

# DETEKTORY OPTICKÉHO ZÁŘENÍ

Ing. Luděk Kejzlar

ČVUT FEL K338

9.10.2001

## Dělení záření podle vlnových délek

Elektromagnetické záření se dělí podle vlnových délek na následující druhy. Jedná se o část elektromagnetického záření označovanou za optické záření.

<b>Ultrafialové 0,01</b>	-	<b>0,38 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>UV</b>
Vzdálené 0,01	-	0,2 $\mu\text{m}$	FUV
Střední 0,2	-	0,315 $\mu\text{m}$	MUV
Blízké 0,315	-	0,380 $\mu\text{m}$	NUV
<b>Viditelné 0,38</b>	-	<b>0,75 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>VIS</b>
<b>Infračervené 0,75</b>	-	<b>1000 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>IR</b>
Blízké 0,75	-	1,4 $\mu\text{m}$	NIR
Střední 1,4	-	3 $\mu\text{m}$	MIR
Vzdálené 3	-	1000 $\mu\text{m}$	FIR

## Principy detekce záření

### 1) Pohlcení fotonů záření v materiálu a generování nosičů (elektronů)

Absorbce záření v materiálu detektoru dojde k uvolnění nosiče náboje (elektronu) a ten je poté detekován. Pro absorpci existují omezení. Omezení z IR strany spektra je že energie záření musí být tak velká aby umožnila přejít nosičům z valenčního do vodivostního pásu. A omezení z UV strany spektra je, aby se záření dostalo do objemu materiálu kde může být pohlceno.

Fotoemisivní detektory, ke generování fotoelektronu dochází ve vakuu nebo plynu.

- *Vakuové fotodiody (fotonky)*
- *Plynová fotonka*. Fotonka je součástka založená na využití vnějšího fotoelektrického jevu. Je tvořena baňkou, v níž je fotokatoda a anoda. Fotonky jsou vakuové nebo plněné plynem o nízkém tlaku. [Ve](#) fotonkách se elektrony uvolněné z fotokatody po dopadu fotonů pohybují k anodě účinkem přiloženého napětí. Je-li fotonka plněná plynem, elektrony cestou ionizují jeho molekuly, takže na anodu dopadne větší počet elektronů, než byl uvolněn z katody.

Pevnolátkové detektory, kde je vzniklý náboj přenášen pomocí děr nebo elektronů.

- *Fotoodporový mód*. Generování páru elektron-díra způsobí změnu vodivosti polovodiče.
- *Přechod P-N*. PN přechod odděluje páry elektron-díra a generuje napětí nebo proud. V polovodiči je vytvořen PN přechod a napětí (proud) se odvádí pomocí elektrod. Většinou se využívá PN přechod polarizovaný v závěrném směru.
- *PIN diody*. P-I-N přechod. Dovoluje vyšší frekvence (na menší kapacitu).
- *Lavinová fotodioda*. Při detekci fotonu dojde k lavinovému generování náboje. Mají velkou citlivost a velkou pracovní frekvenci.
- *CCD struktura*. Generují se elektrony (náboj) které se přenáší strukturou a poté se převádějí na napětí.
- *CMOS* jako CCD jiný způsob čtení informace. Způsob čtení jako u RAM.
- *NMOS*
- *CIS* kontaktní CCD.

### 2) Změna vlastností materiálu při ozáření

Absorbce záření v materiálu detektoru se změni vlastnost materiálu. Tato změna je vyhodnocena elektronicky. Jedná se o měření tepelných účinků optického záření.

- *Změna odporu* - Boolometry (kovy), Termistory (polovodiče)
- *Termoelektrický efekt* - Termočlánky
- *Elektrická polarizace* - Pyroelektrické detektory

