



OPTOELEKTRONIKA

DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

Dr.h.c. Prof.RNDr.Ing. Ján TURÁN, DrSc.

Department of Electronics and Multimedia Communications
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
University of Technology Košice, Letná 9, 042 00 Košice,
Slovakia

Tel. ++ 421 55 602 29 43, E-mail: jan.turan@tuke.sk

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.1 KLASIFIKÁCIA A PARAMETRE FOTODETEKTOROV

Detektor svetla (fotodetektor):

1. Tepelné detektory

- Termoelektrické detektory
- Bolometre
- Pneumatické detektory
- Pyroelektrické detektory

2. Fotonické detektory

A. Fotoemisívne detektory (využívajúce vonkajšiu fotoemisiu)

- Vákuové fotodetektory
- Fotonásobiče

B. Detektory využívajúce vnútornú fotoemisiu

- Objemové fotodetektory
 - fotovodivostné detektory
- Polovodičové fotodetektory s priechodom
 - **Fotodióda PN (PN – PD**
– Photodiode)
 - **Fotodióda PIN (PIN – PD**
– Positive Intrinsic Negative Photodiode)
 - **Lavínová fotodióda (APD**
– Avalanche Photodiode)
 - Fototranzistor
 - Fotodióda so Schottkyho bariérov
 - Nábojovo viazané štruktúry (**CCD** – Charge Coupled Devices)

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.1 KLASIFIKÁCIA A PARAMETRE FOTODETEKTOROV

- Energetické (tepelné) účinky
- Jav vonkajšej a vnútornej fotooemisie

Požiadavky na fotodetektory OVKS:

- Vysoká citlivosť
- Malé skreslenie
- Veľká elektrická odozva
- Krátka doba nábehu impulzu
- Vysoká teplotná stabilita
- Minimálny šum
- Malé rozmery
- Vysoká spoľahlivosť (10^5 až 10^6 hod.)
- Nízka cena

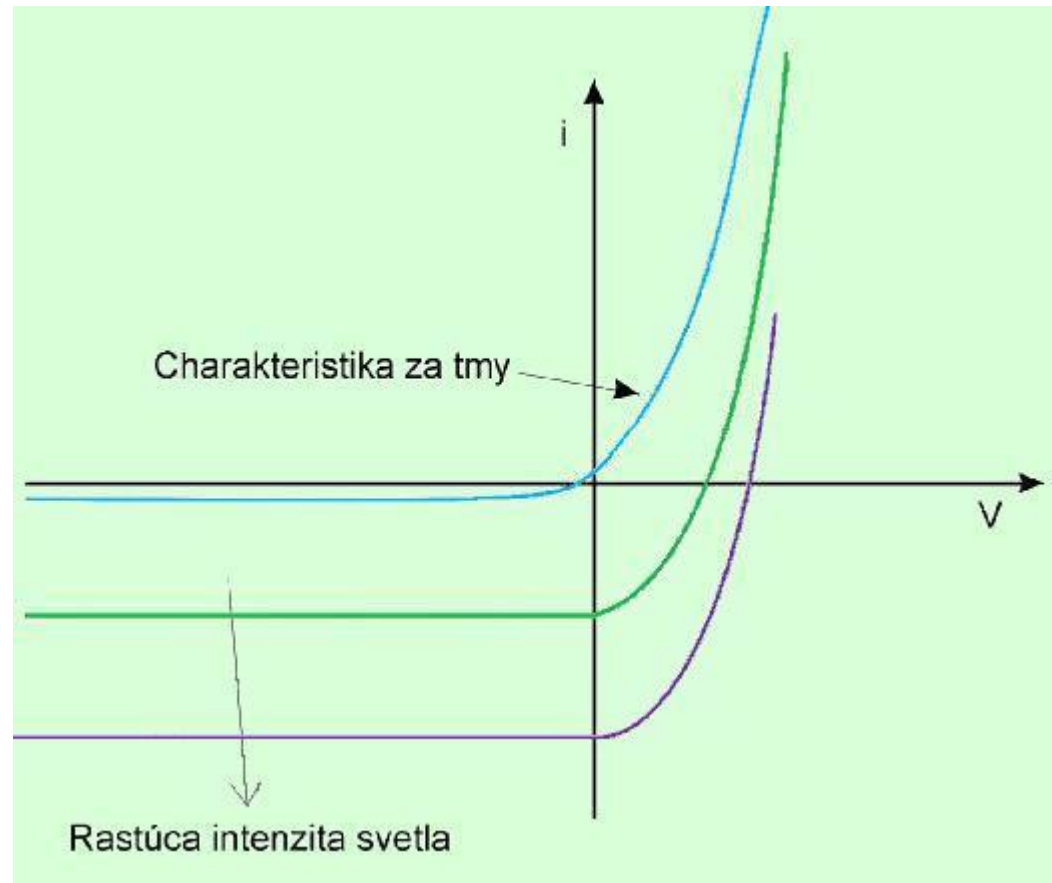
Vyhovujú:

