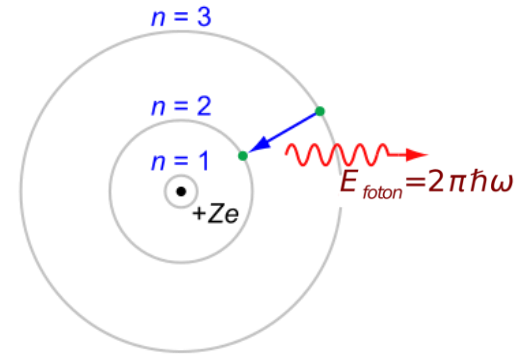


# detektory světla a digitální optika

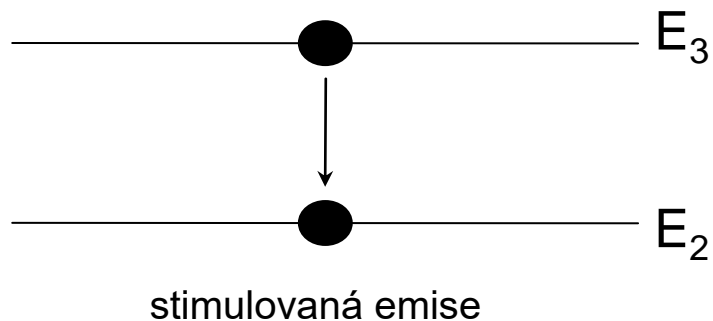
# Absorpce x Emise

- Absorpce záření
  - Látka pohlcuje fotony záření a elektrony přecházejí na vyšší energetické hladiny
- Samovolná emise záření
  - Elektrony samovolně přecházejí z vyšší energetické hladiny  $E_3$  na nižší  $E_2$  a atomy vyzařují fotony s energií  $E_{\text{foton}}$



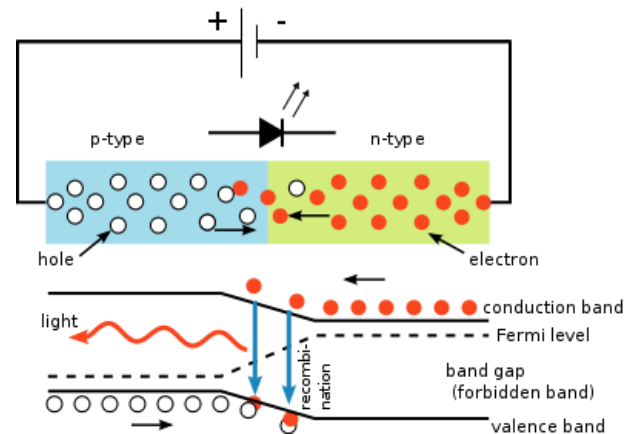
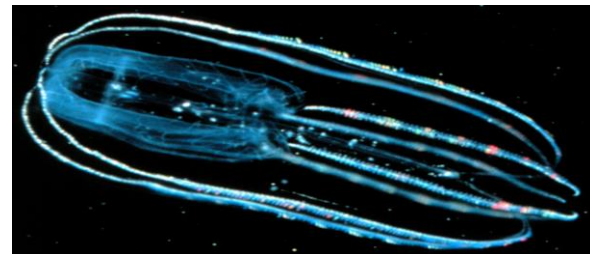
# Stimulovaná (vynucená) emise světla

Nastává u excitovaných atomů vnějším působením. Emisi vyvolá jen foton o stejné frekvenci, jakou má foton, který emisí vzniká.



# Zdroje světla

- Tepelné zdroje (svíčka, petrolejová lampa, žárovka)
  - nízká účinnost (málo energie se přemění na světlo)
- Výbojové zdroje (výbojky, doutnavky)
  - čárové nebo pásové spektrum, jejich účinnost je větší než u tepelných zdrojů
- Luminiscenční zdroje (obrazovky, zářivky)
  - záření o kratší vlnové délce vyvolá v látce určitého složení vznik záření o delší vlnové délce. Např. v zářivce probíhá výboj plynu jehož UV záření je pro oko neviditelné. UV dopadá na vrstvu látky (luminofor), kterou je pokryta vnitřní plocha trubice a způsobuje její luminiscenci (záření).
  - Fotoluminiscence, Radioluminiscence, Katodoluminiscence, Chemiluminiscence, Bioluminiscence
- LED
  - Prochází-li přechodem P-N diody LED elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje (emituje) nekoherentní světlo s úzkým spektrem, které je závislé na chemickém složení použitého polovodiče.
  - UV, různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo. Bílé světlo – RGB míchání, emise modrého světla + luminiscence žlutého světla, emise UV + luminiscence bílého světla.
- Laser



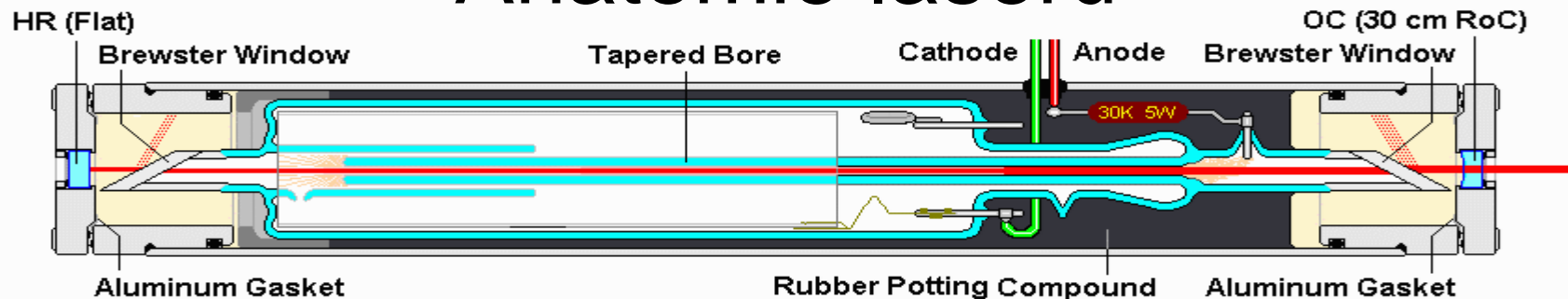
# Laser

- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
  - Plynové (He-Ne, CO<sub>2</sub>, Ar, HeAg, NeCu)
  - Chemické (HF/DF)
  - Excimerové (ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF) vhodné pro LASIC
  - Pevnolátkové (Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:YLF, Nd:YAG, Yb:YAG, Yb:KGW, Yb:KYW, Yb:SYS, Yb:BOYS, Yb:CaF<sub>2</sub>, Ti:sapphire)
  - Polovodičové
  - Barvivové