**Parametry komerčně dostupných detektorů**

Typ Detektoru	Spektrální citlivost	Převodní konstanta	NEP (W / $\sqrt{\text{Hz}}$ )	Frekvenční odezva
<b>Teplotní detektory</b>				
Bolometr Si	1,6 – 5000 $\mu\text{m}$	$10^5 - 10^8$ V/W	$3 \cdot 10^{-16}$	DC – 1 kHz
Kalorimetr	0,25 – 35 $\mu\text{m}$	0,1 V/W	$10^{-5} - 10^{-2}$	0,001 – 0,2 Hz
Pyro-elektrický, LiTaO <sub>3</sub>	0,01 – 1000 $\mu\text{m}$	0,25 $\mu\text{A/W}$	-	1 k – 100 Mhz
Thermopile	0,2 – 35 $\mu\text{m}$	do 50 V/W	-	5 – 10 Hz
<b>Fotoemisivní detektory</b>				
Fotonásobič	0,2 – 1,1 $\mu\text{m}$	0,9 A/W	-	DC – 1 GHz
Vakuová fotodioda	0,2 – 1,1 $\mu\text{m}$	0,001 A/W	-	DC – 1GHz
<b>Kvantové detektory</b>				
Germanium, PIN	0,5 – 1,8 $\mu\text{m}$	0,7 – 0,9 A/W	$3 \cdot 10^{-13}$	DC – 3,5 GHz
Germanium, fotooporový	0,5 – 1,8 $\mu\text{m}$	0,15 – 1 A/W	$1 \cdot 10^{-13}$	DC – 50 MHz
Germanium, lavinová	0,5 – 1,8 $\mu\text{m}$	0,2 A/W	$3 \cdot 10^{-10}$	DC – 2 GHz
InGaAs, PIN	1 – 1,7 $\mu\text{m}$	0,6 – 0,9 A/W	$1 \cdot 10^{-14}$	DC – 1,2 GHz
InGaAs, lavinová	0,9 – 1,7 $\mu\text{m}$	0,8 A/W	$2 \cdot 10^{-13}$	DC – 1 GHz
PbS, fotooporový	1 – 3 $\mu\text{m}$	0,1 – 0,2 A/W	$1,5 \cdot 10^{-11}$	0,2 – 0,8kHz
HgCdTe, fotooporový	2 – 20 $\mu\text{m}$	0,002 – 5 A/W	$5 \cdot 10^{-12}$	DC – 400 MHz
HgCdTe, fotovoltajický	8 – 20 $\mu\text{m}$	5 A/W	$5 \cdot 10^{-16}$	DC – 30 MHz
Křemík, PIN	0,2 – 1,1 $\mu\text{m}$	0,6 A/W	$1 \cdot 10^{-16}$	DC – 2 GHz
Křemík, lavinová	0,4 – 1,1 $\mu\text{m}$	do 120 A/W	$8 \cdot 10^{-15}$	DC – 2 GHz
Křemík, fotooporový	0,2 – 1,1 $\mu\text{m}$	0,1 – 0,6 A/W	$1 \cdot 10^{-14}$	DC – 100 MHz

NEP -

## UV + Viditelné světlo

### Detektory viditelného záření

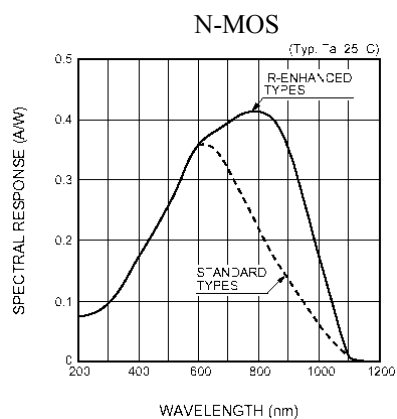
Detektor	Material	Spektrální citlivost	Poznámka
Fotodiody	<a href="#">Si</a>	0,4 - 1,1 $\mu\text{m}$	
Fotoodporová buňka	CdS	0,52 - 0,62 $\mu\text{m}$	
Fotodioda	$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$		<a href="#">Hamamatsu</a> <a href="#">s šířkou pásma do 42 GHz</a>
CCD		0,2 - 1,1 $\mu\text{m}$	
<a href="#">CMOS</a>	CMOS	0,2 - 1 $\mu\text{m}$	
CIS		0,2 - 1 $\mu\text{m}$	
Fotodiodová pole	Si	0,3 - 1,1 $\mu\text{m}$	až 46 pix. ( <a href="#">S4111</a> )
PMT Array	Bialkalická katoda	0,185 - 0,65 $\mu\text{m}$	až 32 pix ( <a href="#">H7260</a> )
N-MOS řádkový senzor	NMOS	0,36 - 1 $\mu\text{m}$	až 1024 pix ( <a href="#">S3904</a> )

Existují i fotocitlivá skla, kde se mění relativní index lomu v závislosti na vynucené fototermální krystalizaci ([Photothermally induced crystallization](#))

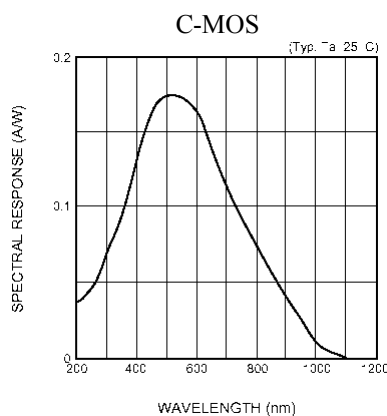
### UV Detektory

Detektor	Material	Spektrální citlivost	Poznámka
Photoconductive Detektor	<a href="#">GaN</a>	0,2 - 0,35 $\mu\text{m}$	
Photoconductive Detektor	<a href="#">AlGaN</a>	0,2 - 0,35 $\mu\text{m}$	