- Fotodiódy PIN
- Lavínové fotodiódy - APD

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

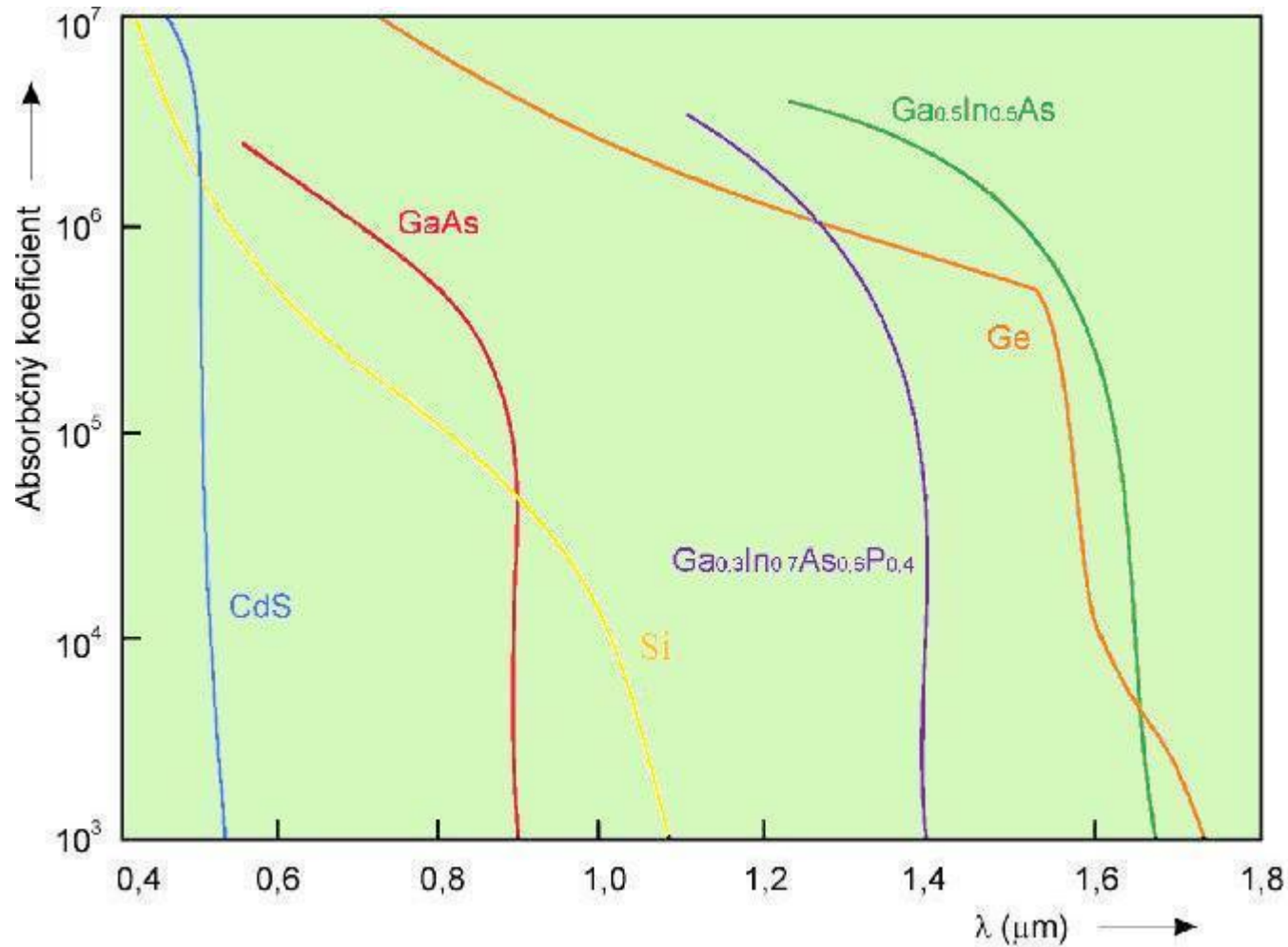
- Fotovoltaický mód – **Fotočlánok**
- Vyrábané: na báze Si s účinnosťou konverzie slnečného žiarenia na elektrický výkon až 15%
- Prúdové hustoty rádu 80 Am^{-2} pri napätí okolo 0,6 V
- **Fotovodivostný mód**