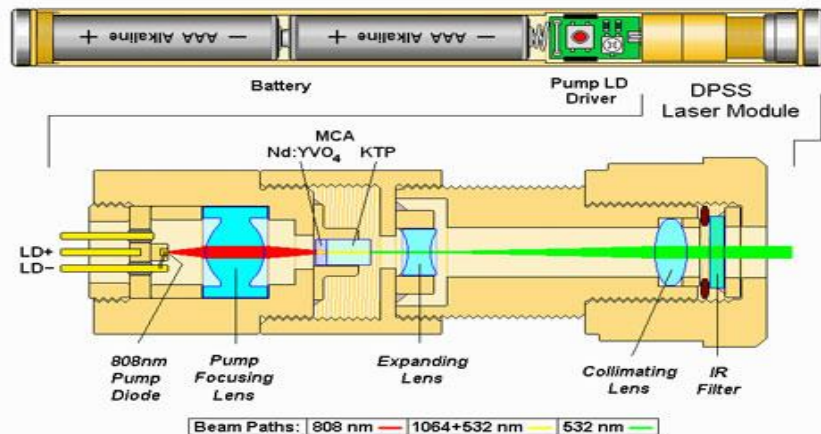
## **a nebo**

- Kontinuální
- Pulzní

# Anatomie laseru



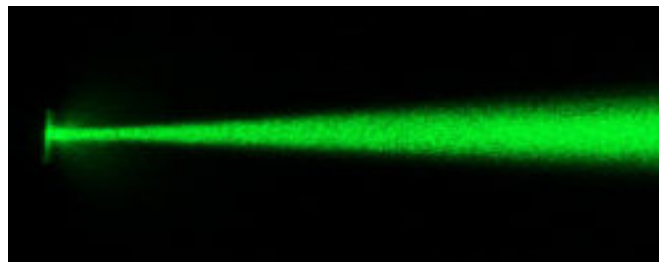
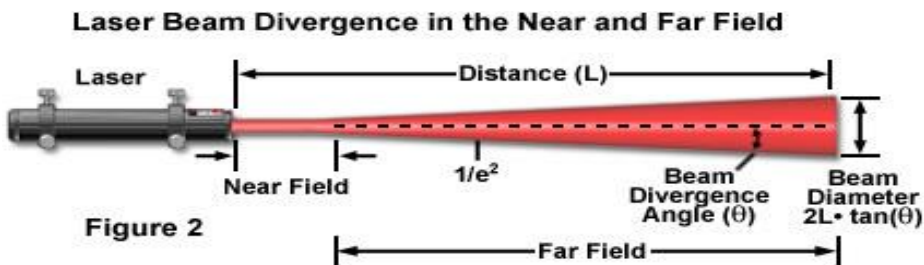
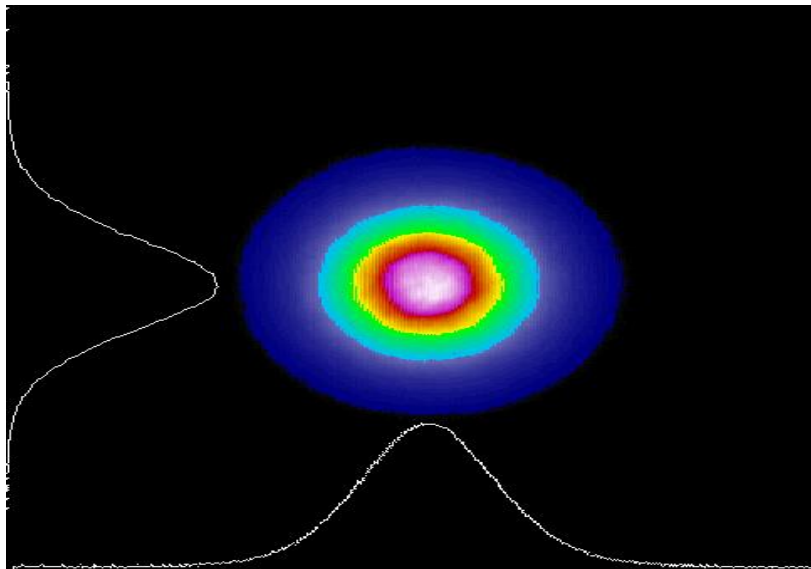
## Hughes Model 3184H HeNe Laser Head Construction



Laserový modul obsahuje výkonný IR diodový laser. Ten pumpuje krystal  $\text{Nd:YVO}_4$  v laserové kavitě (rezonátoru). Laser produkuje infračervené záření které je omezeno uvnitř rezonátoru. Nicméně obsahuje nelineární KTP krystal, který způsobuje zdvojení frekvence, což vede k záření zeleného světla 532 nm. Přední zrcadlo je transparentní pro tuto viditelnou vlnovou délku, která je pak rozšířena a kolimována.

# Vlastnosti laserového svazku

- Časově koherentní
- Polarizovaný i nepolarizovaný
- Gaussovský průřez svazku základního modu rezonátoru
- Směřovost svazku
- Vysoká hustota výkonu (nebezpečí)

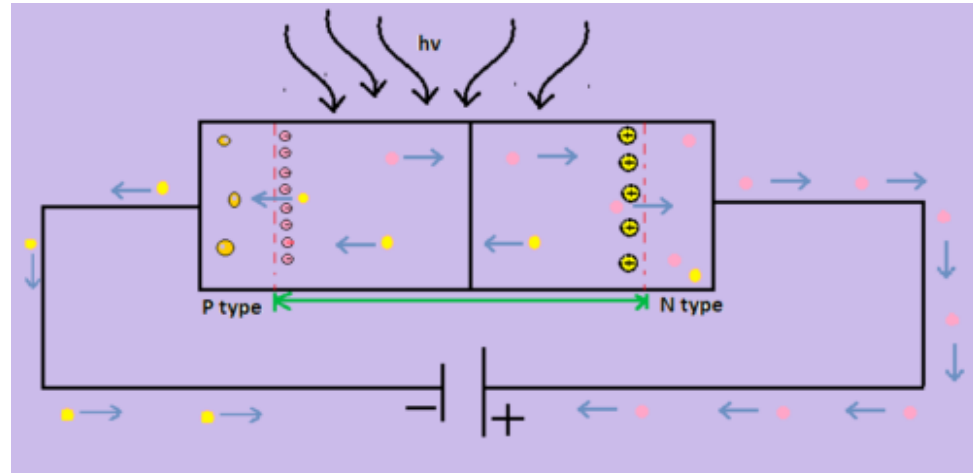


# Bodové detektory



# Fotodioda

- Fotovoltaický režim
  - Ve fotovoltaickém režimu není dioda připojena k napájecímu zdroji. Když světlo dopadne na fotodiodu, excituje elektrony do stavu vyšší energie a vede k tomu, že se elektrony pohybují směrem ke katodě a díry směrem k anodě. Tento proces vytváří rozdíl potenciálů mezi katodou a anodou.
- Fotoelektrický režim
  - Ve fotoelektrickém režimu je dioda připojena ke zdroji energie. Když světlo dopadne na fotodiodu, vytvoří se pár elektronů a děr, které se pohybují v opačném směru v důsledku přivedeného napětí.



# Lavinová fotodioda

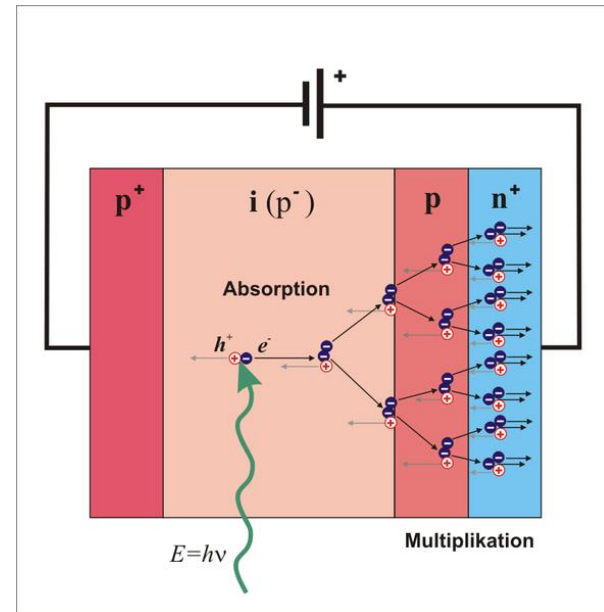
- velmi citlivá
- předepnuta vysokým závěrným napětím řádu desítek až stovek voltů
  - > těsně pod průrazovým napětím
  - > zisk 100 až 1000 x
- elektrony a díry jsou urychlovány silným vnitřním elektrickým polem, generují další nosiče, vzniká lavinový jev
- ze čtyř vrstev: N+(více dopovaný N), P, čistého polovodiče a P+ (vícedopovaný P)
  - > mezi vrstvami N+ a P vzniká lavinový jev
- parametry:

**Materiál** - Křemík (190nm - 1100nm, zisk M ~ 100 - 500), Germanium (infrachervená oblast ~ 800nm - 1700nm, vysoká hodnota šumu M ~ 10), IndiumGaliumArsenid (~ 900nm - 2200nm, M ~ 10), GaliumNitrid (UV)

**Velikost diody** - velikost fotocitlivé oblasti, závisí na volbě optické soustavy, čím větší, tím dražší

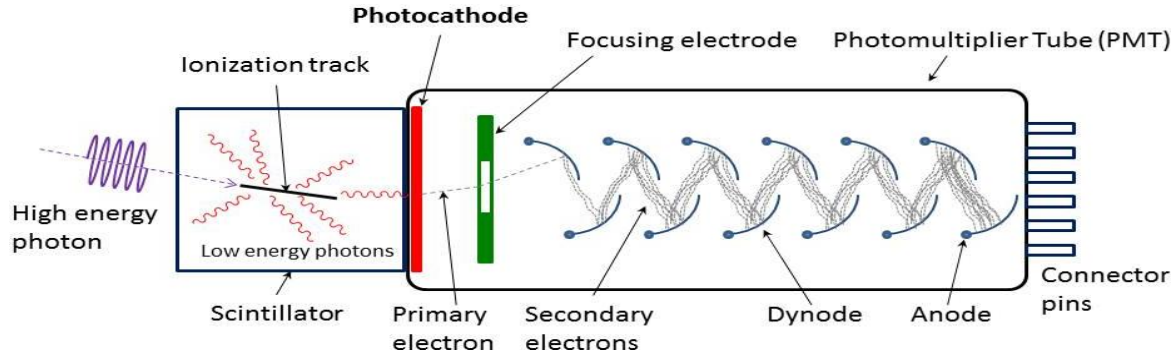
**"Temný" proud** (dark current) - proud, který prochází fotodiódou, na kterou nedopadá žádné světlo; roste s předepínajícím napětím a ziskem diody.

