



MISA 2021

Optické princípy

Senzory s optickým princípom

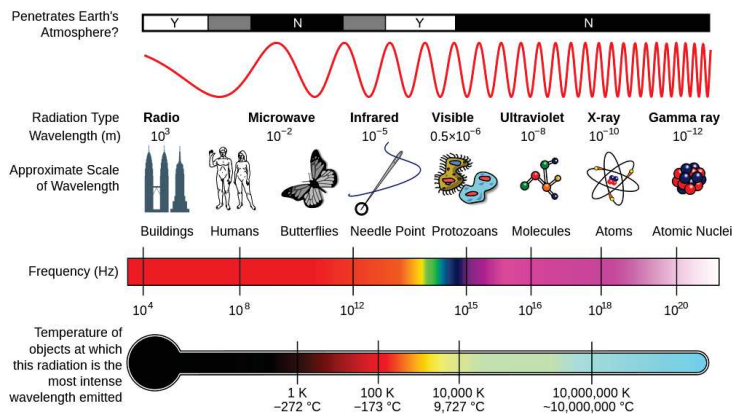
Využívajú svetelný tok v rôznej podobe na vytvorenie výstupného signálu.

- **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)

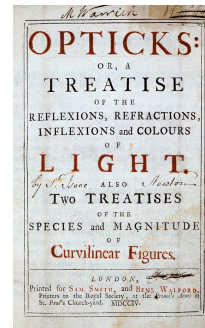
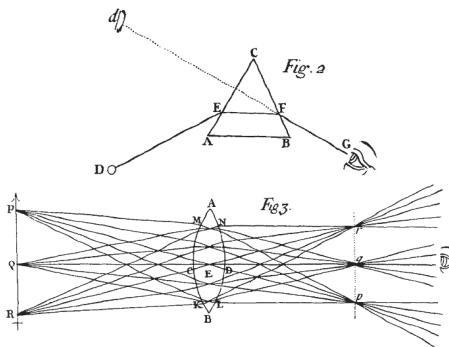
Podľa činnosti:

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

Spektrum



Opticks – Isaac Newton



Author: Isaac Newton

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

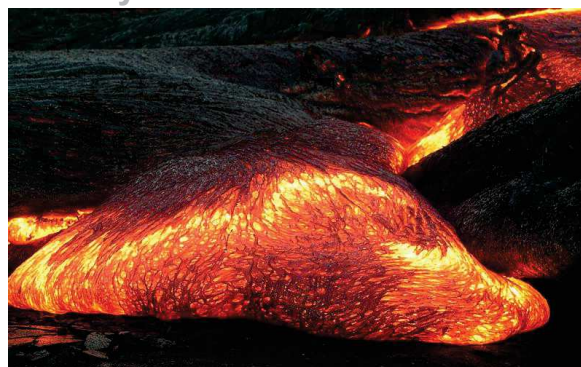
Svetlo light

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

Vlastnosti svetla môžeme opísať

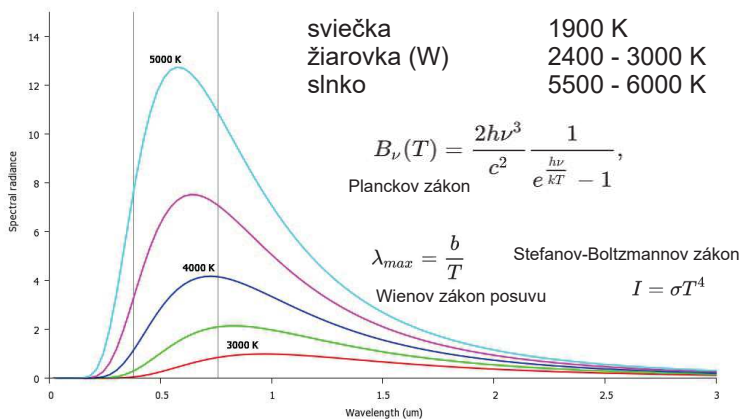
- **kvalitatívne** - spektrum, polarizácia, koherencia...
- **kvantitatívne** - fotometria

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)

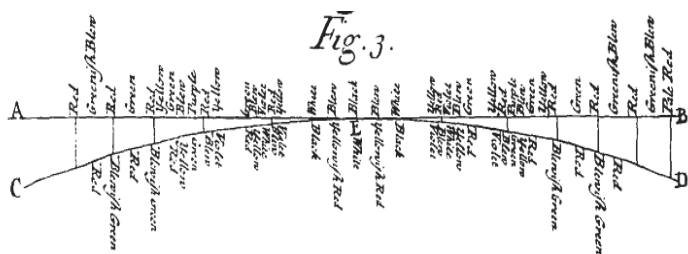
Fiktívna teplota zdroja svetla v [K] :

- 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

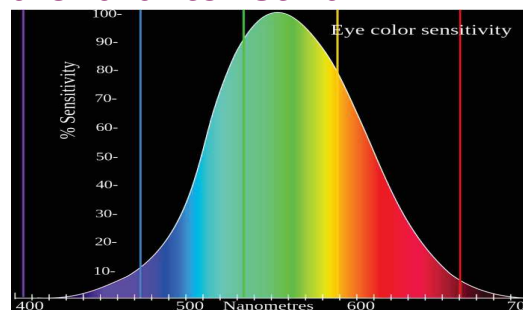


Poznámka: Paradoxne sa "teplými farbami" nazývajú tie, ktoré majú nízku farebnú teplotu.