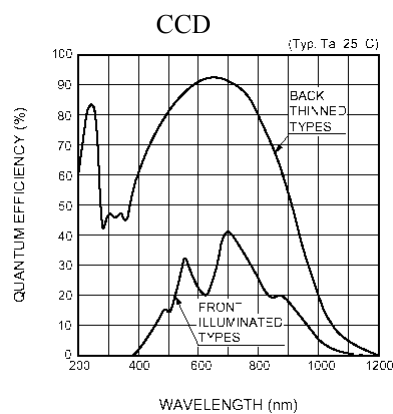
### Srovnání spektrálních citlivostí jednotlivých snímačů



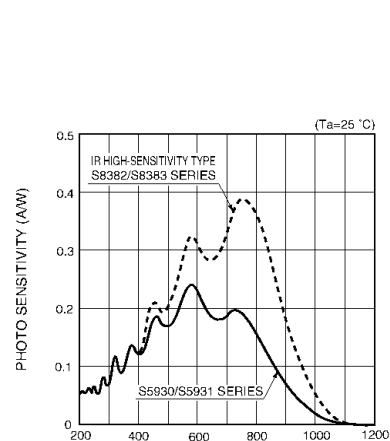
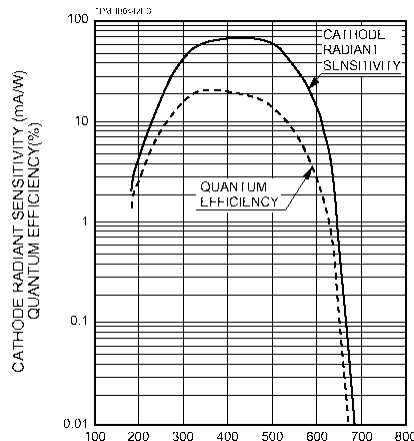
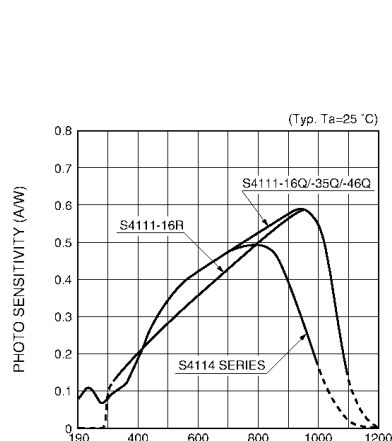
[Fotodiodová pole](#)



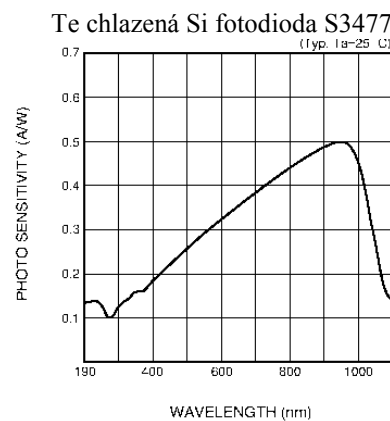
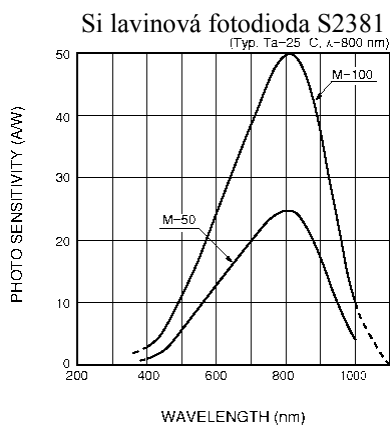
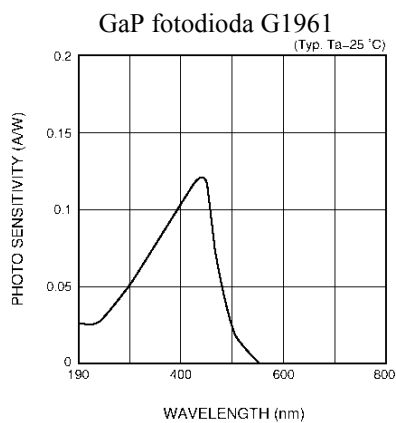
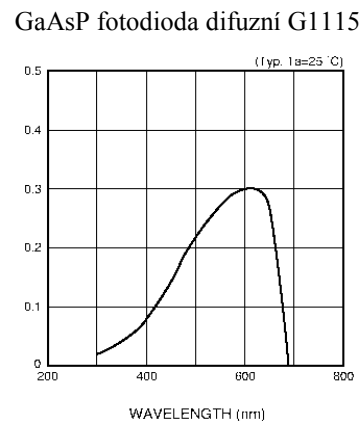
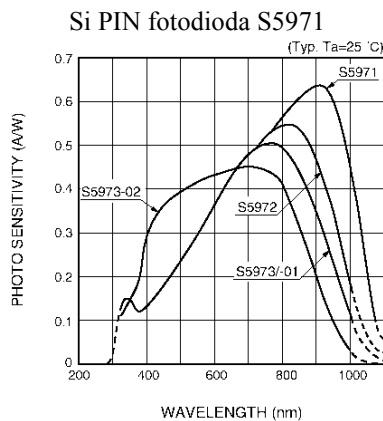
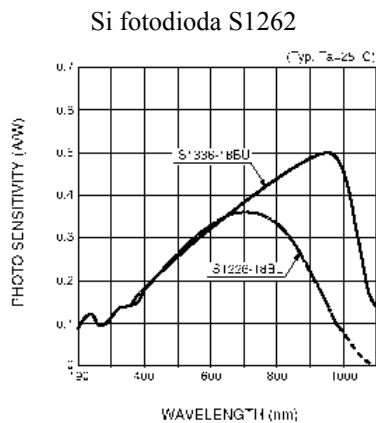
[PMT Arrays](#)



