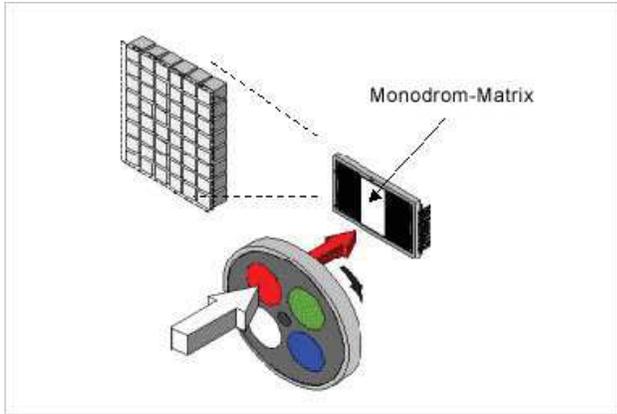
R (Red - červená), G (Green - zelená), B (Blue - modrá)

Poznámka: Jedna sa o aditívne miesanie farieb - svetiel.

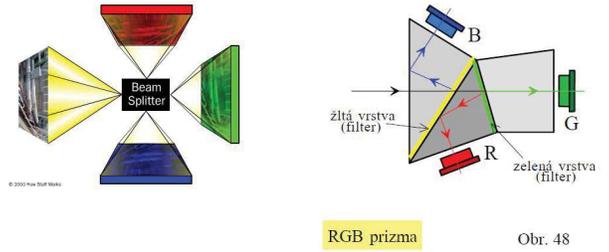
Možnosti:

- postupne tri expozície cez tri filtre
- tri identické obrazy - tri senzory
- jeden "trojitý" maticový senzor + tzv. mozaikový filter.
- systém FOVEON

## 6.1. CCD prvky snímanie farby – trojité snímanie

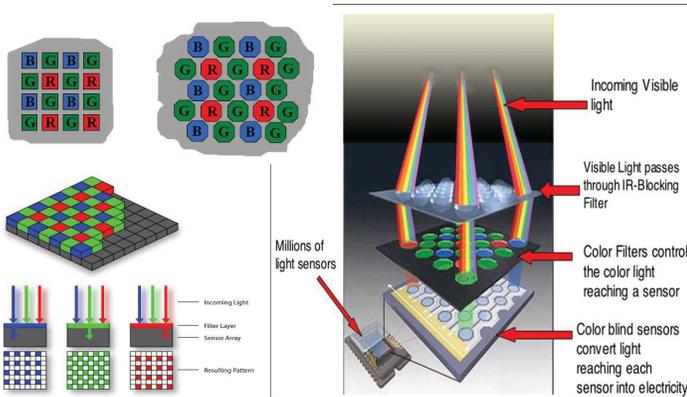


## 6.1. CCD prvky snímanie farby – tri CCD prvky



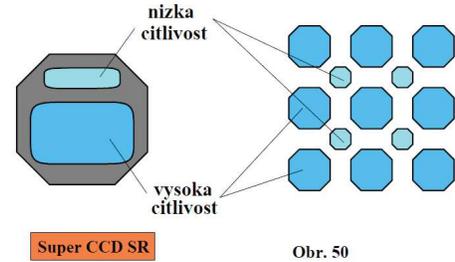
- kvalitné zobrazenie
- náročné na presné nastavenie

## 6.1. CCD prvky snímanie farby – mozaikový filter



## 6.1. CCD prvky snímanie farby – dynamický rozsah

Zväčšenie dynamického rozsahu.



## CMOS Detectors

### Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode

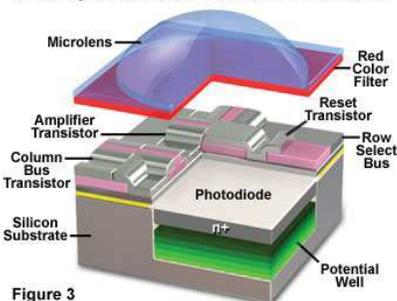


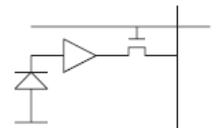
Figure 3

### Complementary Metal Oxide Semiconductor

- Transistors in each pixel convert charge to voltage
- More can be done within a pixel meaning **frame read out can be faster**
- Fabricated much like microprocessors and RAM so are **cheaper to make**
- Used in webcams, phone cameras since they use **less power**

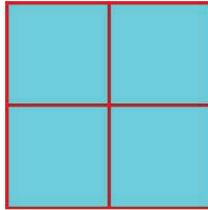
## Active Pixel Image Sensor

- 3-4 transistors per pixel.
- Fast, higher SNR, but
- Larger pixel, lower fill factor.
- Lower voltage and lower power.