Spektrálna charakteristika



Spektrálna charakteristika

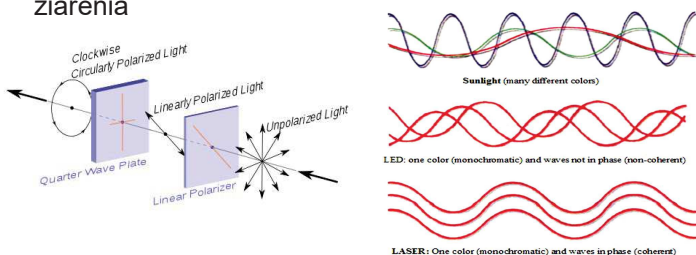


- IR - Infrared - časté využitie pre senzory (760nm)
- UV - Ultraviolet - výbojky, špeciálne oblasti (380nm)

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 monochromatickosť žiarenia



Základné fotometrické veličiny

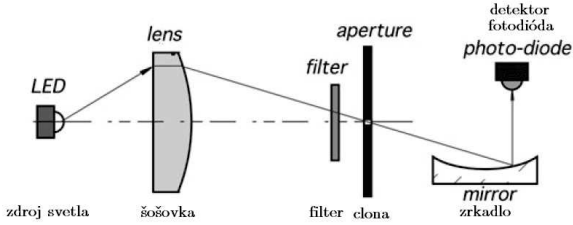
Veličina	Jednotka	Definícia	Vzťahy
žiarivý tok (výkon) Φ_e radiant power	Watt [W]	Množstvo energie prenesené cez plochu za jednotku času.	
svetelný tok Φ_v luminous flux	Lumen [lm] = cd.sr	Bodový zdroj svetlosti 1cd do uhla 1 steradián. Vzhľadom na oko.	$\Phi = I \cdot \Omega$
svietivosť I luminous intensity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

Pozn. "ANSI Lumen" merané na viac miestach → sriemerenie (projektory)

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), CH₃Br, CH₃J, J, Cl, F
- banka - kremičité sklo (vyšší podiel UV)
- vlákno W 3100 K (Tt 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, vyžadujú vysoké napätie - menič

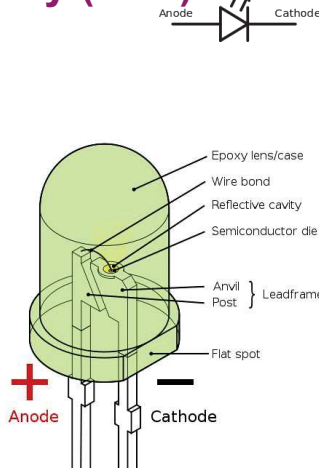


Zdroje svetla: Svetlo emitujúce diódy (LED)

- Electroluminescencia
- viditeľný P - N prechod
- V - A charakteristika ako dióda
- Uprah podľa typu 1,5 ÷ 3,5 V
- jas (svietivosť) je úmerný prúdu
- životnosť (svietivosť 50%):
10⁵ ÷ 10⁶ hod (t.j. 11 ÷ 114 rokov)
- spínacie časy < 100ns (10ns)
- svetlo je monochromatické
- η_i → 1, η_e → 1 -4%

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

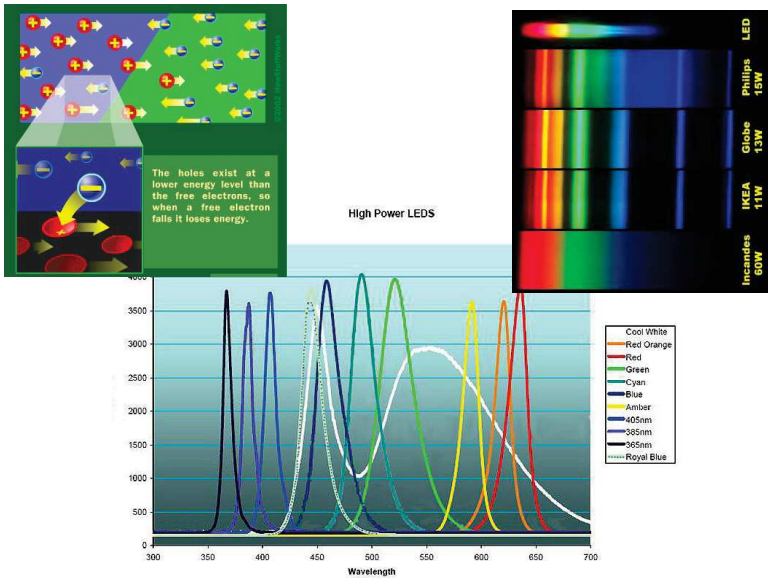
Biele LED (referát!!!)
- s luminoforom (konverzia žiarenia)
- multiprechodové (multichip)



Zdroje svetla: Svetlo emitujúce diódy (LED)

Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [AV]	Semiconductor material
Infrared	λ > 760	ΔV < 1.63	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	610 < λ < 760	1.63 + ΔV < 2.03	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	590 < λ < 610	2.03 + ΔV < 2.10	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	570 < λ < 590	2.10 + ΔV < 2.18	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	500 < λ < 570	1.8 ^[9] < ΔV < 4.0	Indium gallium nitride (InGaIn) / Gallium(III) nitride (GaN) Gallium(III) phosphide (GaP)
Blue	450 < λ < 500	2.48 + ΔV < 3.7	Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP)
Violet	400 < λ < 450	2.76 + ΔV < 4.0	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaIn) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
Purple	multiple types	2.48 + ΔV < 3.7	Indium gallium nitride (InGaIn)
Ultraviolet	λ < 400	3.1 < ΔV < 4.4	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple phosphor
Pink	multiple types	ΔV ~ 3.3 ^[9]	Diamond (225 nm ^[11]) Boron nitride (215 nm ^[12]) Aluminium nitride (AlN) (210 nm ^[13]) Aluminium gallium nitride (AlGaIn) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInIn)—down to 210 nm ^[14]
White	Broad spectrum	ΔV = 3.5	Blue/UV diode with yellow phosphor

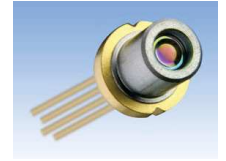




Zdroje svetla: LASER

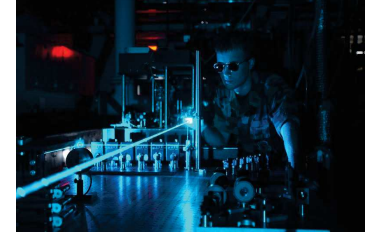
Podľa aktívnej látky

- **Pevnolátkové**
 - Rubín
 - Safír
 - Nd:YAG laser
 - **Polovodič** (GaAs, AlGaInP, GaN)
- **Plynové**
 - N, CO₂
 - He, Ne, Xenón
 - Excimerové (ArF, KrCl, KrF)
- **Kvapalinové** (farbivové)
 - organické farbivá
 - anorganickými farbivá



Režim činnosti

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



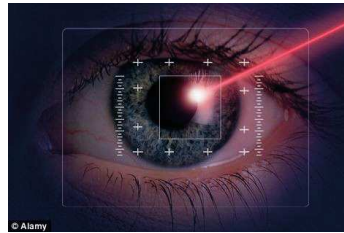
Zdroje svetla: LASER



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

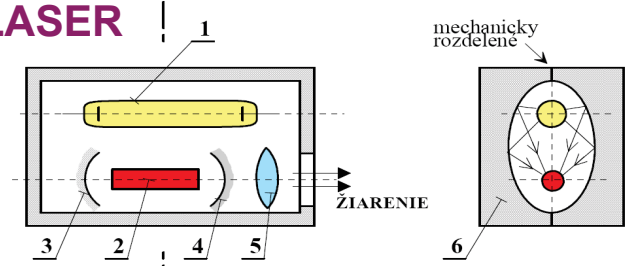
difúzny odraz žiarenia nespôsobuje poškodenie zdravia. DVD-R napalovačky

kategória IV

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



Zdroje svetla: LASER

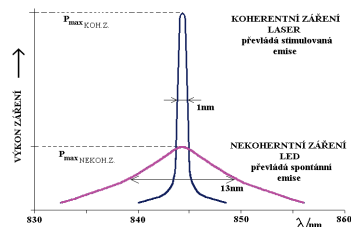


Nevýkonové využitie laserov:

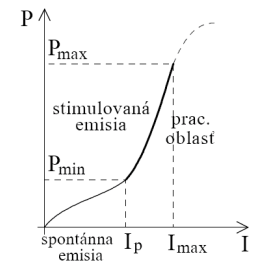
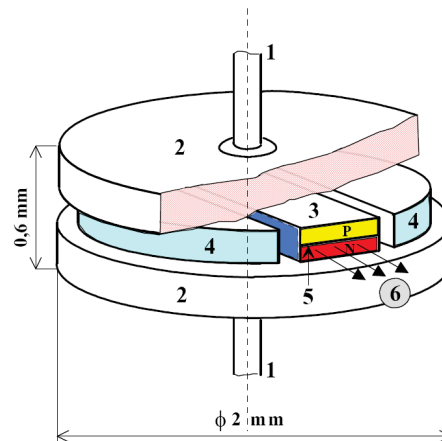
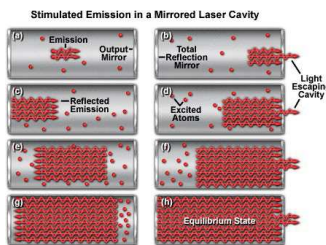
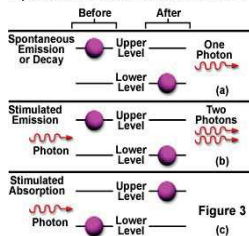
- prenos informácií (optovlákná)
- holografia
- meranie vzdialeností (geometrické, interferenčné)

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

Zdroje svetla: polovodičový laser



Spontaneous and Stimulated Processes



- $I_p = 80 - 150 \text{ mA}$
- $\eta > 40\%$
- Impulzy 1ps
- div $5 \times 25^\circ /$ kolimačná šošovka