**Zisk** - roste s předepínajícím napětím, zisk je také závislý na teplotě (s rostoucí teplotou klesá)



# PMT - fotonásobič

- fotony dopadají na fotokatodu a interagují s elektrony materiálu fotokatody
- dochází k fotoelektrickému jevu – k vyražení elektronů nad povrch katody
- elektrony jsou pak postupně urychlovány elektrickým napětím mezi jednotlivými elektrodami (tzv. dynodami)
- dopad urychlených elektronů na dynodu vyvolává emisi většího počtu elektronů (tzv. sekundární emise)
- > znásobení počtu elektronů, které jsou urychlovány směrem k další dynodě
- > po sérii zesílení proud elektronů dopadá na anodu
- celkové zesílení až 10<sup>8</sup>x
- > detekce jednotlivých fotonů

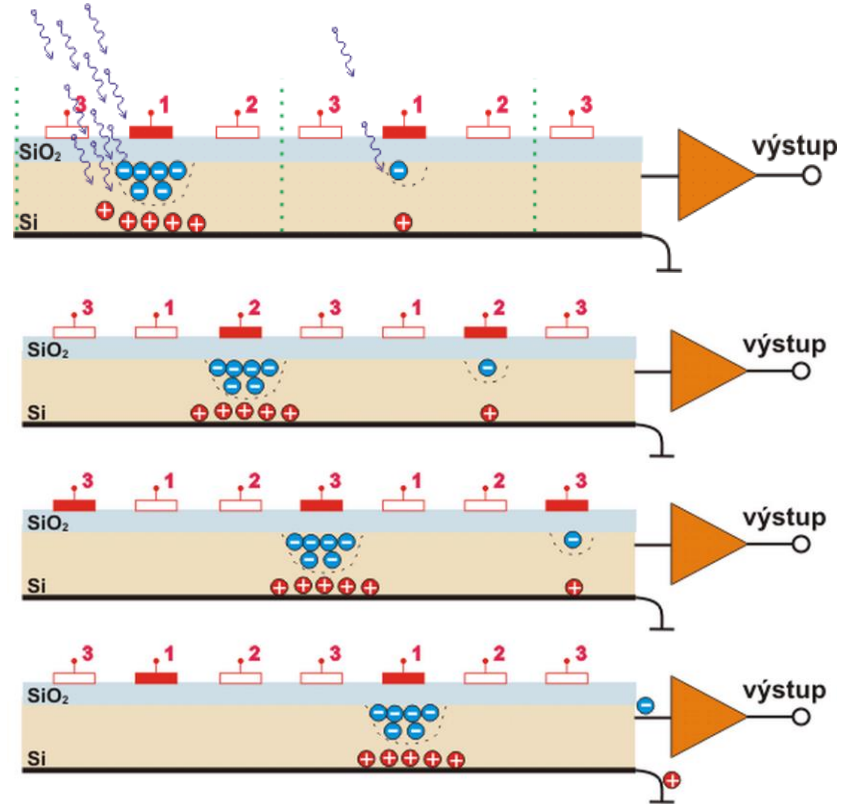


# Plošné detektory

# CCD - Charge-Coupled Device

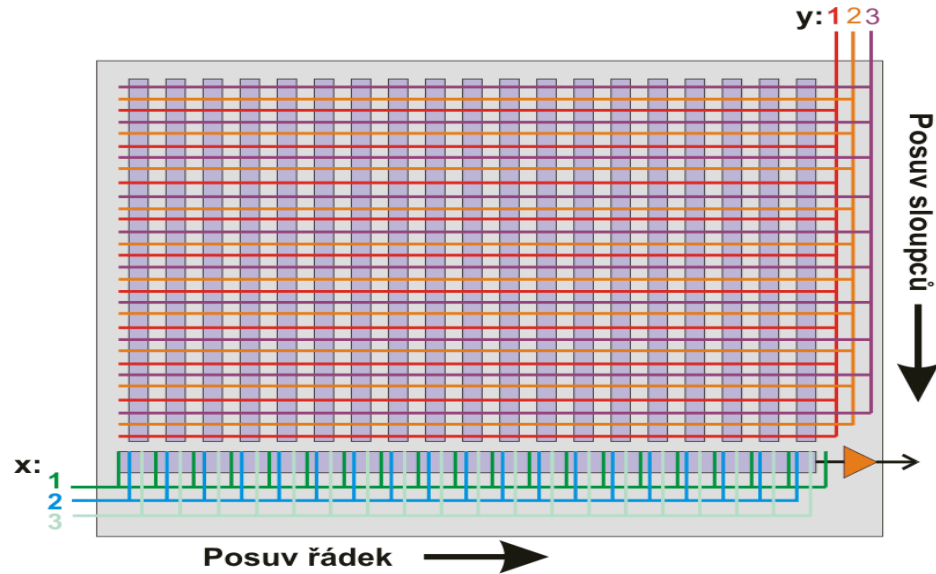
Na elektrody označené na obrázku číslem 1 se přivede kladné napětí a na CCD se nechá působit světlo. Dopadající fotony excitují v polovodiči elektrony, které jsou pak přitahovány ke kladně nabitým elektrodám. Po elektronech zbudou v polovodiči tzv. díry, které vůči svému okolí vykazují kladný náboj a ty jsou naopak přitahovány elektrodou na spodku CCD. Hranice pixelů jsou na obrázku znázorněny svislými tečkovanými čarami. Protože na pixel vlevo dopadlo více fotonů, je u jeho elektrody shromážděno více elektronů než u pixelu vpravo.

Po uzavření závěrky se začne na množiny elektrod 1, 2 a 3 přivádět trojfázový hodinový signál. To v praxi znamená, že na elektrodách 2 se začne pozvolna zvyšovat napětí, zatímco na elektrodách 1 se souběžně snižuje. Díky tomu jsou shluky elektronů přitahovány pod elektrody 2. Následně se celý děj opakuje mezi elektrodami 2 a 3, dále mezi 3 a 1 a tak stále dokola. Shluky elektronů z jednotlivých pixelů se tak posouvají přes sousední pixely směrem k výstupnímu zesilovači (na obrázcích vpravo). Tento zesilovač pak zesílí malý proud odpovídající počtu nachytných elektronů v jednotlivých pixelech na napěťové úrovni vhodné pro další zpracování obrazu.



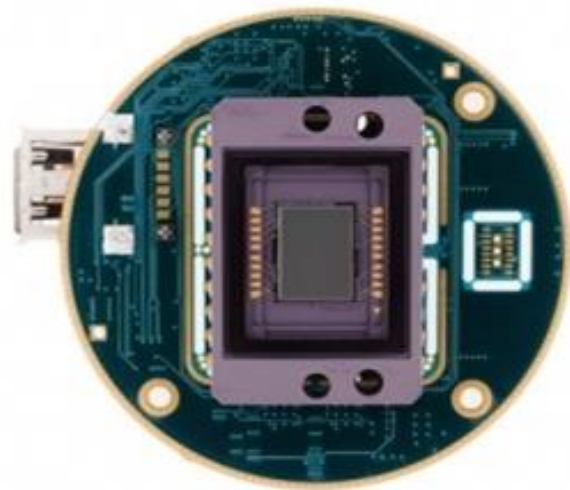
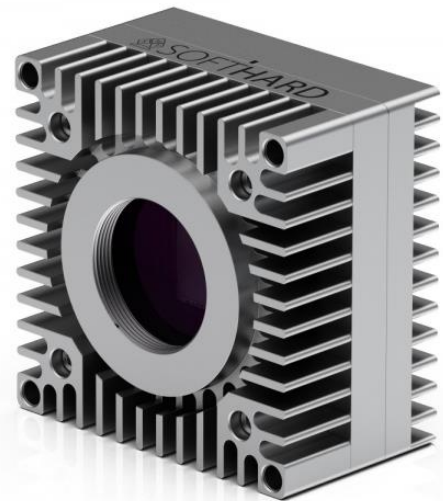
# Plošné CCD

Obraz se snímá tak, že se nejprve trojfázovým posuvem vysune první pixel ze všech svislých sloupců ve směru  $y$  do spodního vodorovného řádku. Z toho se pak opakovaným trojfázovým posuvem ve směru  $x$  celý řádek naposouvá k obrazovému zesilovači. Poté se dalším trojfázovým posuvem ve směru  $y$  posune druhý pixel ze všech sloupců do vodorovného CCD. Celý tento cyklus se opakuje dokud nejsou ze sloupců vyprázdněny všechny pixely.



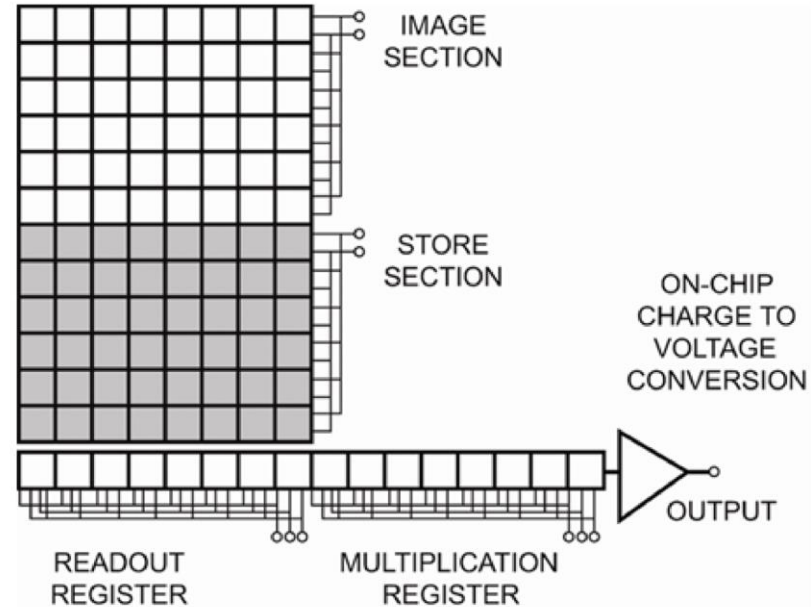
# CCD

- Rozlišení: 4.2 MP 2048x2048 pixelů
- Typ senzoru: CCD B/W
- Senzor : KODAK KAI-4021
- Velikost senzoru: 4/3 palce
- Aktivní plocha senzoru: 16.67x16.05 mm
- Bitová hloubka pixelu: 8, 10, 12, 14
- Vyčítací šum typický: 3 ě
- Vyčítací šum maximální: 5 ě
- Dynamický rozsah: 70dB
- Podzvorkování čipu: 1x1, 2x2, 4x4, 6x6
- Interface kamera – PC: IEEE1394A
- Napájení: 5-12V 1.8W, typ. 3.8W s chlazením
- Chlazení: Peltierův článek
- Závit pro objektiv: C-Mount
- Váha: 250g
- Rozměry WxHxD : 60 x 60 x 35 mm