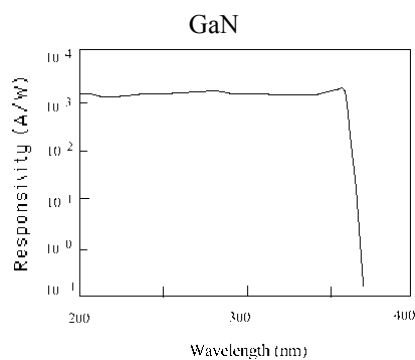
[N-MOS 0,2 - 1  \$\mu\text{m}\$](#)



[Hamamatsu](#) Fotodiody Si 0,32 – 1,10  $\mu\text{m}$  , Si PIN 0,32 – 1,06  $\mu\text{m}$  , GaP 0,19 – 0,55  $\mu\text{m}$  , GaAsP 0,276 – 0,76  $\mu\text{m}$   
diodová pole Si 0,19 – 1,1  $\mu\text{m}$



Grafy spektrálních citlivostí pochází z PDF firmy [Hamamatsu](#)



## Infračervená oblast a Daleká infračervená oblast ( IR a Far IR )

### Dryhy detektorů

#### Teplotní detektory 8 - 14 $\mu\text{m}$

Pracují na principu ovlivňování různých fyzikálních (elektrických) vlastností materiálů teplem. Elektromagnetické záření se v těchto detektorech mění na teplo.

- Změna odporu v polovodiči = Termistory
- Změna odporu v kovech = Bolometry
- Termoelektrický efekt = Termočlánky
- Elektrická polarizace = Pyroelektrické detektory
- výhody - velká a stejná odezva v celém spektru
- nevýhody - malá citlivost
- velmi pomalá frekvenční odezva ( $1 - 10^{-3}\text{s}$ )

#### Kvantové detektory

Využívají přechodu nosičů mezi energetickými hladinami materiálu. Energie záření  $h\nu$  musí být srovnatelná s energetickým rozdílem hladin (valenčního a vodivostního pásu). Jsou založeny na kvantových jevech.

- Vlastní fotoodporový detektor (Photoconductive Intrinsic Detector) (PC)  
vyžaduje  $h\nu > E_g \Rightarrow \lambda_c = h\nu / E_g \Rightarrow$  detekuje  $\lambda \leq \lambda_c$ .  $E_g$  - Energie potřebná pro přechod do vodivého pásu z valenčního
- Nevlastní fotoodporový detektor (Photoconductive Extrinsic Detector) {Si, Ge}  
musí pracovat při nízkých teplotách ( $< 77\text{K}$ )
- Blocked Impurity Detector (BIB)  
funguje okolo 20  $\mu\text{m}$  při použití Si: As (10K) funguje okolo 15  $\mu\text{m}$
- Fotoelektromagnetický detektor (Photoelectromagnetic Detector) (PEM)  
může pracovat při pokojové teplotě
- Fotovoltaický detektor (PV) nebo Fotodiodový p-n přechod, PIN lavinová fotodioda (APD), kov - polovodič, kov - izolant - polovodič
- Photoemissiv Detector and Schottky Barrier Detector (BSD)  
fotoemise z katody je používána v blízké IR fotony musí mít energii  $\phi_{\text{ms}} < h\nu < E_g$ ,  $\phi_{\text{ms}}$  - bariérový potenciál

#### Vlastní Detektory

Jsou založeny na ovlivňování různých fyzikálních vlastností materiálů teplem, které je přijímáno jako záření. Změny těchto vlastností se poté elektronicky měří.