Zdroje svetla: polovodičový laser

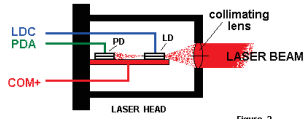
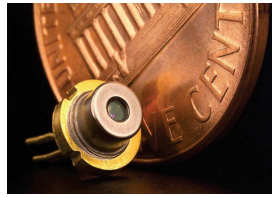
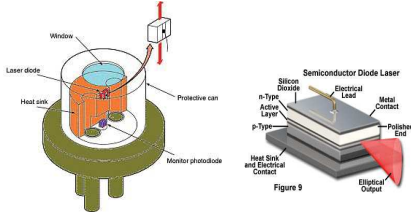
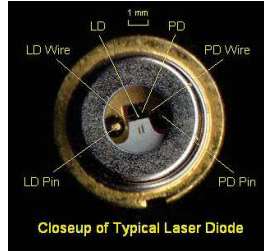
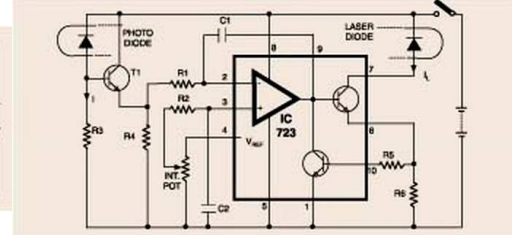
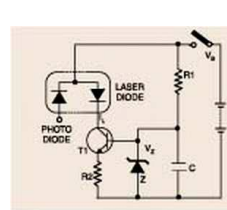
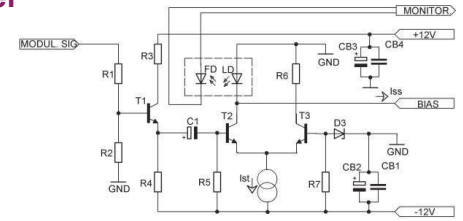
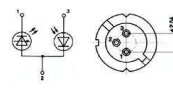


Figure 2



Zdroje svetla: polovodičový laser



Optické prvky: zrkadlá, filtre...



Optické systémy

Zdroje svetla Optická cesta Snímače

3.4.4. Zrkadlá

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

3.4.5. Filtre - selekcia vlnových dĺžok

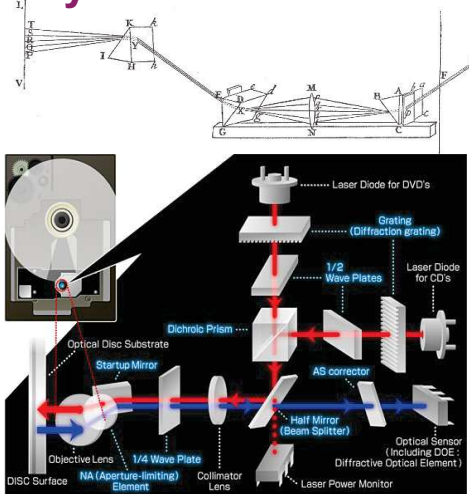
- * polarizačné filtre - lineárna, kruhová polarizácia
- Pozn: Filtre sa musia aplikovať v rovnooběžnom zväzku lúčov, inak pôsobia ako opt. klin - posúvajú priesečník lúčov.

3.4.6. Ostatné prvky

- * hranoly (trojboký, pentagonálny),
- * clony, štrbiny, tieniace krídlečka,
- * optické mriežky, sedý klin

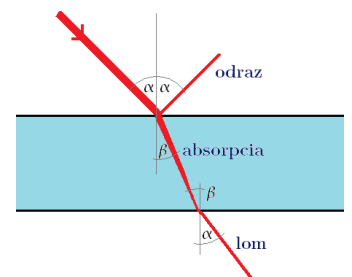
Optické systémy Optická cesta

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



Interakcia žiarenia s hmotou

- Odraz
- Lom
- Absorpcia
- Rozptyl
- Emisia žiarenia



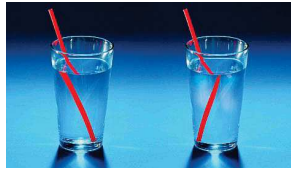
antireflexné pokrytie – v určitom rozsahu vlnových dĺžok svetlo prechádza šošovkou prakticky bez strát

Snellov zákon lomu

Snell's law / law of refraction

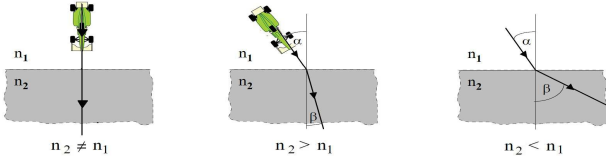
$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- α – je uhol dopadu
- β – je uhol lomu
- $v_{1,2}$ rýchlosť vlnenia v prostredí 1,2
- $n_{1,2}$ index lomu v prostredí 1,2



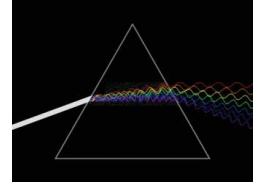
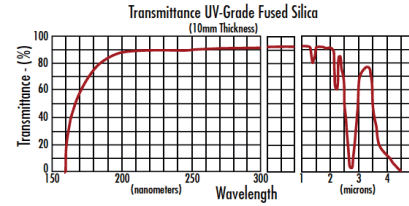
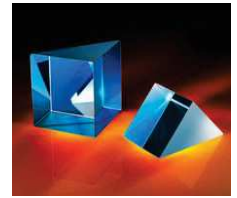
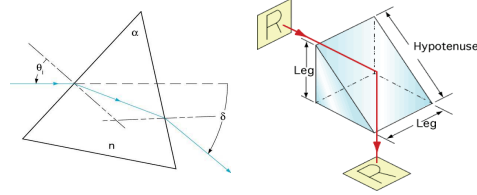
Metamateriály

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).