# EMCCD

- vysoká citlivost (photon counting) a vysoká rychlost
- zesílení signálu před odečtem
- struktura jako u CCD
  - dvě oblasti
    - > „část obrazu“ - zachycuje obraz
    - > „úložná oblast“ - stejná velikost jako oblast snímače, je pokryta neprůhlednou maskou
  - během akvizice je oblast senzoru vystavena světelnému signálu a je zachycen obraz, který je poté automaticky posunut dolů za maskovanou oblast čipu a poté načten.
  - během čtení je snímán další snímek
  - pro odečtení senzoru je náboj posunut ven přes čtecí registr a poté přes multiplikační registr





# EMCCD

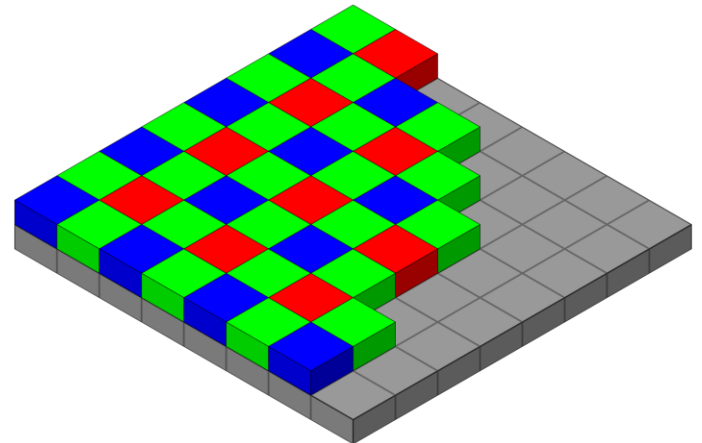
Type number	C9100-23B (ImagEM X2 EM-CCD camera)		C9100-24B (ImagEM X2-1K EM-CCD camera)	
Camera head type	Hermetic vacuum-sealed chamber air/water-cooled head *1			
Window	Anti-reflection (AR) coatings on both sides, single window			
AR mask	Yes		No	
Imaging device	Electron Multiplying Back-Thinned Frame Transfer CCD			
Effective number of pixels	512 (H) × 512 (V)		1024 (H) × 1024 (V)	
Pixel size	16 μm (H) × 16 μm (V)		13 μm (H) × 13 μm (V)	
Effective area	8.19 mm (H) × 8.19 mm (V)		13.3 mm (H) × 13.3 mm (V)	
Pixel clock rate	EM-CCD readout	22 MHz, 11 MHz, 0.6875 MHz		
	Normal-CCD readout	0.6875 MHz		
EM (electron multiplying) gain (typ.) *2	1×, 4× to 1200×		1×, 10× to 1200×	
Ultra-low light detection	Photon Imaging mode (1, 2, 3)			
Fastest readout speed	70.4 frames/s to 1076 frames/s		18.5 frames/s to 314 frames/s *3	
Readout noise (rms) (typ.)	EM-CCD readout	EM gain	36 electrons (at 22 MHz)	
		4× (C9100-23B)	15 electrons (at 22 MHz)	
		10× (C9100-24B)	10 electrons (at 11 MHz)	
	EM gain 1200×	8 electrons (at 0.6875 MHz)		3 electrons (at 0.6875 MHz)
Normal CCD readout	1 electron max.			
Full well capacity (typ.)	EM-CCD mode	370 000 electrons		400 000 electrons
	Normal-CCD mode	140 000 electrons		50 000 electrons
Analog gain *4	EM-CCD readout	22 MHz	1×	
		11 MHz / 0.6875 MHz	0.5×, 1×	
	Normal CCD readout	1×, 2×, 3×, 4×, 5×		
Cooling method / temperature *5	Forced-air cooled	at temperature control (Ambient temperature: 0 °C to +30 °C)	-65 °C	
		at maximum cooling typ.	-80 °C (Ambient temperature: Stable at +20 °C)	
		at maximum cooling typ.	-100 °C (Water temperature: lower than +10 °C)	
	Water cooled *6	at temperature control (Water temperature: +20 °C)	-80 °C	
		at maximum cooling typ.	-75 °C (22 MHz, Water temperature: +10 °C)	
		at maximum cooling typ.	-80 °C (11 MHz, 0.6875 MHz, Water temperature: lower than +10 °C)	
EM-CCD readout	at 22 MHz	-50 °C (at 22 MHz)		
	at 11 MHz, 0.6875 MHz	-55 °C (11 MHz, 0.6875 MHz)		
	at 22 MHz, 11 MHz, 0.6875 MHz	-60 °C (22 MHz, Ambient temperature: +20 °C)		
at 22 MHz, 11 MHz, 0.6875 MHz	-65 °C (11 MHz, 0.6875 MHz, Ambient temperature: Stable at +20 °C)			



<https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/C9100-24B/index.html>

# Bayerova maska

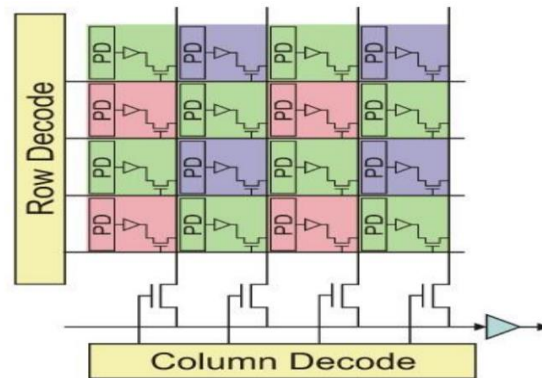
- pole barevných filtrů
  - > k filtraci světla dopadajícího na snímací čip
  - Bryce E. Bayer z firmy Eastman Kodak, který ji patentoval v roce 1976
- tři druhy filtrů
  - > R, G a B
  - > v pravidelné mřížce (2× více zelených než propouštějících ostatní 2 barvy - odráží vlastnosti lidského oka, které je nejcitlivější právě na tuto barvu)
- výsledkem snímání je snímek se stejným počtem pixelů jako má rozlišení čipu
  - > každý pixel obsahuje údaje jen o jedné dopadající barvě
  - > další dvě barevné složky pro vznik barevného obrázku se dopočítávají



# CMOS - Complementary metal –oxide – semiconductor

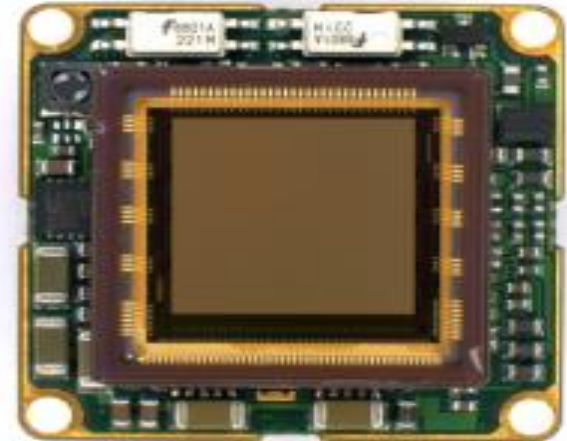
Elektronika je integrována přímo v buňce senzoru, má svůj vlastní zesilovač a je přímo adresována a čtena (na rozdíl CCD, který je čten postupně). Protože elektronika zabírá část plochy buňky a snižuje tak citlivou část buňky, používají výrobci tzv. mikroobjektivy, které soustřeďují na tuto část více světla. Tím kompenzují obrazový šum, vznikající nutným vyšším zesílením, potřebným vzhledem k menší citlivé ploše buňky.

Firma Sony produkuje zcela nový typ snímačů s názvem CMOS Exmor R s technologií Back Illuminated. Jde o to, že podařilo umístit elektrody napařené zatím vždy na přední straně křemíkového čipu na jeho zadní stěnu. Tím se samozřejmě značně zvětšila aktivní plocha jednotlivých buněk, což vede ke zvýšení citlivosti až o 1 eV. Exmor R je dvakrát citlivější než běžné CMOS snímače.