Obr. 6.1
Volt – ampérová charakteristika
fotočlánku na báze PN priechodu.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



Obr. 6.2 Absorbčné krivky základných polovodičových materiálov.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

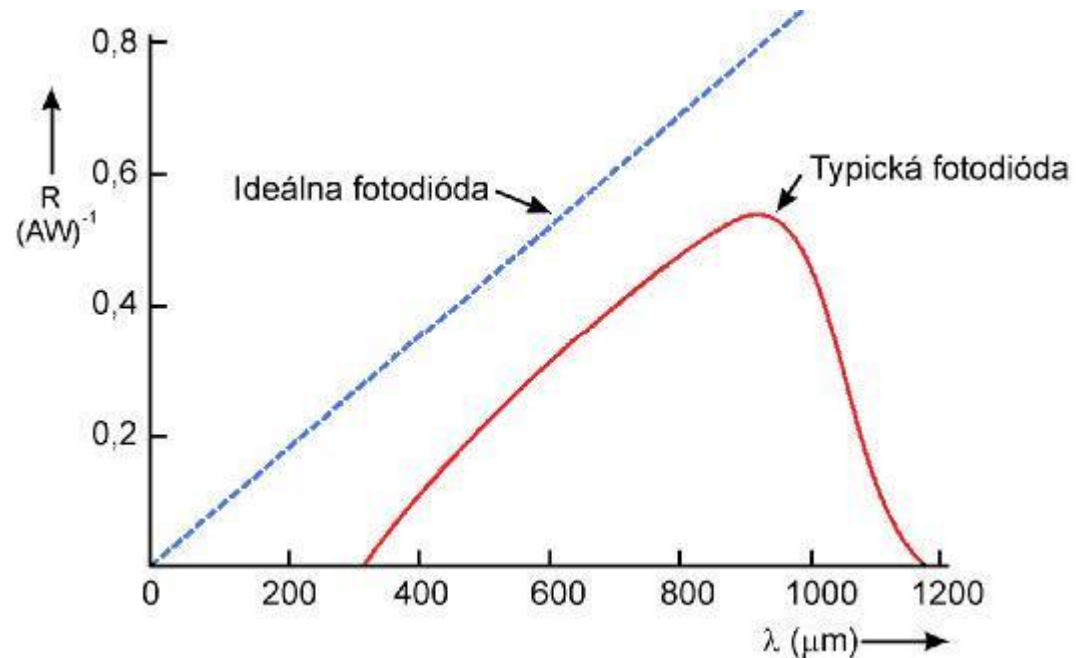
- Nepriama absorbcia
- Priama absorbcia
- Prúd za tmy

Kvantová účinnosť

$$\eta = \frac{r_e}{r_p}$$

Fotoprúd

$$I_p = \frac{P_o e(1-r)}{\hbar\omega} [1 - \exp(-\alpha_o d)]$$



Obr. 6.3
Závislosť citlivosti od vlnovej dĺžky
pre ideálnu a reálnu kremíkovú
fotodiódu.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

- **Citlivosť (odozva)** $R = \frac{I_p}{P_o}$
- **Výstupný fotoprúd** $I_p = \frac{\eta P_o e}{h\nu}$
- **Kvantová účinnosť fotodetektora** $R = \frac{\eta e}{h\nu}$
- Dosadením $\omega = 2\pi f = 2\pi c/\lambda$ dostaneme $R = \frac{\eta e \lambda}{hc}$
- **Kritická (medzná) vlnová dĺžka** $\lambda_c = \frac{hc}{E_g}$