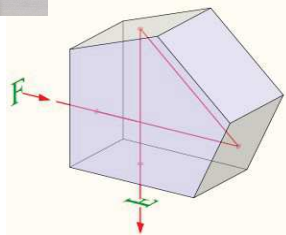
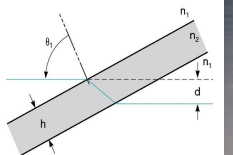
Optické prvky: hranol

Prism, Prisma, Призма, hranol



Optické prvky: hranol

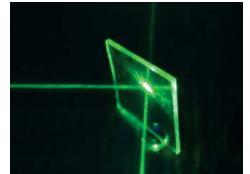
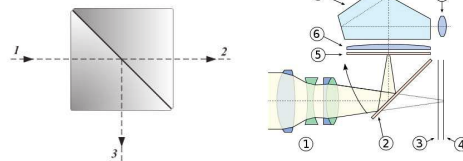
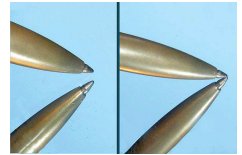
Prism, Prisma, Призма, hranol



Optické prvky: zrkadlá

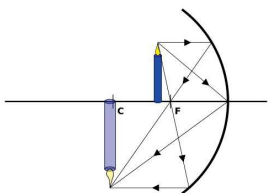
Mirror, Spiegel, зеркало, zrcadlo

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



Optické prvky: zrkadlá

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

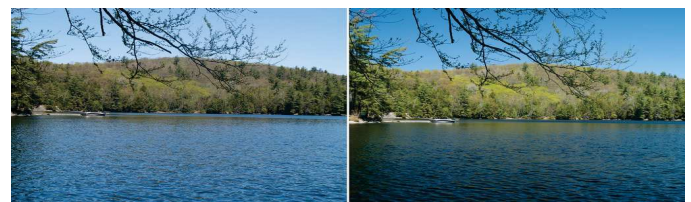
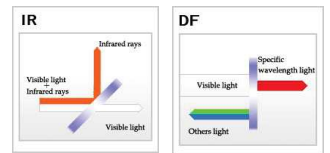
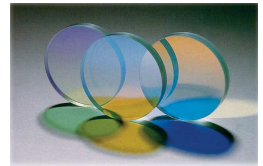
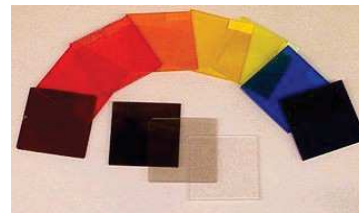


Reflection from Convex and Concave Surfaces

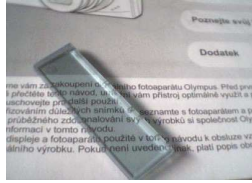
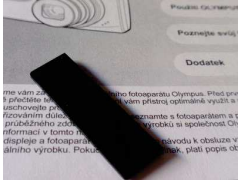


Optické prvky: filter

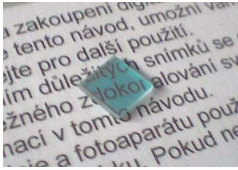
Filter, Светофильтр



Optické prvky: filter



Skličko z ovladača sa jeví ľudskému oku jako černé. Stejně ho vyfotili i neupravený foťák (vlevo). Webkamera s odstraněným IR filtrem ho však vidí jako čiré (vpravo). Ač to tak vůbec nevypadá, na obou foťáčkách je stejné skličko!



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

Optické prvky: šošovky

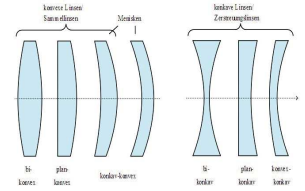
Lens, Linse, Линза, čočka

Základné typy šošoviek

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

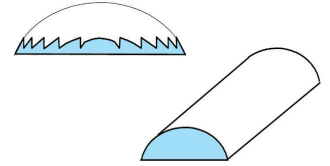
Reálny obraz - dá sa zachytiť na priemetni, napr. papier, prevrätý