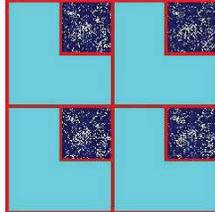
## What is a Pixel?

- ◊ The smallest discrete component of an image or picture on a CRT screen is known as a pixel.
- ◊ Each pixel is a sample of an original image, where more samples typically provide more-accurate representations of the original.



## What is Fill Factor?

- ◊ Fill factor refers to the percentage of a photo site that is sensitive to light.
- ◊ If circuits cover 25% of each photo site, the sensor is said to have a fill factor of 75%. The higher the fill factor, the more sensitive the sensor.



## CMOS Detectors

Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode

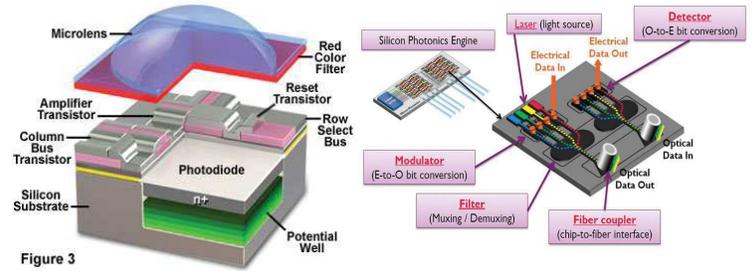
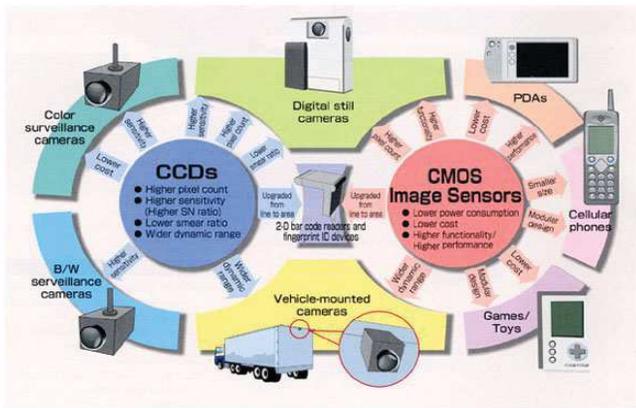


Figure 3

Image from <http://www.olympusmicro.com/primer/digitalimaging/cmsoimagesensors.html>

## 6.1. CCD vs. CMOS

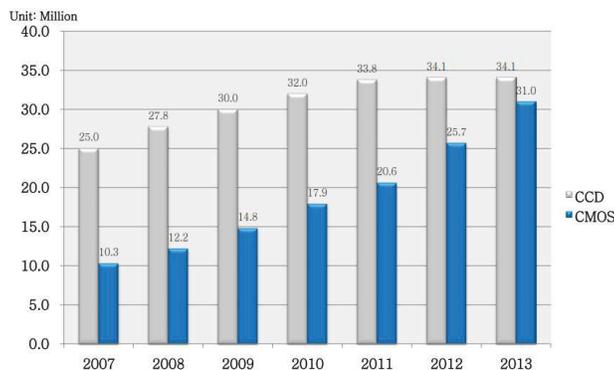


## 6.1. CCD vs. CMOS

- Create high-quality, low-noise images.
- Greater sensitivity and fidelity
- 100 times more power
- Require specialized assembly lines
- Older and more developed technology
- More susceptible to noise
- Light sensitivity is lower
- Consume little power
- Easy to Manufacture
- Cheaper

Picture quality, sensitivity and cost vs. Cost and battery life.

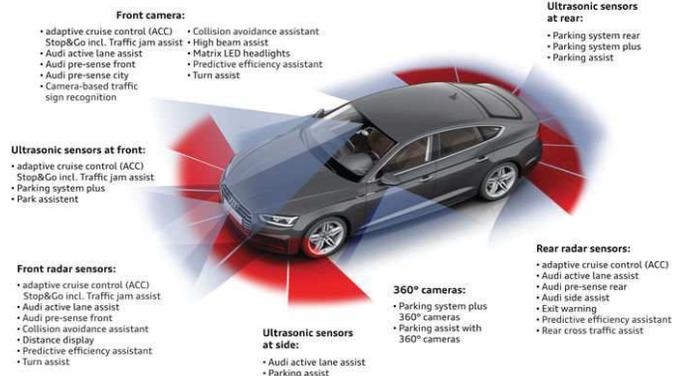
## 6.1. CCD vs. CMOS



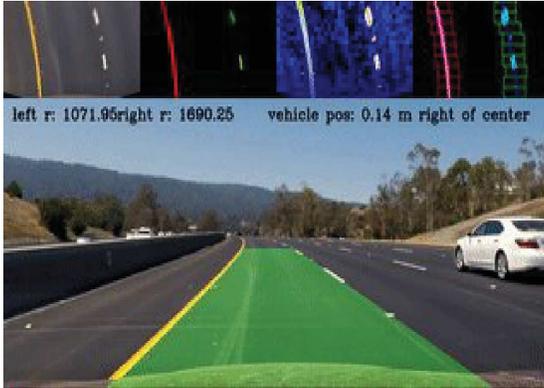
## 6.1. Kamery v automobiloch case study