- Free Carrier Detector { InSb }
- Photon Drag Detector { Ge rod }  
při délkách 10,6  $\mu\text{m}$ , je velmi rychlý, pracuje při pokojových teplotách a používá se an monitorování laseru.
- Photochemical Detector  
stříbro halogenidové krystaly (silver halogenide crystals) se dají upravit pro blízký IR
- Photoakustic Detector  
používají převod modulovaného IR na tlakové vlny media ( plyn, tekutina, pevná látka )  
Vyrábí : Aritron, Siemens ( prodává )

Poznámka : U většiny detektorů v oblasti Far IR je potřeba chlazení detektorů na nízké teploty.

### IR Detektory

Detektor	Materiál	Spektrální citlivost	Poznámka
Fotodiody	Ge	0,8 – 1,8 $\mu\text{m}$	
Fotodiody	<a href="#">InGaAs/InP</a>	0,7 – 2,6 $\mu\text{m}$	
InGaAs řádkový senzor	InGaAs	0,9 - 2,55 $\mu\text{m}$	až 512 pix ( <a href="#">G8180</a> )
NIR senzor	QUIP	0.8 $\mu\text{m}$	<a href="#">Photonic</a>

**Řádkové a Plošné IR snímače**

Detektor	Formát	Poznámka	Spektrální citlivost	Materiál
2793 Honeywell	32 x 64		3,8 $\mu\text{m}$	PtSi
LF CCD2447	512 x 488	31.5 $\mu\text{m}$ x 25 $\mu\text{m}$	3 - 5 $\mu\text{m}$ $t_{\text{provoz}} = 77\text{K}$	PtSi ( CCD )
<a href="#">ZEISS</a>	384 x 288		3 - 5 $\mu\text{m}$	<a href="#">InSb</a>
<a href="#">ZEISS</a>	640 x 512		8 - 9,5 $\mu\text{m}$	<a href="#">GaAs</a>
<a href="#">ZEISS</a>	640 x 512		8 - 9,5 $\mu\text{m}$	QUIP
<a href="#">ZEISS</a>	256 x 256		3 - 5 $\mu\text{m}$	<a href="#">PtSi</a>
<a href="#">ZEISS</a>	320 x 240		7,5 - 13,5 $\mu\text{m}$	<a href="#">Uncooled ferroelectrical</a>
<a href="#">ZEISS</a>	567 x 7	(TDI)	7,5 - 10,5 $\mu\text{m}$	<a href="#">HgCdTe</a>
<a href="#">Sofradir</a>	384 x 288		8 - 9 $\mu\text{m}$	<a href="#">QWIP</a>
<a href="#">Sofradir</a>	640 x 480	(MCT, IRCMOS)	3 - 5 $\mu\text{m}$	<a href="#">HgCdTe</a>
<a href="#">Sofradir</a>	288 x 4	(MCT, IRCMOS)	8 - 12 $\mu\text{m}$	<a href="#">HgCdTe</a>
<a href="#">Sofradir</a>	1500 x 1	(Mikrobolometr)	2 - 14 $\mu\text{m}$	<a href="#">HgCdTe</a>
<a href="#">Sofradir</a>	320 x 240	(Mikrobolometr)	8 - 16 $\mu\text{m}$	<a href="#">a:Si</a>

Poznámka :

V řadě CCD244x se dělají CCD snímače použité v kameře CCD6003 fy. Loral Fairchil Imaging Sensors chlazené LN2 dewars nebo String cycle cryocooler na požádání i Joule Thompson cryostats.

**IR Kamery**

IR detektory HgCdTe, PtSi ...	-	<a href="http://www.zeiss-optronik.de/uk/212242.html">http://www.zeiss-optronik.de/uk/212242.html</a>	
PtSi Schottky-Barrier	-	<a href="http://www.codam.it/s270.htm">http://www.codam.it/s270.htm</a>	
IR technologie	-	<a href="http://www.sofradir.com/">http://www.sofradir.com/</a>	Sofradir