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

- **Ekvivalentný šumový výkon** (**NEP** – Noise Equivalent Power)
- **Detektivita**

$$D = \frac{1}{NEP}$$

Normovaná hodnota

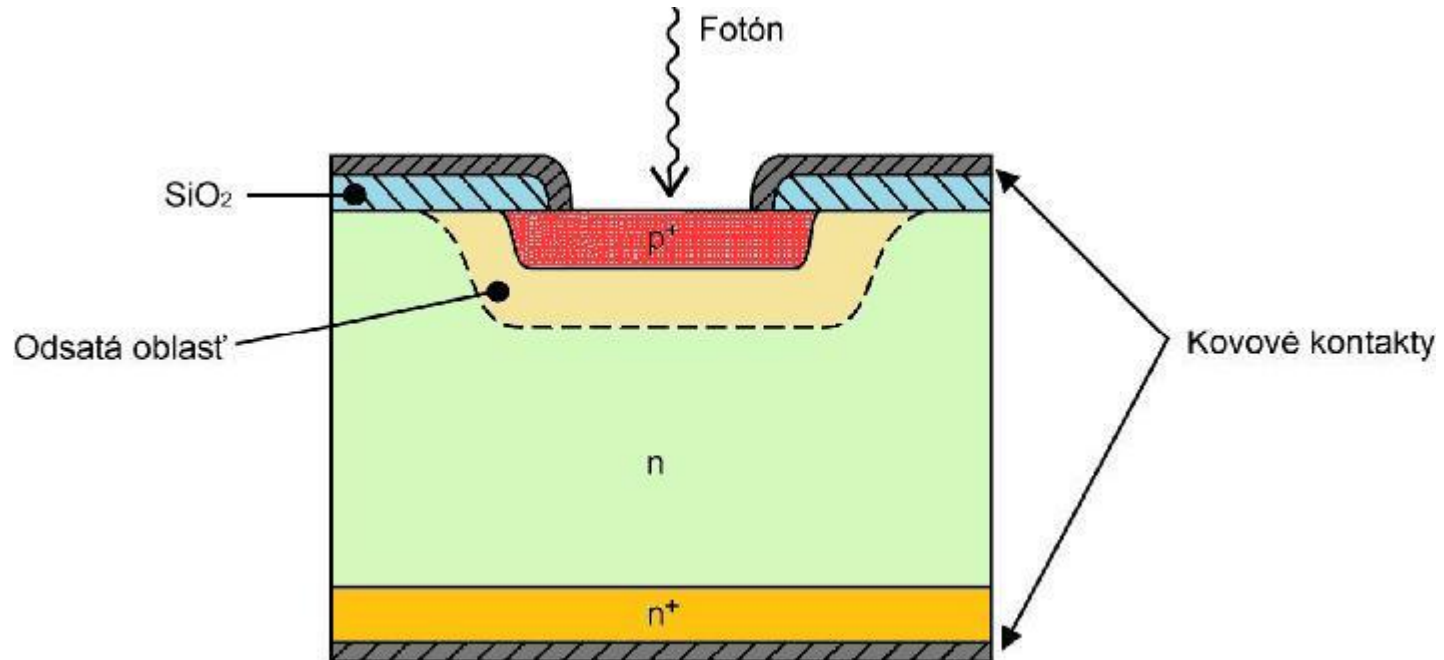
$$D^* = \frac{A\sqrt{B}}{NEP}$$

Označovaná **D star**

- **Tepelný šum**
- **Vlastný kvantový šum svetla**
- **PN a PIN fotodióda**

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

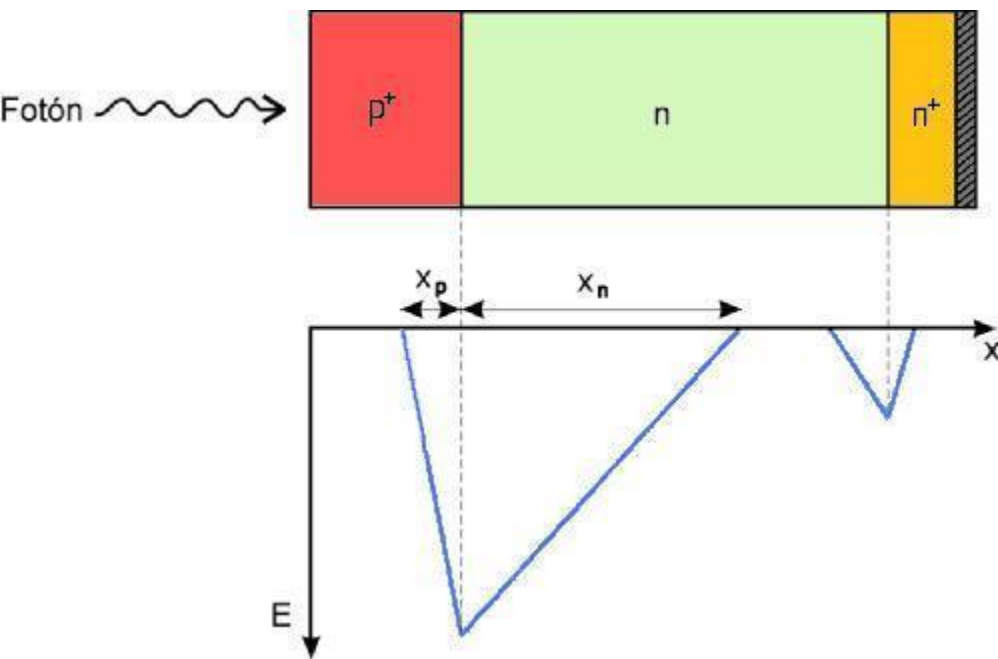
6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