### Audi A5 Sportback

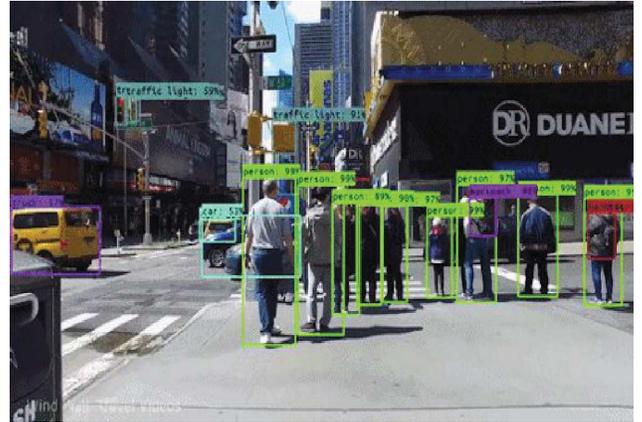
Driver assistance systems - overview of sensors  
09/16



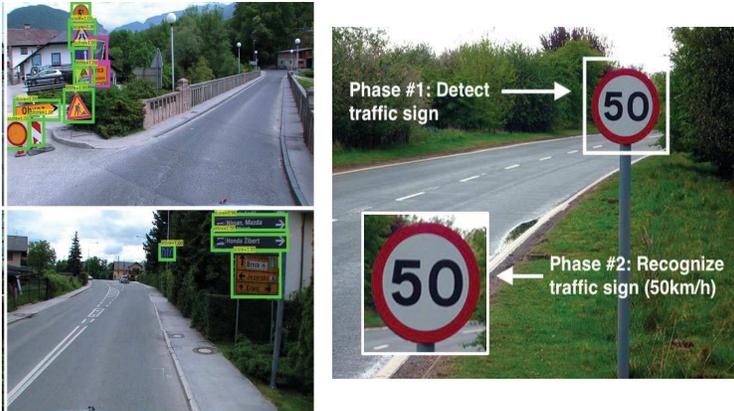
## 6.1. Kamery v automobiloch case study



## 6.1. Kamery v automobiloch case study



## 6.1. Kamery v automobiloch case study

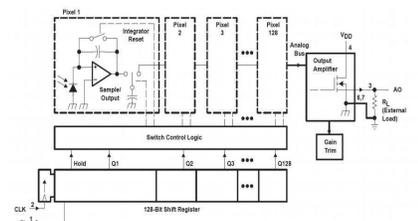
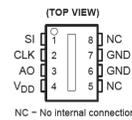