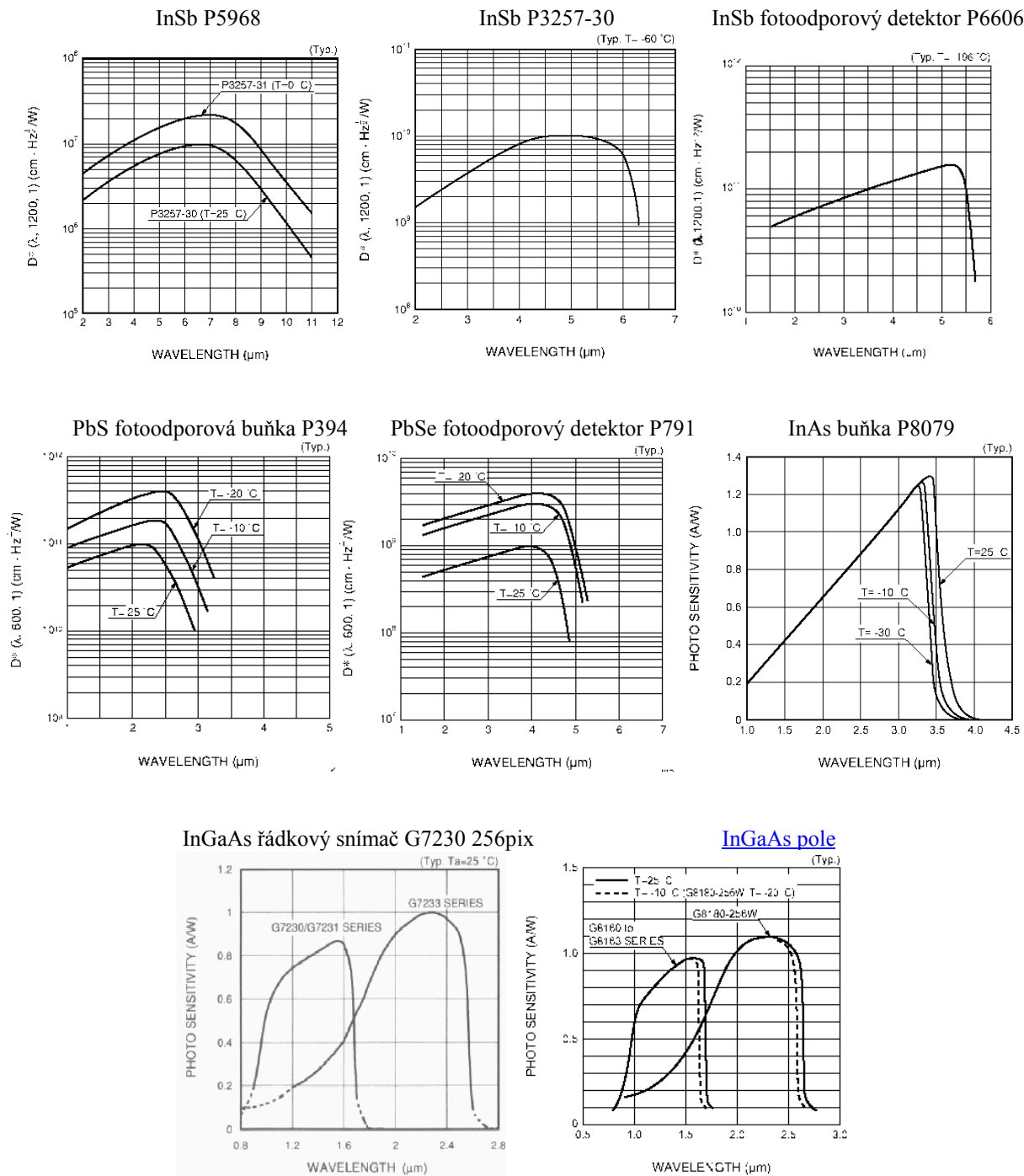
**Materiály používané pro IR senzory**

Blízká IR	( 2 - 3 $\mu\text{m}$ )	PbS (2,2 - 2,9 [3,2]) <i>Výrobci</i> : SAT, Optoelectronics Pd <sub>2</sub> Si/Si(3) <a href="#">Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te</a> , $x > 0,4$	In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> As/InP, $x \sim 0,75$ (2,2)
Střední IR	( 3 - 5 $\mu\text{m}$ )	InAs ( 1 - 3,1 ) PbSe (3,8 - 4,8 [5,1]) PbTe (3,9) <i>Výrobci</i> : Elettronica InSb (1 - 5,5/-60°C) <i>Výrobci</i> : SAT, Cincinnati, Raytheon, <a href="#">Hamamatsu</a> , Sumitomo, G.E. <a href="#">Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te</a> , $x \sim 0,3$ <i>Výrobci</i> : SAT, Ford, Rockwell, CEA-LIR PtSi/Si (4,8) IrSi/Si (7)	<a href="#">Hamamatsu</a> PbGeTe , AlGaAsSb, GaInAsSb, InPAsSb
Teplotní IR	( 8 - 12 $\mu\text{m}$ )	<a href="#">Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te</a> , $x \sim 0,2$ Pb <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> Te, $x \sim 0,2$ Si: In (8) G: Hg (14)	HgZnTe, HgMnTe Pb <sub>1-x</sub> Sn <sub>x</sub> Se, $x \sim 0,08$ AlGaAs MQW (8) InAsSb-InAs (12,5) InAs-GaSb, InAs-GaInSb, (Cd <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> ) <sub>3</sub> As <sub>2</sub> /GaAs
Vzdálená IR	( > 14 $\mu\text{m}$ )	Si: Ga (16) Si: Al (19) Si: Be (18) Si: As (24)	
Far IR		Si: Ga (17,5) Si: P (BIB type) Ge: Be (55) Ge: Ga (111) Ge: Ga stressed (206)	