# CMOS

- Rozlišení: 4 M 2048 × 2048
- Typ senzoru: CMOS RGB Bayer Matrix
- Senzor: CMOSIS CMV4000
- Velikost senzoru: 1"
- Aktivní plocha senzoru: 11.27 × 11.27 mm
- Velikost pixelu: 5.5 × 5.5 μm
- Bitová hloubka pixelu: 8, 10, (12)
- Dynamický rozsah: 60dB
- Rychlost snímání: 90 fps
- Interface kamera – PC: USB 3.0
- Napájení: 1.6 W
- Závit pro objektiv: C nebo CS Mount
- Váha: 32g
- Rozměry WxHxD: 26 x 26 x 30 mm



# digitální optika

# AOD - akusto-optický deflektor

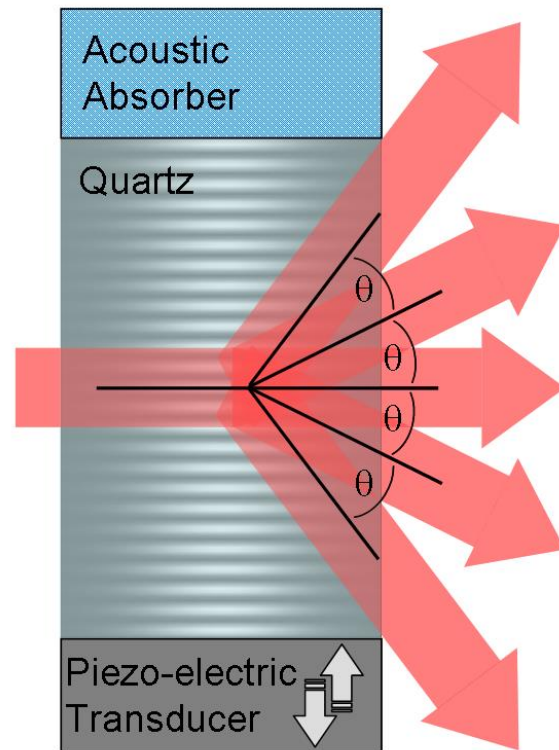
- nazývaný také Braggův článek nebo akustooptický deflektor (AOD)
- využívá akustooptický efekt difrakce světla pomocí zvukových vln (obvykle na radiofrekvenci)
- vzniká stojaté vlnění v krystalu
- vzhledem k poloze kmiten a uzlů vznikají lokální změny indexu lomu -> fázová difrakční mřížka
- jedna i dvě osy

$$\theta_B \approx \sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\Lambda}$$

$\lambda$  je vlnová délka světla ve vakuu

$n$  je index lomu krystalu

$\Lambda$  je vlnová délka zvukové vlny



# AOD - akusto-optický deflektor

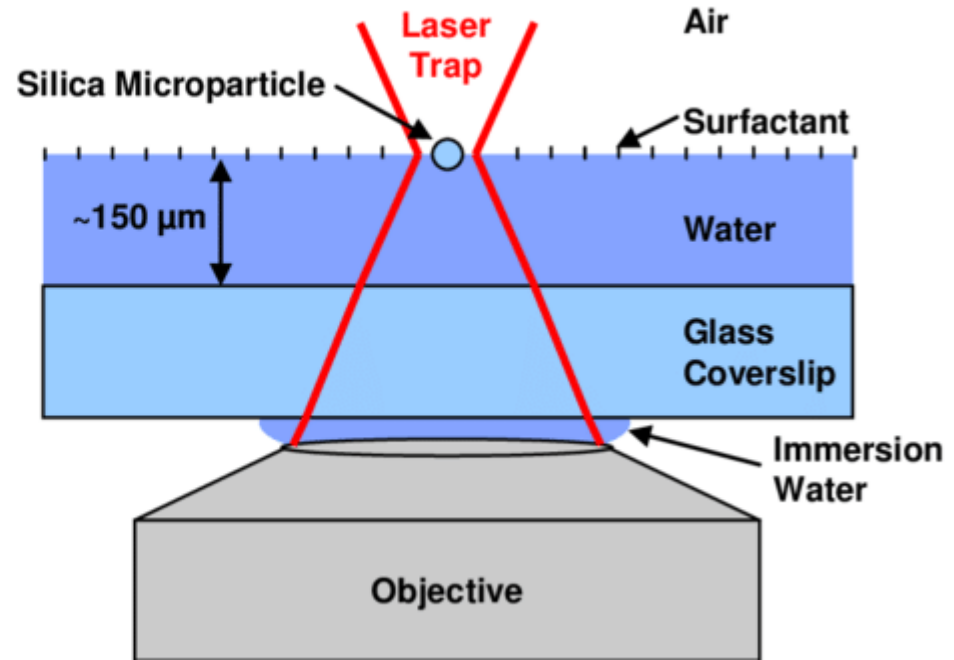
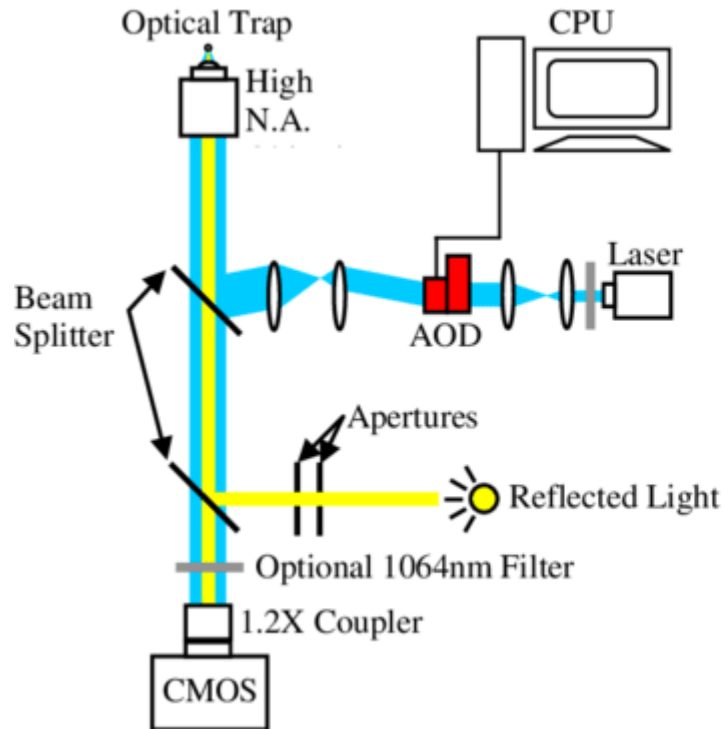
Optical Wavelength Range	633 nm
Acousto-Optic Material	Dense Flint Glass
Diffraction Efficiency (center of scan)	80%
Diffraction Efficiency (edges of scan)	60%
Centre Frequency	70 MHz
Deflection Bandwidth	40 MHz
Beam Separation	11.4 mrad (70 MHz)
Deflection Range	6.5 mrad
RF Drive Power <sup>3</sup> (nominal)	82.5 Watts
Input Impedance (nominal)	50 ohms
Optical Polarization	Any



IntraAction AOD-70 Acousto-Optic Deflector

<https://www.lambdaphoto.co.uk/intraaction-aod-70-acousto-optic-deflector.html>

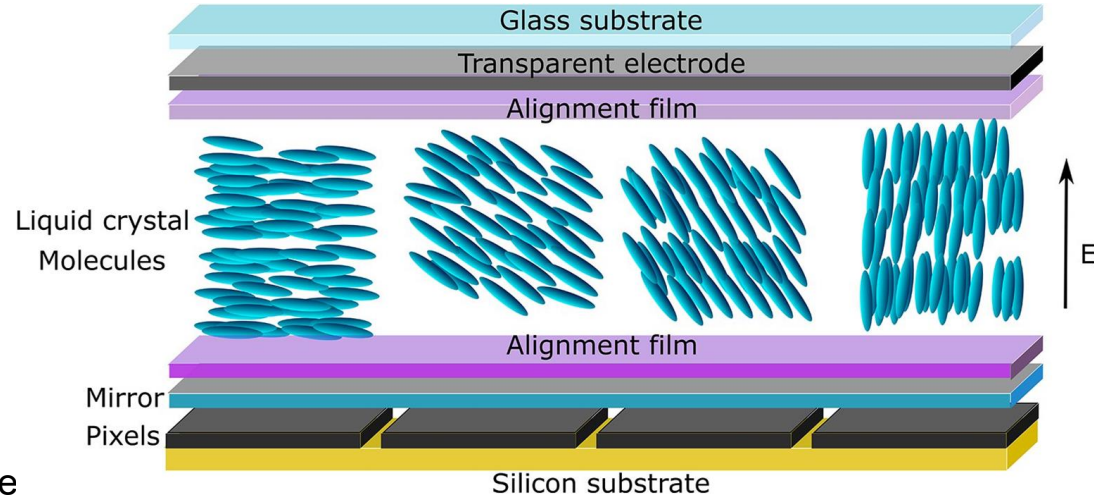
# AOD - akusto-optický deflektor





# LCOS-SLM - optický fázový modulátor

- elektricky ovládaná fáze svazku
- dvourozměrná struktura, ve které jsou uloženy tekuté krystaly
- každý krystal je buzen elektrickým polem
  - > dochází k otočení molekul krystalů vůči dopadajícímu paprsku
  - > naklonění molekul tekutého krystal změní jeho výsledný index lomu, čímž je kontrolována fáze světla
  - > 8bitová fáze světla
- použití:
  - výzkumné aplikace - generování optických vln, tvorba mřížek, čoček - možné kombinace jednotlivých komponent
  - průmyslové aplikace - kompenzace aberace v mikroskopech, optické pinzety