## 6.1. Kamery v automobiloch case study



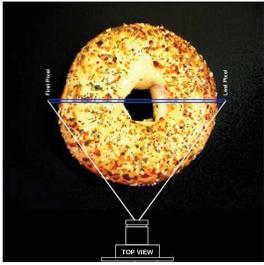
## Príklady

## Riadkový CCD snímač TAOS TSL 1401 CL

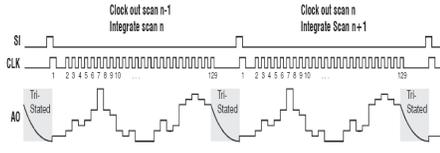


# Riadkový CCD snímač

TAOS TSL 1401 CL



- 1 x 128 pixels
- 0 - 5 V output for each pixel
- 1 pixel / 1 clock pulse



# Riadkový CCD snímač

TAOS TSL 1401 CL



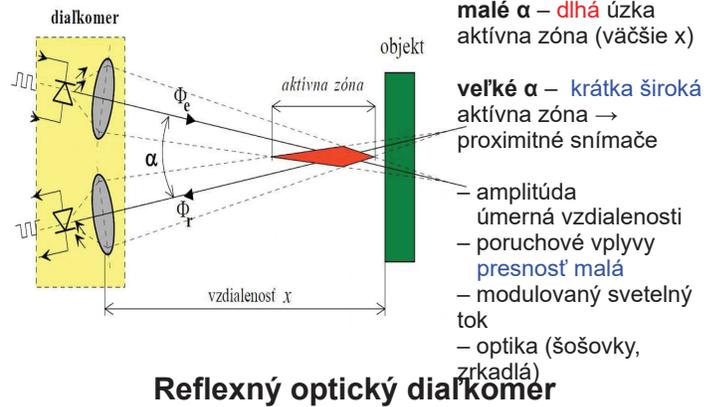
## Optical distance sensors

### 6.2. Optické princípy

### Optické diaľkomery

Optical

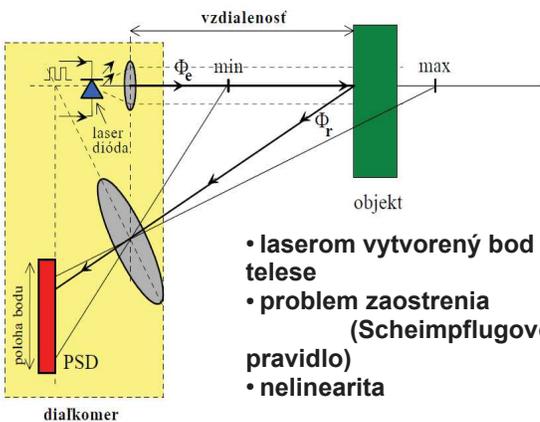
rangefinder



### Reflexný optický diaľkometer

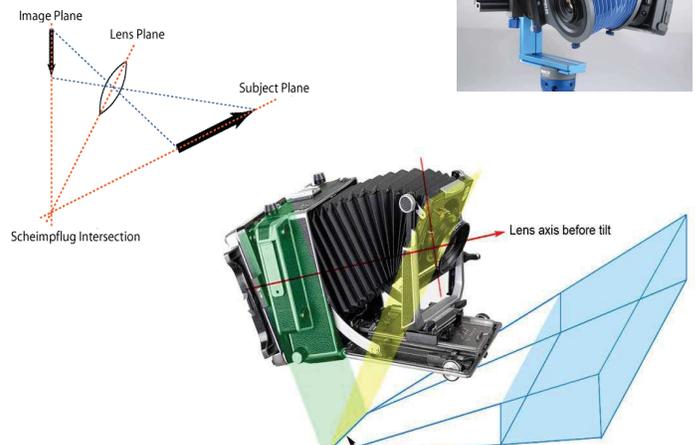
### 6.2. Optické princípy

### Triangulačný diaľkometer

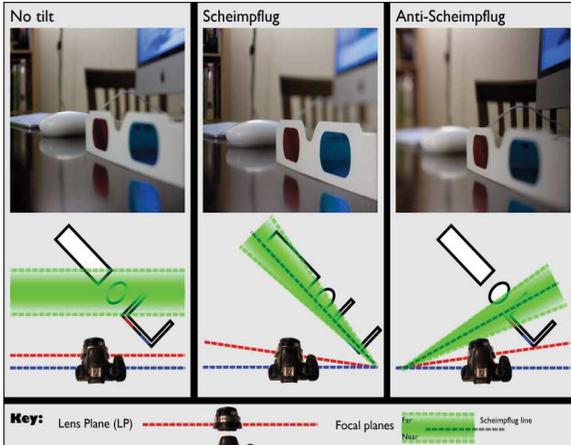


### 6.2. Optické princípy - Triangulačný diaľkometer

### Scheimpflugovo pravidlo



## 6.2. Optické princípy – Triangulačný diaľkometer Scheimpflugovo pravidlo



## 6.2. Optické princípy Triangulačný diaľkometer

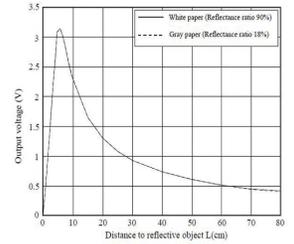


**SHARP**

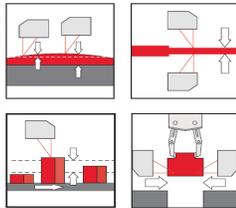
GP2Y0A21YK0F

**GP2Y0A21YK0F**

Distance Measuring Sensor Unit  
Measuring distance: 10 to 80 cm  
Analog output type



## 6.2. Optické princípy Triangulačný diaľkometer



CMOS CCD technology

- range 5 m (10, 50, 100, 200 mm)
- resolution 0.01 % FSO (1  $\mu$ m static, 3  $\mu$ m dynamic 1kHz)
- 1000 readings per second
- Output 4 ... 20 mA and RS232
- Fast adaption to varying surface properties
- Compact self-contained sensor (20mm)