## Pyroelektrické detektory

Single kristas : Triglicwrine sulphate (TGS)  
 Organické filmy Polyvinylidene difluoride ( $\text{CH}_2 - \text{CF}_2$ )<sub>n</sub>(PVDF)  
 Keramiky  $\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x(\text{Zr}_y\text{Ti}_{1-y})_{1-z}\text{Mn}_z\text{O}_3$ ,  
 $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-Pb}_2\text{FeNbO}_6\text{-UO}_3$  (PZFTNU)  
 Výrobci : Plessey, Matsuhita, Philips

- čísla v kulatých závorkách znamenají detekovanou vlnovou délku v  $\mu\text{m}$
- čísla v hranatých závorkách jsou maxima, většinou při chlazení  $-20^\circ\text{C}$

**Srovnání spektrálních citlivostí jednotlivých snímačů (materiálů)**

Grafy spektrálních citlivostí pochází z PDF firmy [Hamamatsu](http://www.hamamatsu.com)

## Detekce fotonů

Používají se senzory s fotokatodou, která je umístěna za okínkem z materiálu který je pro detekované vlnové délky transparentní. Fotokatoda emituje elektron, který je urychlen (násoben pomocí MCP) a posléze detekován. Pro detekci se používají polohově citlivé detektory.

- Poměrně často se zesílený obraz elektronu převádí opět na světelné záření pomocí Proximity-focussed phosphor screen (dynoda) umístěné za násobičem a potom je pro snímání použito buď CCD nebo pole diod ....
- Přímá diskretní detekce : se používá pole anod se zesilovači kde se poté detekuje snížení náboje. Systémy CODACON a Multi- Anode Microchannel plate Array ([MAMA](#)) až 1024 x 1024. *Vyrábí* : Timothy
- Přímá spojitá detekce : používá se odporových katod ( Něco jako Plošný PSD )  
 $E = h\nu - \Phi$ ,  $\Phi$  je energie potřebná k emitování elektronu z katody

Používají se dva druhy fotokatod : 1) Průhledné fotokatody (reflection) - fotoemise nastává z osvětlené strany  
 2) Transmission fotokatody (semi-transparent) - fotoemise nastává z opačné strany  
*Výrobce* : Henke

### Fotokatody

Druh fotokatody	Materiál	$\Phi$	Spektrální citlivost
Bialkalické fotokatody :	Na <sub>2</sub> KSb, K <sub>2</sub> CsSb	2 - 2,5 eV	200 - 550 nm
Multialkalické fotokatody :	Na <sub>2</sub> KSb: Cs	1,5 - 1,9 eV	200 - 750 nm
Polovodičové fotokatody :	GaAs: Cs-O, InGaAs : Cs-O	1,2 - 1,5 eV	200 - 1000 nm
Daleká UV citlivá katoda :	CsI	Výrobce : Timothy	115 - 170 nm
Blízká UV citlivá katoda :	Cs <sub>2</sub> Te		160 - 310 nm

### MAMA

MAMA je elektrodové dvourozměrné pole. Jsou to dvě skupiny podlouhlých elektrod, umístěných ve dvou vrstvách. Elektrody v první vrstvě jsou o 90° pootočené oproti elektrodám v druhé vrstvě. Svazek elektronů dopadajících na místo křížení elektrod vyvolá proud příslušnými elektrodami.

Tyto detektory jsou použity například na [HST](#) v přístroji [STIS](#)

Detektor	Formát	Rozměr pixelu	Spektrální citlivost	Materiál
<a href="#">FUV MAMA</a>	1024 x 1024	25 x 25 $\mu$ m	115 - 170 nm	CsI (katoda)
<a href="#">NUV MAMA</a>	1024 x 1024	25 x 25 $\mu$ m	160 - 310 nm	Cs <sub>2</sub> Te (katoda)
Observatoř <a href="#">SOHO</a> používá <a href="#">UVCS</a> , kde je jako detektor použit <a href="#">MAMA</a> s parametry				
MAMA	1024 x 360	25 x 25 $\mu$ m	50 - 130 nm	

### CODACON

CODACON je podobný systém jako MAMA ale je o něco starší. Je použit například na družici [CASSINI](#) ve spektrometru s parametry :