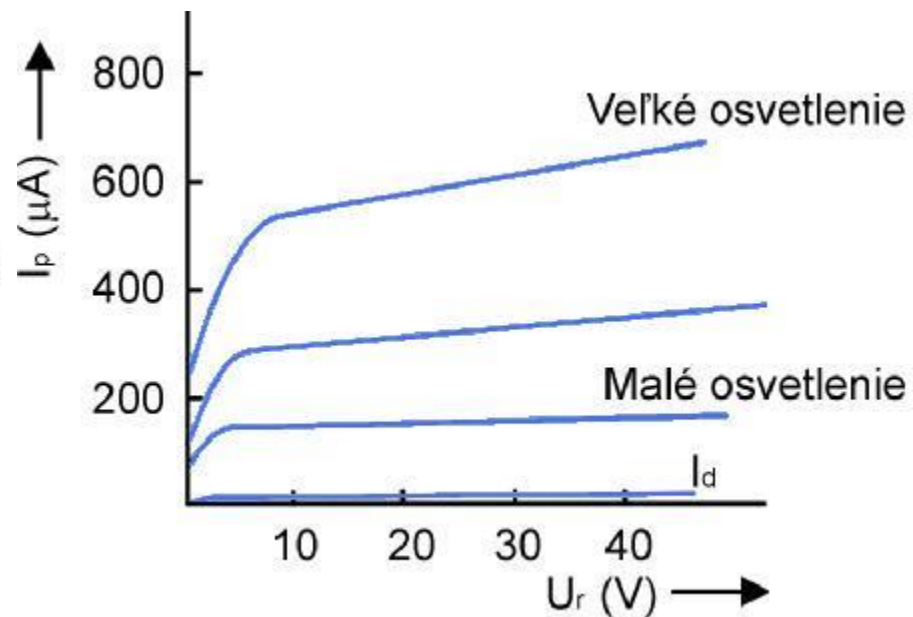
Obr. 6.4 Typická štruktúra kremíkovej fotodiódy PN.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



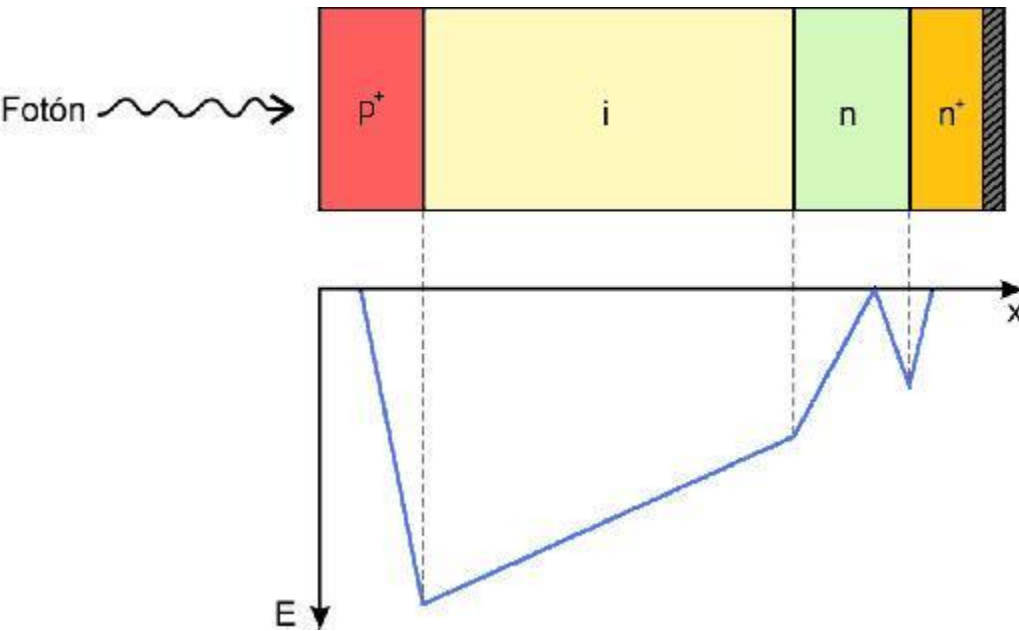
Obr. 6.5
Fotodióda s prechodom PN,
rozloženie elektrického poľa.