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



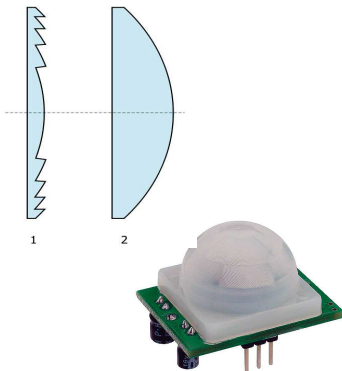
Tvary šošoviek

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



Fresnelova šošovka

Fresnel lens



Optické prvky: šošovky

lens

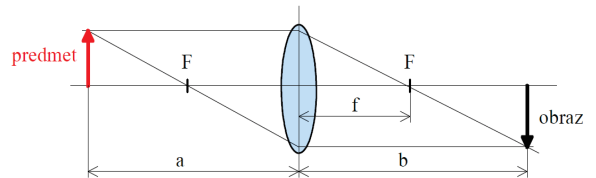
Ostrý obraz - platí zobrazovací rovnica :

$$(6 - 1) \text{ zväčšenie } (6 - 2))$$

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

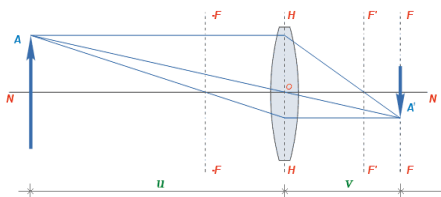
$$Z = \frac{A'}{A} = \frac{-v}{u} = \frac{v-f}{f} = \frac{-f}{u-f}$$

Zobrazovacia rovnica:

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

Ohnisková vzdialenosť:

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



- Z – pričné 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 mohutnosť (ϕ)

Zobrazovacia rovnica

Znamienková konvencia

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

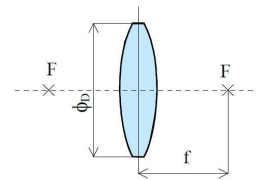
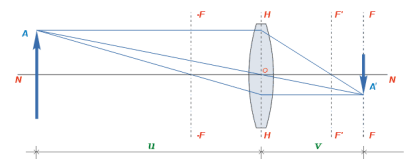
obrazová vzdialenosť v
kladná ($v > 0$) za šošovkou → obraz je skutočný
záporná ($v < 0$) pred šošovkou → obraz je neskutočný

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

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

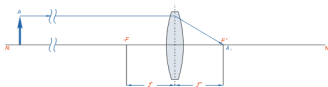
jednotka je dioptria D
+ D spojná
- D rozptylná

priemer šošovky Φ_D (svetelnosť)

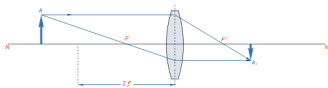


Optické prvky: šošovky

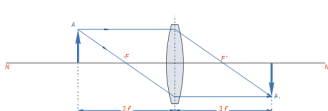
zobrazovanie



Predmet je nekonečne vzdialený a jeho obraz je nekonečne malý



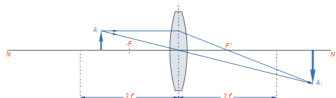
Predmet je vzdialený viac ako 2x ohnisková vzdialenosť šošovky ($u > 2f$). Obraz je:
 - skutočný $v > 0$
 - zmenšený $|z| < 1$
 - prevrátený $z < 0$



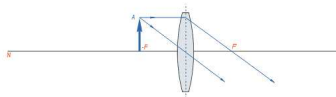
Predmet je vzdialený presne 2x ohnisková vzdialenosť šošovky ($u = 2f$). Obraz je:
 - skutočný $v > 0$
 - rovnaký $|z| = 1$
 - prevrátený $z < 0$

Optické prvky: šošovky

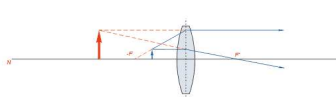
zobrazovanie



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 $z < 0$



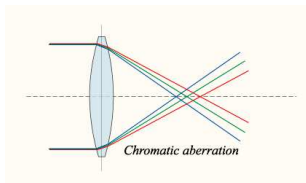
Predmet je rovnako vzdialený ako ohnisková vzdialenosť šošovky: $u = f$
 Obraz sa vytvorí v nekonečne



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

Optické prvky: šošovky

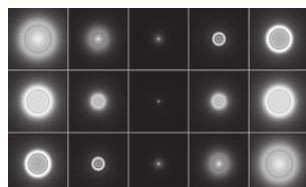
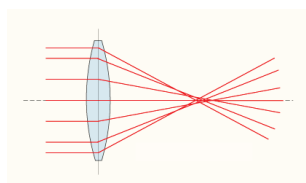
optické vady



Chromatic aberration



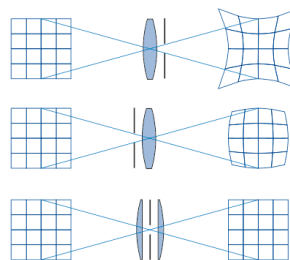
chromatická aberácia
farebná chyba



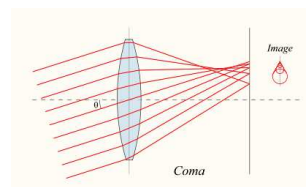
sférická aberácia
guľová chyba

Optické prvky: šošovky

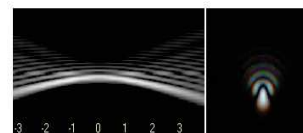
optické vady



skreslenie



Coma



koma

Optické prvky: šošovky

parametre

Relatívny otvor, pri objektivoch 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 –