CODACON 56 - 118 nm a 110 - 190 nm

Na SOHO je použitý

[CODACON](#) 256 x 256, 128 x 128 17,1 ; 30,4 ; 121,6 nm

Používaly to družice ROSAT a EXOSAT

EUVE, EUVITA, ALEXIS, XMM satelity s nějakými výše uvedenými snímači

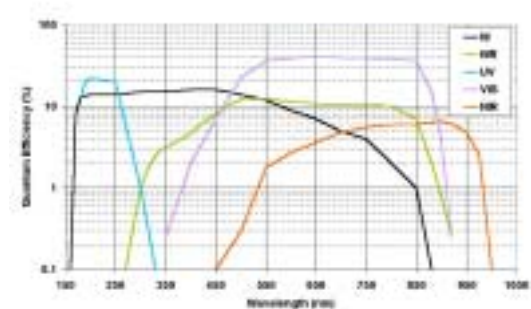
Možnosti : 5000 x 5000 na 10 x 10 cm, fcount ~ 1MHz,

### ICCD

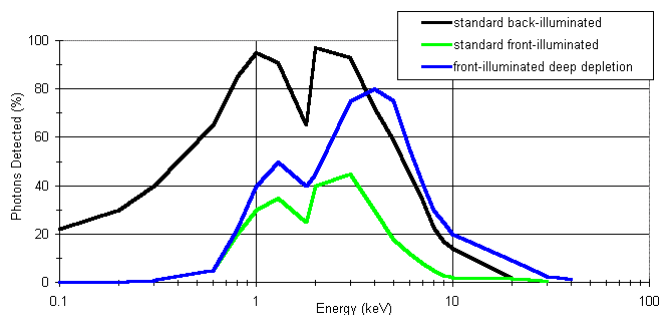
[ICCD](#) tj. CCD s převodem detekovaného záření prostřednictvím fotokatody. Dělají se v rozsahu 0,150 - 1  $\mu$ m. Tyto detektory jsou vhodné pro slabé záření viz. detekce fotonů. Spektrální citlivosti různých fotokatod jsou na obr. 1 a).

Detektor	Formát	Rozměr pixelu	Spektrální citlivost	Materiál	Výrobce
			250 - 400 nm		<a href="#">ANDOR</a>
Kamera	768x494		185 - 850 nm	P - 43	<a href="#">HAMAMATSU</a>
Kamera	768x494		370 - 920 nm	P - 34	<a href="#">HAMAMATSU</a>





a) Spektrální citlivost fotokatod



b) Spektrální citlivost CCD snímačů

obr. 1

## X-Ray

[Hamamatsu C6086 specifications](#)

### C7390 Linear X-ray Sensor

Pro detekci X-Ray paprsků se může používat přímo CCD snímač nebo Detekce fotonů. Přímě ozařovaný CCD snímač lze ho použít ve uspořádáních : **zepředu osvětlený**, **zezadu osvětlený** a **osvětlený zepředu s hlubokou vyprázdněnou oblastí**. Obrázek obr. 1 b) srovnává uvedené typy CCD snímačů. ( Obrázek pochází z webu [ANDOR TECHNOLOGY](#) )

## Zkratky

<a href="#">MCP</a>	-	MicroChanel Plate
PMT	-	Photomultiplier Tubes Arrays
Dynoda	-	Katoda se sekundární emisí
CCD	-	Charge Couple Device
ICCD	-	Intensified Charge Couple Device
UV	-	Ultra Vayolet
IR	-	Infra Red
MAMA	-	Multi- Anode Microchanel plate Array
<a href="#">HST</a>	-	Hubble Space Telescope

## Literatura

- [1] Sensors A Comprehensive Survey - W.Göpel, J. Hesse, J.N. Zeml - Volume 6 Optical Sensors E.Wagner, R. Dändiker, and K.Spenner - New York 1992 - str. 173 - 276
- [2] Loral Fairchild 1991 CCD Databook
- [3] [Electro-Optics Handbook - Burle](#)
- [4] Fundamentals of Optoelectronics – Clifford R. Pollock – USA - 1995  
- Photoconductor , PIN diode and Avalanche photodiode
- [5] Součástky moderní elektroniky - J. Fojt, L. Hudec - CVUT Praha -1996

WEBové stránky výrobců senzorů a detektorů, na které je v dokumentu odkazováno

## Doporučená literatura

- [1] [HANDBOOK SERIES ON SEMICONDUCTOR PARAMETERS](#)  
Vol. 1: Si, Ge, C (Diamond), GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb  
Vol. 2: Ternary and Quaternary III-V Compounds
- [2] [Materialy popis a teorie](#)