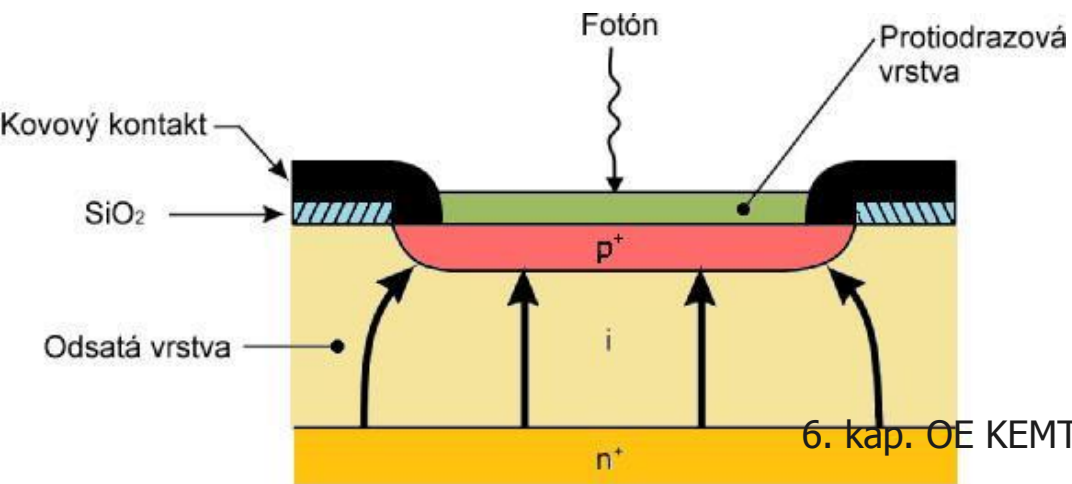
Obr. 6.6
Výstupná charakteristika fotodiódy
s prechodom PN.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



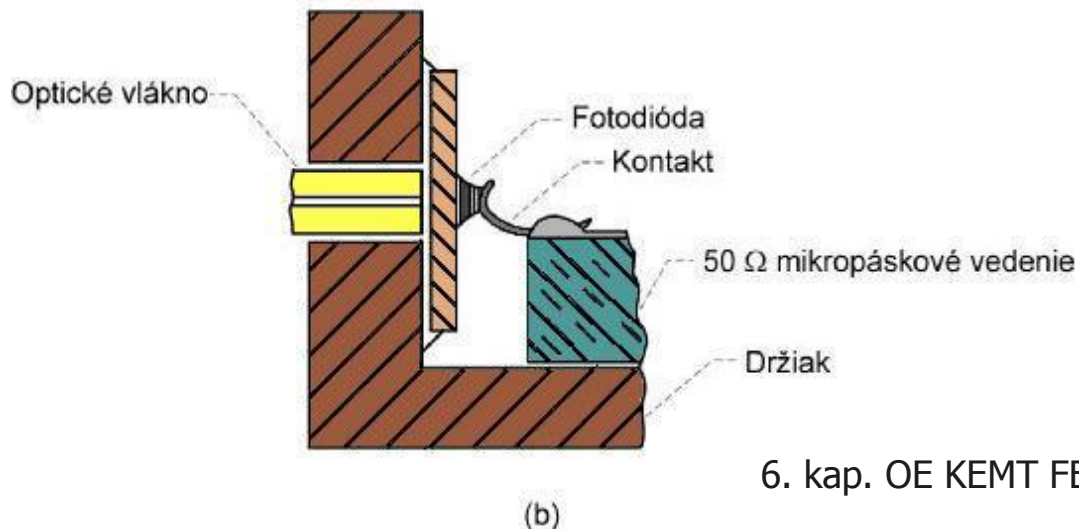
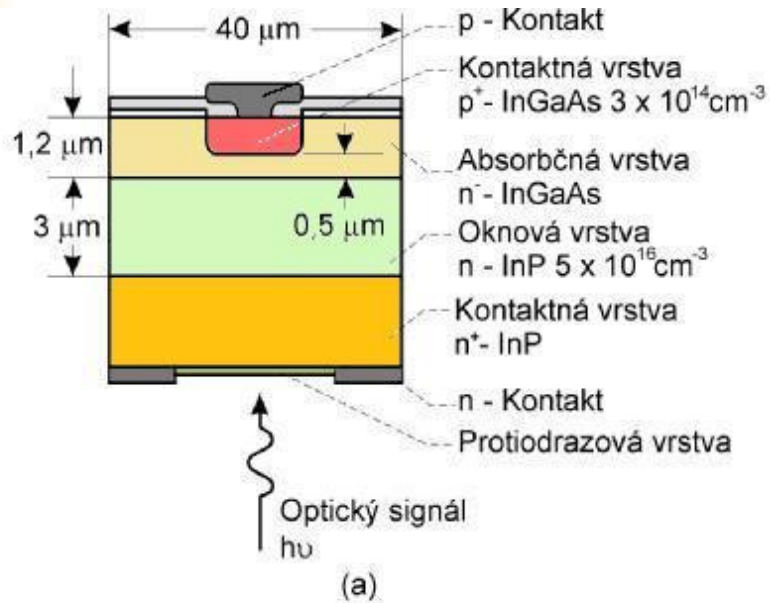
Obr. 6.7
Fotodióda PIN, štruktúra a priebeh
elektrického poľa PIN fotodiódy.