# LCOS-SLM - optický fázový modulátor

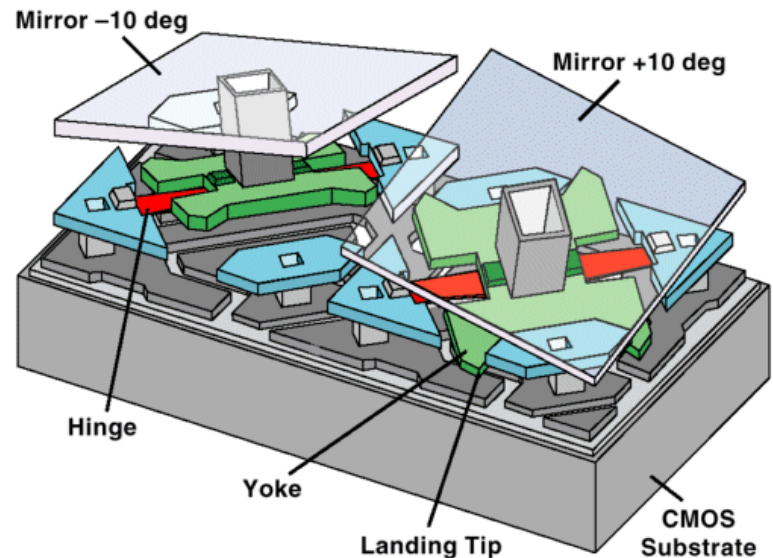
Part no.		Product name		Number of pixel		Readout light wavelength		Light utilization efficiency		Rise time		Fall time	
↑↓ Sort	☰ Filter	↑↓ Sort	☰ Filter	↑↓ Sort	☰ Filter	↑↓ Sort	☰ Filter	↑↓ Sort	☰ Filter	↑↓ Sort	☰ Filter	↑↓ Sort	☰ Filter
X15213-01		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		400 to 700 nm		79 %		5 (633 nm) ms		25 (633 nm) ms	
X15213-02		LCOS-SLM (Optical Phase Modulator)		1272 x 1024 pixels		800 ± 50 nm		97 %		30 (785 nm) ms		80 (785 nm) ms	
X15213-02L		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		800 ± 50 nm		97 %		30 (785 nm) ms		80 (785 nm) ms	
X15213-02R		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		800 ± 50 nm		97 %		30 (785 nm) ms		80 (785 nm) ms	
X15213-03		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		1050 ± 50 nm		97 %		25 (1064 nm) ms		80 (1064 nm) ms	
X15213-03L		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		1050 ± 50 nm		97 %		25 (1064 nm) ms		80 (1064 nm) ms	
X15213-03R		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		1050 ± 50 nm		97 %		25 (1064 nm) ms		80 (1064 nm) ms	
X15213-05		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		410 ± 10 nm		97 %		10 (45 nm) ms		20 (405 nm) ms	
X15213-07		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		620 to 1100 nm		82 %		10 (1064 nm) ms		80 (1064 nm) ms	
X15213-08		LCOS-SLM (optical phase modulator)		1272 x 1024 pixels		1000 to 1550 nm		82 %		30 (1064 nm) ms		140 (1064 nm) ms	

[https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-components/lcos-slm/for\\_research\\_and\\_development\\_applications/lcos-slm/index.html](https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-components/lcos-slm/for_research_and_development_applications/lcos-slm/index.html)



# DMD čip

- MEMS prvek
- matice překlápitelných mikrozrcátek
- vysoká rychlost překlápění
- pouze dva stavy ON a OFF
- naklonění typicky  $+12^\circ$  a  $-12^\circ$
- zrcátka jsou uložena na skrutných závěsech
- jejich natočení je řízeno velikostí elektrického pole
- modlace amplitudy vlny, tvorba difrakčních mřížek, strukturované osvětlení
- oproti SLM levné



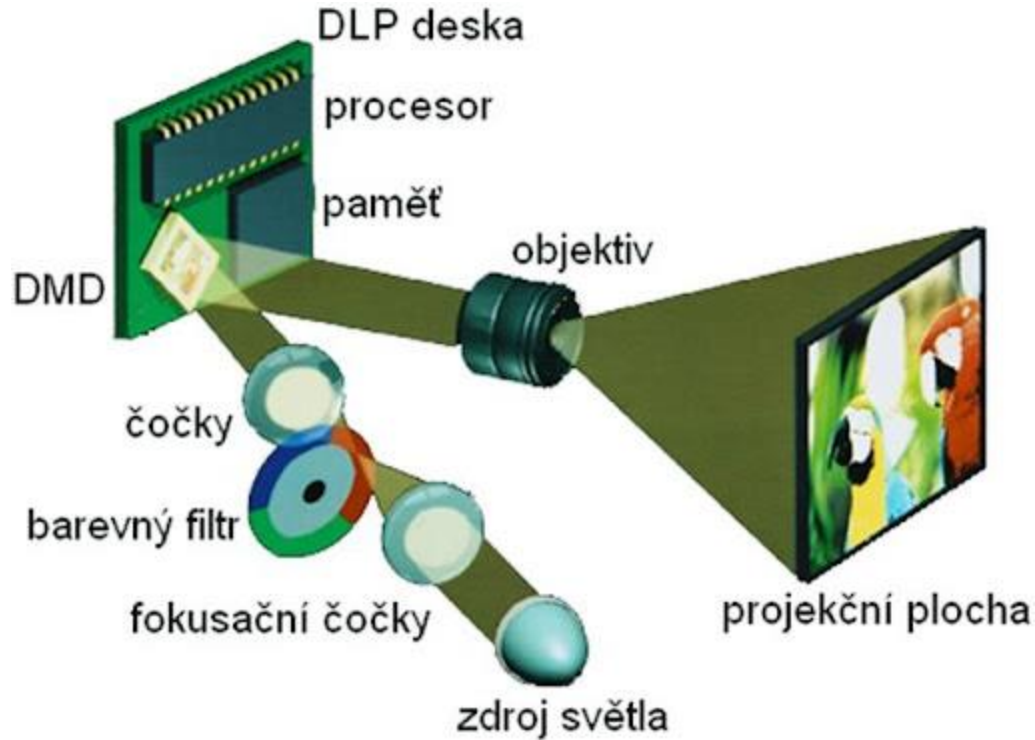
# Digital Light Processing - DMD čip

- DLP9000X
  - Wavelength Range- 400-700 nm
  - Micromirror Array Size- 2560 x 1600
  - Display Resolution- WQXGA
  - Micromirror Array Diagonal- 0.9 inches
  - Micromirror Pixel Pitch- 7.6  $\mu\text{m}$
- High speed patterns using the native DLPC900 - driver
  - Up to 9,523 Hz binary pattern rate
  - Up to 247 Hz 8-bit grayscale pattern rate
- 2 Configurable I/O trigger for synchronizing with cameras, sensors, etc
- USB 1.1, HDMI and I2C interfaces



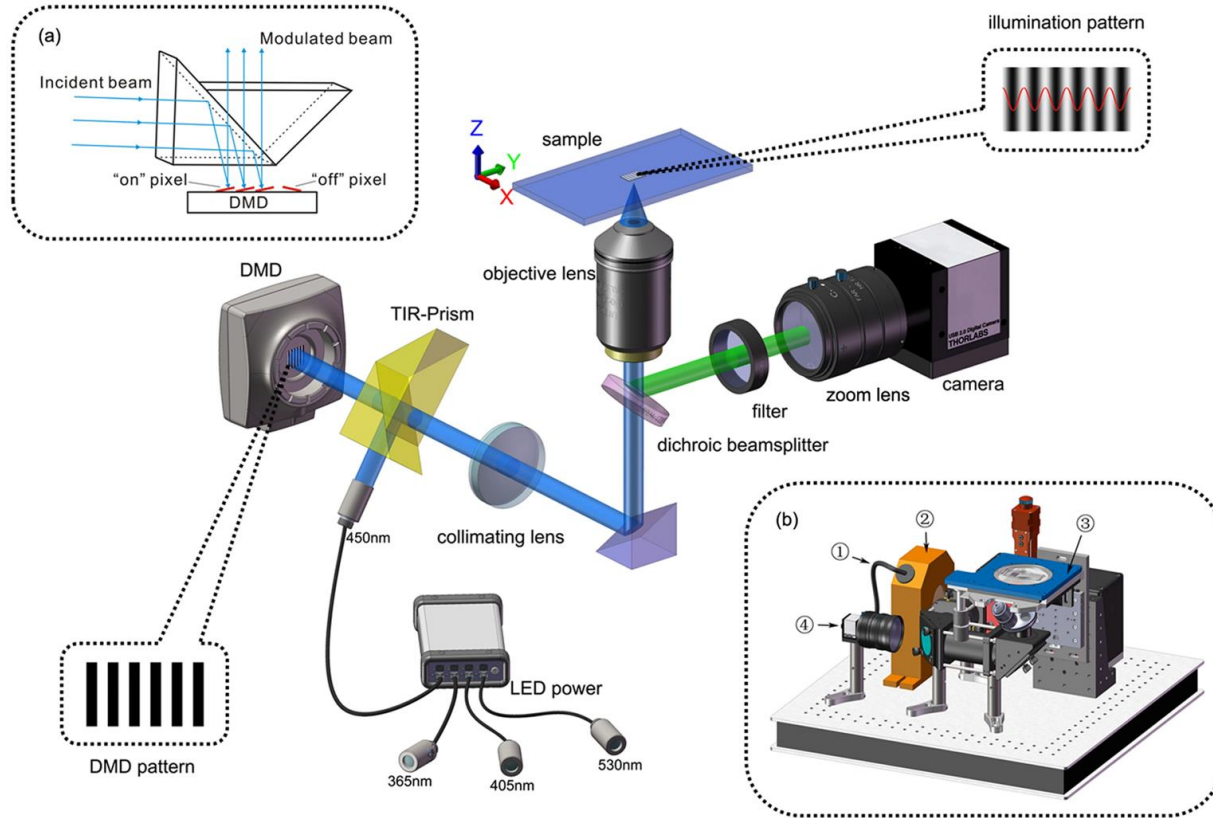
<https://www.ti.com/store/ti/en/p/product/?p=DLPLCR9000EVM>