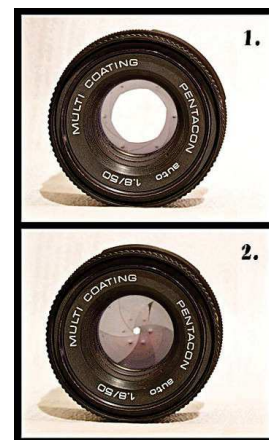
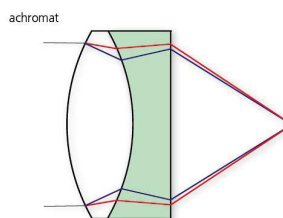
Najznámejšie sústavy sú:

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

Optické prvky: objektiv

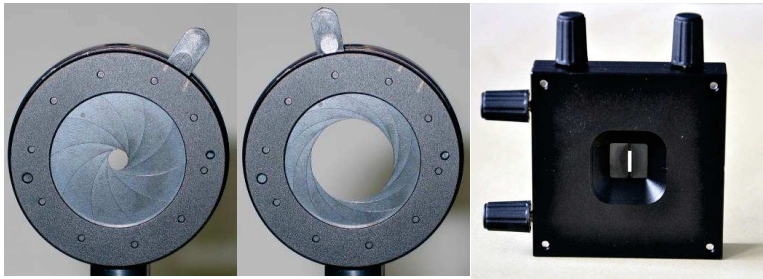
objektív – 3 ÷ 20 šošoviek

tmelené členy - achromat



Optické prvky: clony

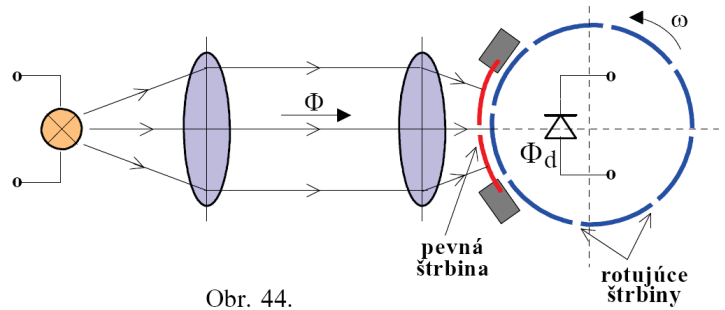
Aperture, Blende, Апертура



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

optická štrbina – príklad

snímač otáčok



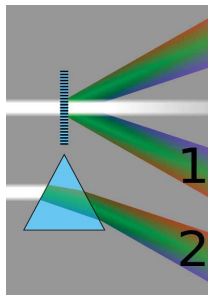
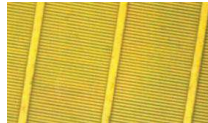
Obr. 44.

Optické prvky: optická mriežka

diffraction grating, gitter Дифракционная решётка

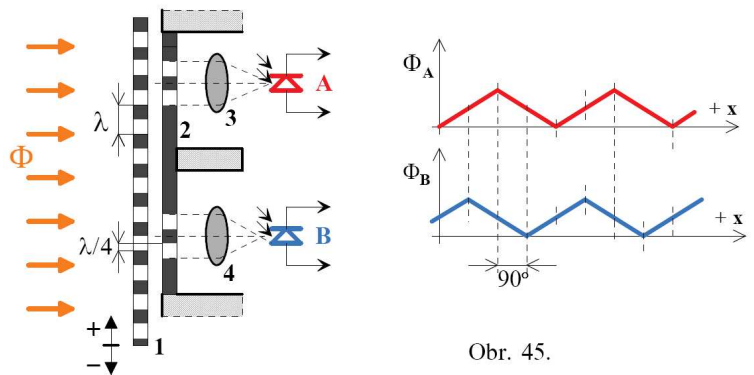
- rozlišovacia schopnosť mriežky
počet vrypov, (600 – 2400 na 1 mm)

- mriežková konštanta
vzdialenosť medzi dvoma vrypami



optická mriežka – príklad

snímač polohy

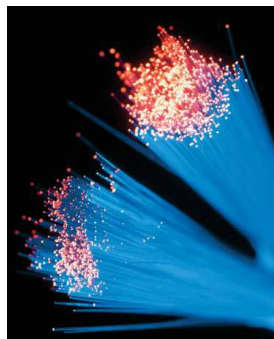


Obr. 45.

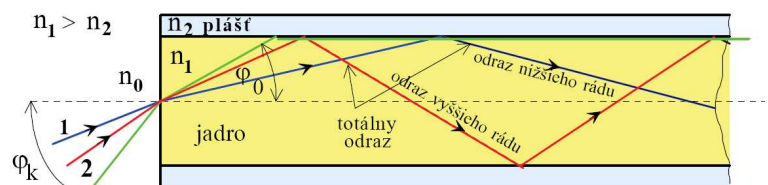
Vláknová optika

fiber optics

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



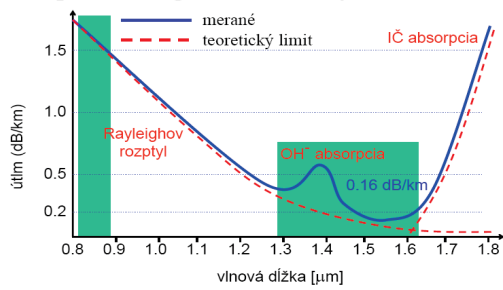
Elementárny svetlovod



absolútny odraz od rozhrania dvoch prostredí

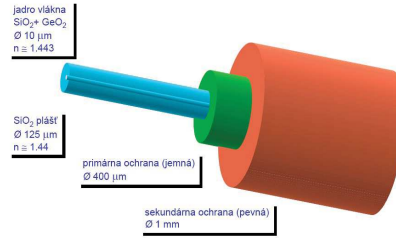
- MM – multimódové / mnohovidové
- SM – jednovidové / monomódové
- .
- Materiál: SiO₂ (sklo), plastové