Obr. 6.8
Štruktúra čelne osvetlovanej Si PIN
fotodiódy.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

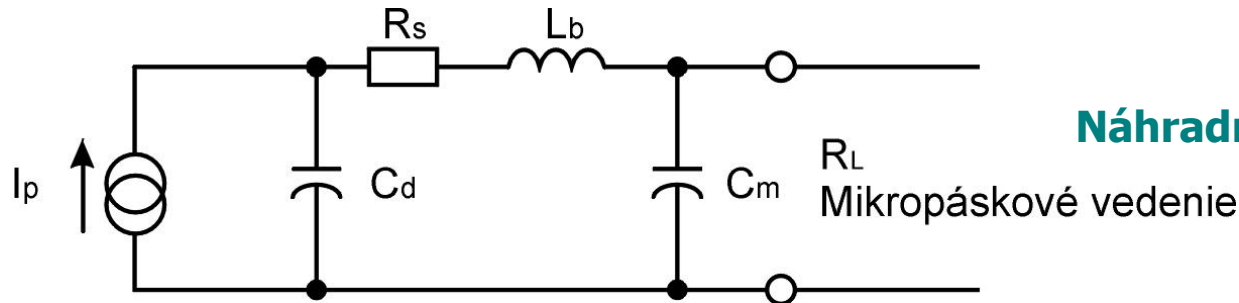
6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



Obr. 6.9
(a) štruktúra InGaAs / InP PIN fotodiódy
(b) pripojenie štruktúry k OV a mikropáskovému vedeniu.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



Obr. 6.10
Náhradný ekvivalentný obvod PIN
fotodiódy.

- Frekvencia orezania 22 GHz
- 3 dB šírka pásma

$$f_o = \frac{f_c f_t}{\sqrt{f_c^2 + f_t^2}}$$

- $f_0 = 20,3$ GHz
- InGaAs / InP PIN fotodiódy so šírkou pásma až 70 GHz
- **Intenzitne modulovaný optický signál**

$$P(\omega) = P_o \left(1 + m e^{j\omega t} \right)$$

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

- **Priemerná hodnota fotoprúdu**

$$I_p = \frac{e\eta P_o}{h\nu}$$

- **Stredná kvadratická hodnota signálového prúdu**

$$i_p = \frac{e\eta m P_o}{\sqrt{2}h\nu}$$

- **Hlavné šumové príspevky:**

1. **Tepelný (Johnsonov) šum**

$$\overline{i_t^2} = \frac{4kTB}{R_{eq}}$$

2. **Výstrelové (kvantové) šumy** fotoprúdu i_{sp} , prúdu za tmy i_{sd} a zvodového prúdu i_{sl}

$$\overline{i_{TS}^2} = \overline{i_{sp}^2} + \overline{i_{sd}^2} + \overline{i_{sl}^2} = 2eB(I_p + I_d + I_l)$$