# Digital Light Processing - DMD čip



původní účel - projektory

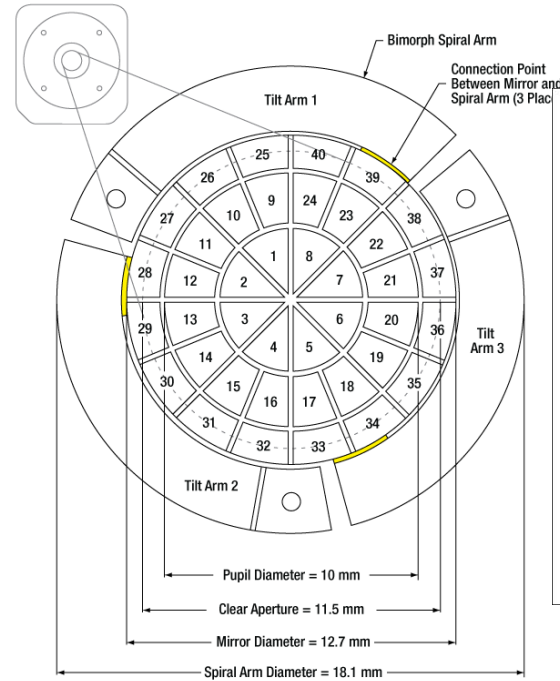
# DMD čip



<https://doi.org/10.1038/srep01116>

# deformovatelné zrcadlo

- na kruhový piezokeramický kotouč je přilepen tenký skleněný kotouček s hliníkovým nebo stříbrným povlakem
- zrcadlo je prohýbáno 40ti piezo-segментy
- každý segment je řízen nezávisle pomocí kladného napětí
- povrch je navržen tak, aby byl plochý, když je na každou elektrodu aplikována polovina maximálního napětí
- nižší napětí na elektrodě - lokálně konkávní tvar zrcadla
- vyšší napětí na elektrodě - lokálně konvexní tvar zrcadla
- pomocí tří mechanicky identických ramen lze zrcadlo naklonit v libovolném směru





# deformovatelné zrcadlo



[Zoom](#)

- ▶ 40-Actuator Array with 3 Bimorph Benders for  $\pm 2.0$  mrad Tip/Tilt Actuation
- ▶  $\varnothing 10.0$  mm Pupil,  $\varnothing 11.5$  mm Optical Aperture
- ▶ Two Metallic Mirror Coatings Available:
  - UV-Enhanced Aluminum (250 nm - 450 nm)
  - Protected Silver (450 nm - 20  $\mu\text{m}$ )

Our DMP40 series piezoelectric deformable mirrors are each comprised of 40 independently controlled actuators with either a UV-enhanced aluminum or protected silver reflective coating. The mirror includes three spiral bimorph bender arms which enable tip/tilt actuation of the coated surface.

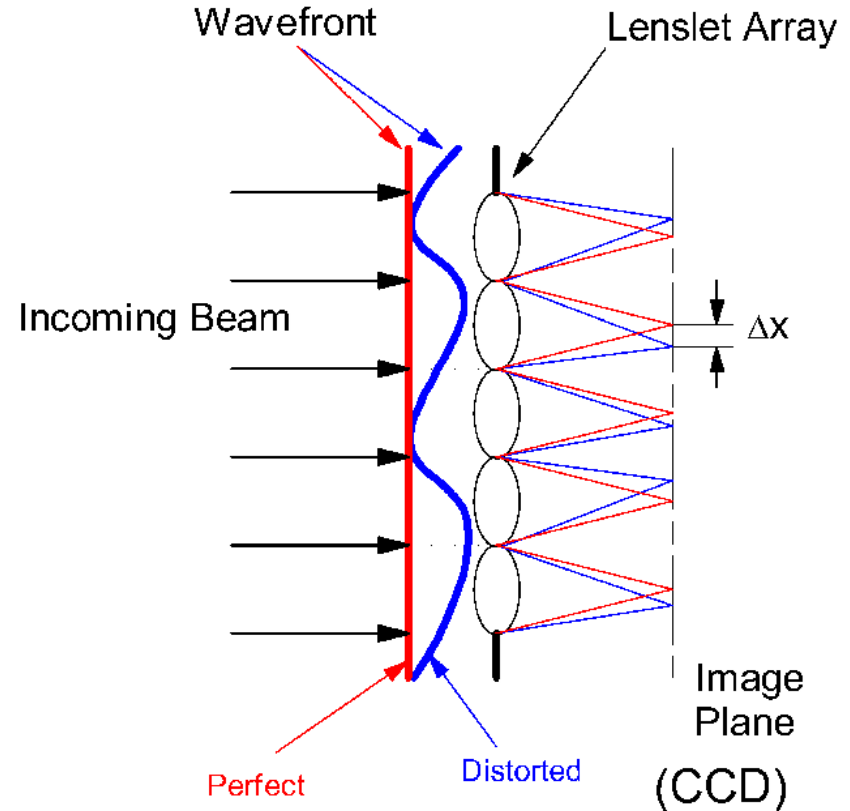
Physical Stroke <sup>a</sup>							
Aberration	Defocus	Astigmatism	Coma	Trefoil	Tetrafoil	Secondary Astigmatism	Third Order Spherical Aberration
Zernike Coefficient	$Z_5$	$Z_4, Z_6$	$Z_8, Z_9$	$Z_7, Z_{10}$	$Z_{11}, Z_{15}$	$Z_{12}, Z_{14}$	$Z_{13}$
Value	$\pm 6.5 \mu\text{m}^b$	$\pm 6.8 \mu\text{m}^b$	$\pm 2.5 \mu\text{m}^b$	$\pm 2.4 \mu\text{m}^b$	$\pm 2.1 \mu\text{m}^b$	$\pm 1.1 \mu\text{m}^b$	$\pm 1.0 \mu\text{m}^b$

- Maximum Peak-to-Valley (PV) stroke at mirror surface within the 10 mm pupil diameter. The wavefront amplitudes are twice as high. The defocus range may have a maximum asymmetry of 30%.
- Maximum correction for this aberration assuming that no other aberrations are corrected for at the same time. When more than one type of aberration is corrected for simultaneously, these numbers will decrease.

<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DMP40/M-F01>

# Shack-Hartmann senzor

- slouží k měření tvaru vlnoplochy vlny
- je složen z plošného senzoru (CMOS, CCD) a pole mikročoček
- mikročoky fokusují vlnu po částech
- poloha spotu reprezentuje sklon části vlnoplochy
- z polohy všech spotů se rekonstruuje tvar vlnoplochy
- kombinuje se často s deformovatelným zrcadlem -> on-line korekce vad (mikroskopie, astronomie)



# Shack-Hartmann senzor

Item # <sup>a</sup>	WFS30-5C	WFS30-7AR	WFS30-14AR
<b>Microlens Arrays</b>			
Wavelength Range	300 nm - 1100 nm	400 nm - 900 nm	
Free Aperture	11.5 mm x 7.5 mm		
Mask or Coating	Chrome Mask	Anti-Reflection Coating	
Reflectivity	<25%	<1%	
Lenslet Pitch	150 $\mu$ m	300 $\mu$ m	
Lenslet Grid Type	Square Grid		
Lens Shape <sup>b</sup>	Round, Plano-Convex Spherical	Square, Plano-Convex Parabolic	
Lens Size	$\varnothing$ 146 $\mu$ m	295 $\mu$ m x 295 $\mu$ m	
Fill Factor (Approximate) <sup>c</sup>	74.5%	100%	
Number of Active Lenslets	73 x 45 (Max), Software-Selectable Options	35 x 21 (Max), Software-Selectable Options	
Effective Focal Length (Typical, When Mounted in WFS)	4.1 mm	5.2 mm	14.6 mm
Nominal Focal Length	5.6 mm	14.2 mm	
Array Size	12 mm x 12 mm x 1.2 mm		
Substrate Material	Fused Silica (Quartz)		
<b>Camera</b>			
Sensor Type	CMOS		
Resolution	1936 x 1216 Pixels (Max), Software-Selectable Options		
Sensor Size, Max	11.34 mm x 7.13 mm		
Pixel Size	5.83 $\mu$ m x 5.83 $\mu$ m		
Shutter	Global <sup>d</sup>		
Exposure Range	33 $\mu$ s - 998 ms		
Image Digitization	8 Bit		
<b>Wavefront Measurement</b>			
Accuracy (at 633 nm) <sup>e</sup>	$\lambda$ /25 rms	$\lambda$ /40 rms	$\lambda$ /60 rms
Sensitivity (at 633 nm) <sup>f</sup>	$\lambda$ /80 rms	$\lambda$ /120 rms	$\lambda$ /200 rms
Dynamic Range (at 633 nm) <sup>g</sup>	>500 $\lambda$	>500 $\lambda$	>250 $\lambda$
Local Curvature <sup>h</sup>	>7.4 mm	>10.0 mm	>40.0 mm