Vláknová optika – útlm



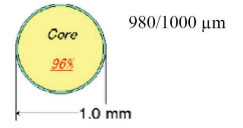
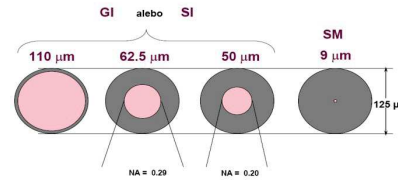
- $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (min. straty pre $1,2 \mu\text{m}$ – perspektívne $1,5 \mu\text{m}$)
- $\alpha = 0,3 \text{ dB / km}$
- IČ absorpcia, Rayleigho rozptyl, OH absorpcia
(optické vlákna sú citlivé na vlhkosť, potreba zabaliť do ochranného obalu)

Konštrukcia optovlákien



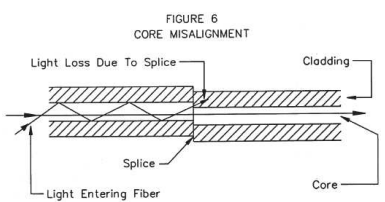
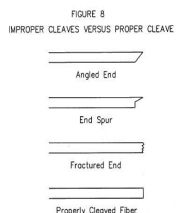
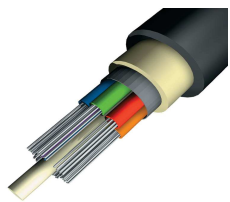
konštrukcia Single-Mode (SM) vlákna

konštrukcia plastového MM vlákna



Štandardné prierezy komunikačných optických vlákien

Konštrukcia optovlákien



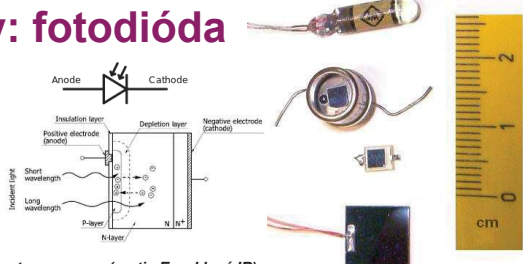
Optické systémy

Zdroje svetla
Optická cesta
Snímače

Detektory: fotodióda

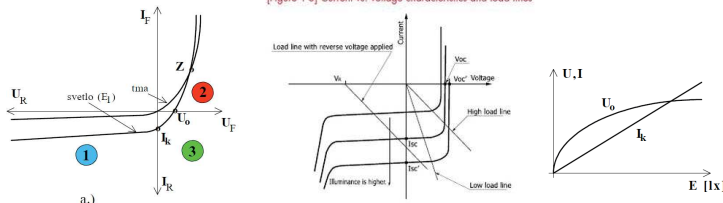
photodiode

rýchle, málo citlivé



- 2 - odporový režim v priepustnom smere (rastie E → klesá IR)
- 3 - hradlový režim (U0 je výst. napätie naprázdno, Ik je výst. prúd nakrátko)
- Z - pracovný bod necitlivý na svetlo

[Figure 1-8] Current vs. voltage characteristics and load lines



Detektory: fototranzistor

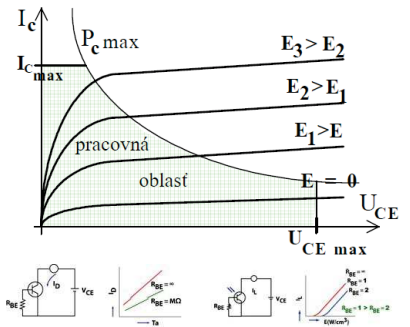
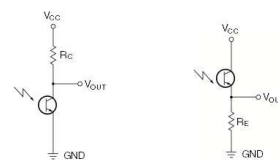
phototransistor

- citlivejšie, ale i zotrvačnejšie ako fotodiódy.
- 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: fotoodpor, fotorezistor

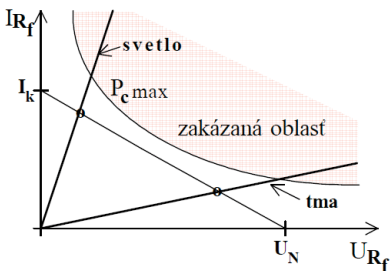
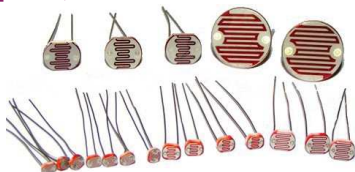
photoresistor



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

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

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



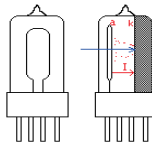
V - A charakteristika

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 fotón
- 2 elektrón
- 3 sekundárny elektrón