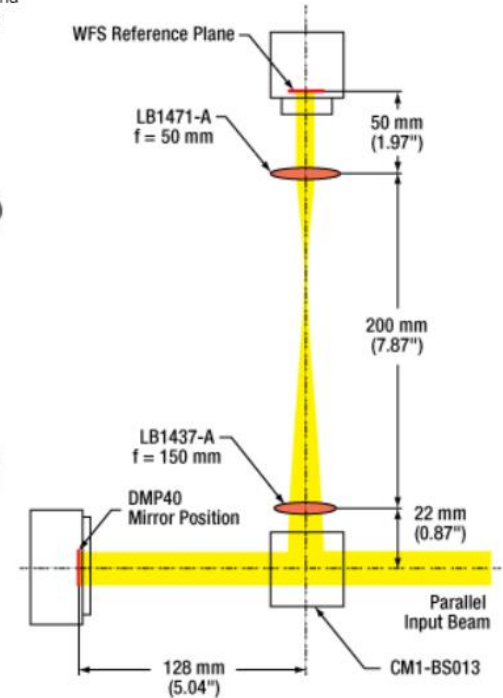
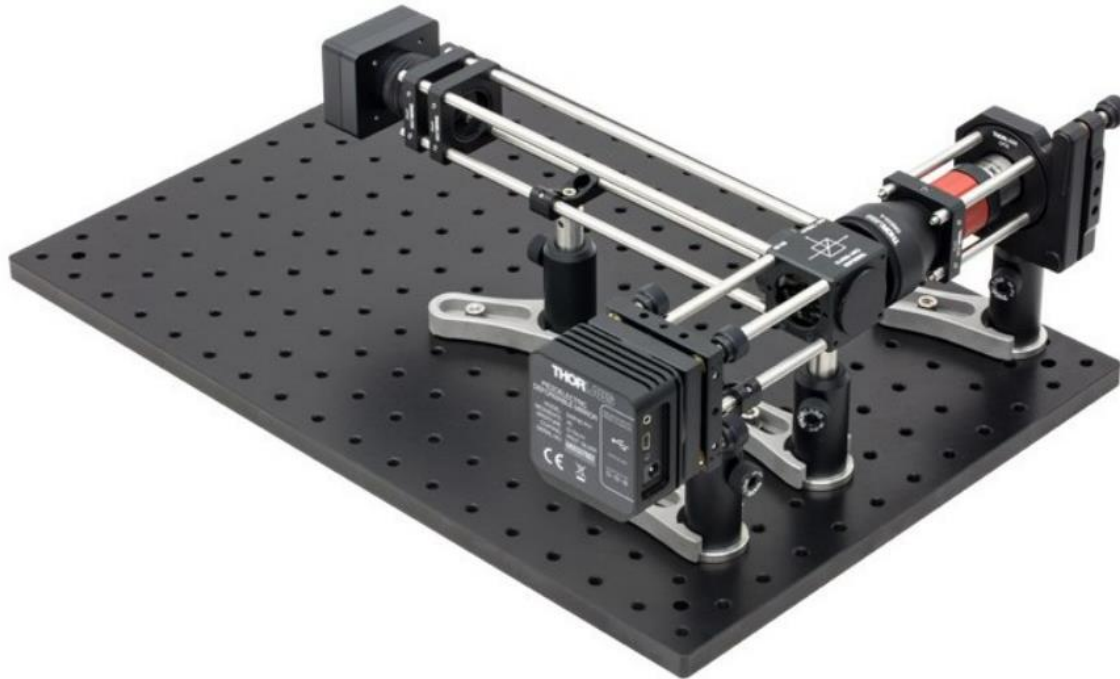
WFS30-14AR

[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=5287](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5287)

# Shack-Hartmann sensor + deformovatelné zrcadlo

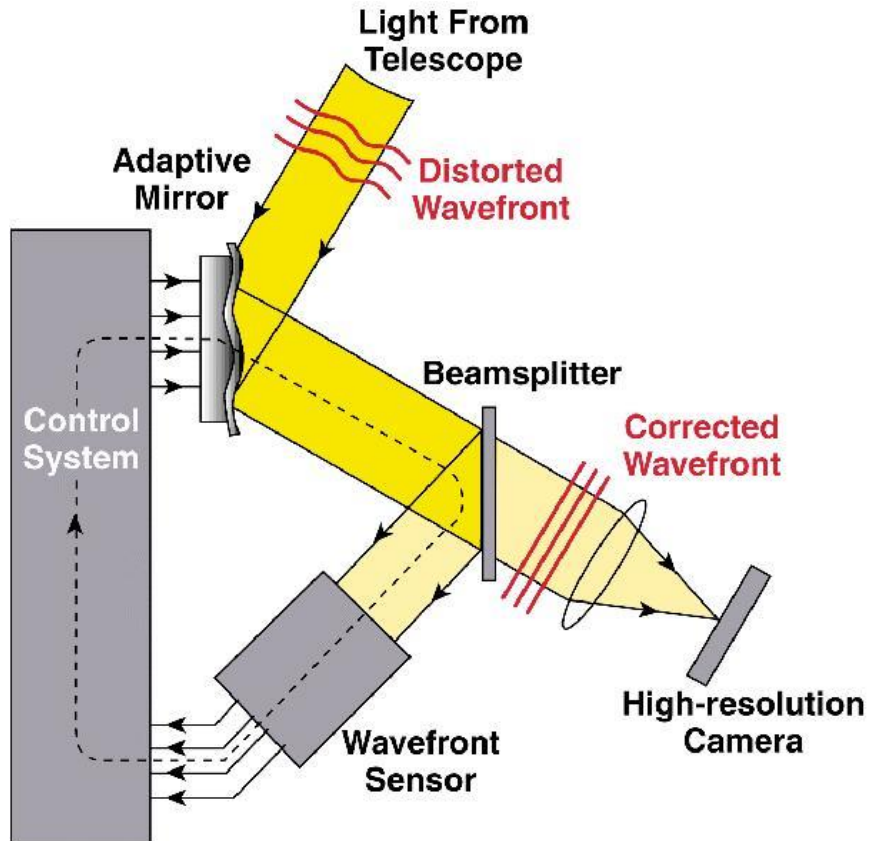
## DMP40-P01 Deformable Mirror with a Shack-Hartmann Wavefront Sensor

The sample setup below uses a Shack-Hartmann Wavefront Sensor (WFS) to measure the change in wavefront produced by a DMP40-P01 Deformable Mirror (DM). This setup was designed to help users familiarize themselves with the behavior of the DMP40 deformable mirrors, and not to provide a fully operational adaptive optics system. See the table for a list of the parts used in the system below. If you hover over a component in the image below, the corresponding item will be highlighted in the table below.

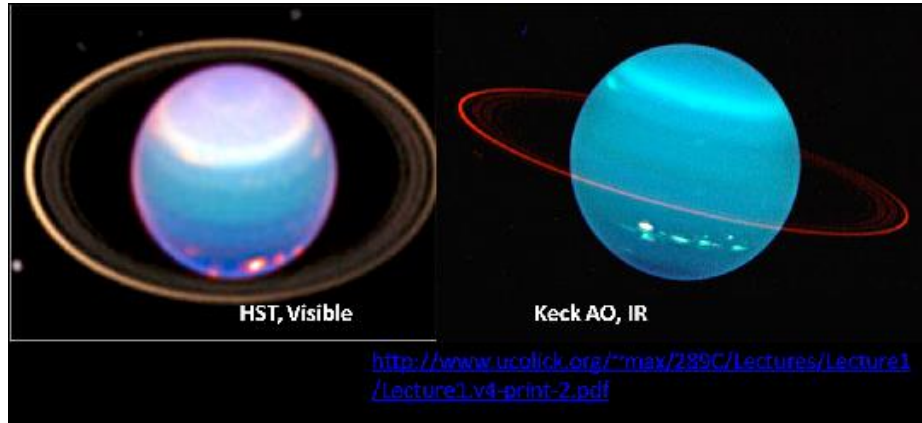


Simplified Diagram of the AO System Shown to the Left

# Shack-Hartmann senzor + deformovatelné zrcadlo



Neptun



Hubble Space Telescope (HST), viditelné spektrum

pozemní teleskop s adaptivní optikou, IR spektrum

<https://laser.physics.sunysb.edu/~shannon/report/index.html>