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

Príspevok:

- **Tepelného (Johnsonovho) šumu** $i_t = 3,31 \cdot 10^{-22}$ A
- **Výstrelového (kvantového) šumu** $i_{sd} = i_{sl} = 6,41 \cdot 10^{-27}$ A

- **Pomer signálu a šumu**

$$S/N = \frac{\overline{i_p^2}}{i_t^2 + i_{TS}^2} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{e \eta m P_o}{h \nu} \right)^2}{2 e B (I_p + I_d + I_l) + \frac{4 k T B}{R_{eq}}}$$

- **Minimálny optický výkon**

$$(P_o)_{\min} = \frac{2 h \nu B}{\eta} (S/N) \left\{ 1 + \left[\frac{I_{eq}}{e B (S/N)} \right]^2 \right\}$$

kde

$$I_{eq} = I_d + I_e + \frac{2 k T}{e R_{eq}}$$

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU

- **Kvantový limit detekcie** $(P_o)_{QL} = \frac{2h\nu B}{\eta} (S/N)$

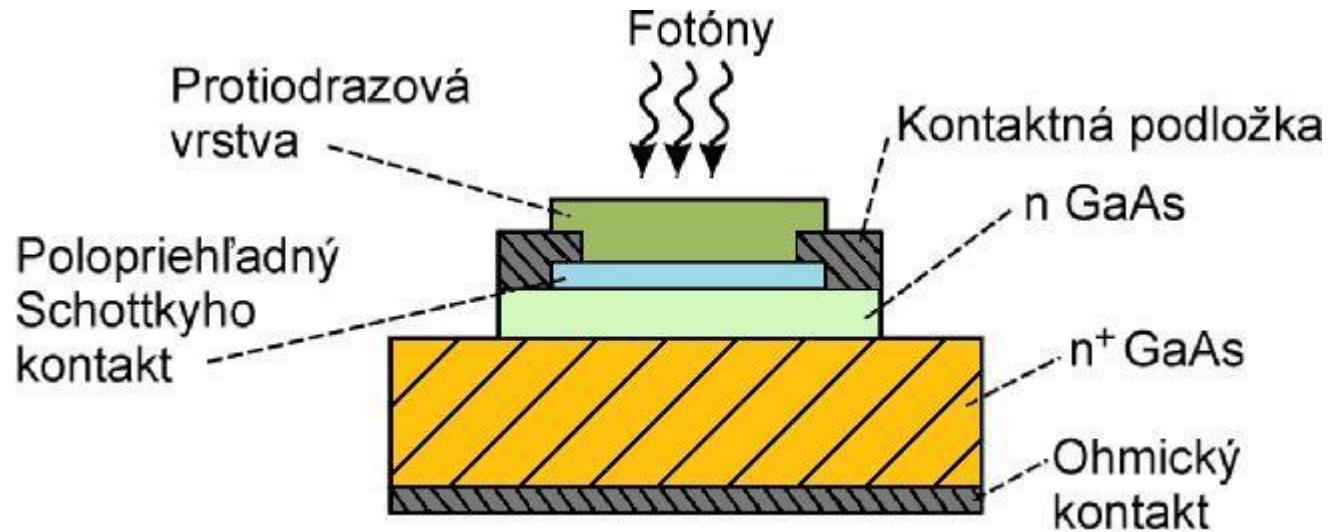
- **NEP**

$$NEP = \sqrt{2} \left(\frac{h\nu}{\eta} \right) \left(\frac{I_{eq}}{e} \right)^{1/2}$$

- **InGaAs / InP PIN** fotodióda, ak $\eta = 70 \%$, $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$, $I_d + I_l = 20 \text{ nA}$ a $R_{eq} = 50 \Omega$ je **NEP** = $24,8 \text{ pW}\cdot\text{Hz}^{1/2}$
- Spôľahlivosť **PIN** fotodiódy – niekoľko stovák rokov
- Fotodióda so Schottkyho priechodom parametre: $\eta = 56 \%$, 3 dB šírka pásma 15,3 GHz, priemer 100 μm , záverné predpätie -5 V, prúd za tmy $I_d = -0,3 \text{ nA}$
- C_d je niekoľko desiatok pF, L_s je niekoľko desiatok nH, R_s je niekoľko Ω

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

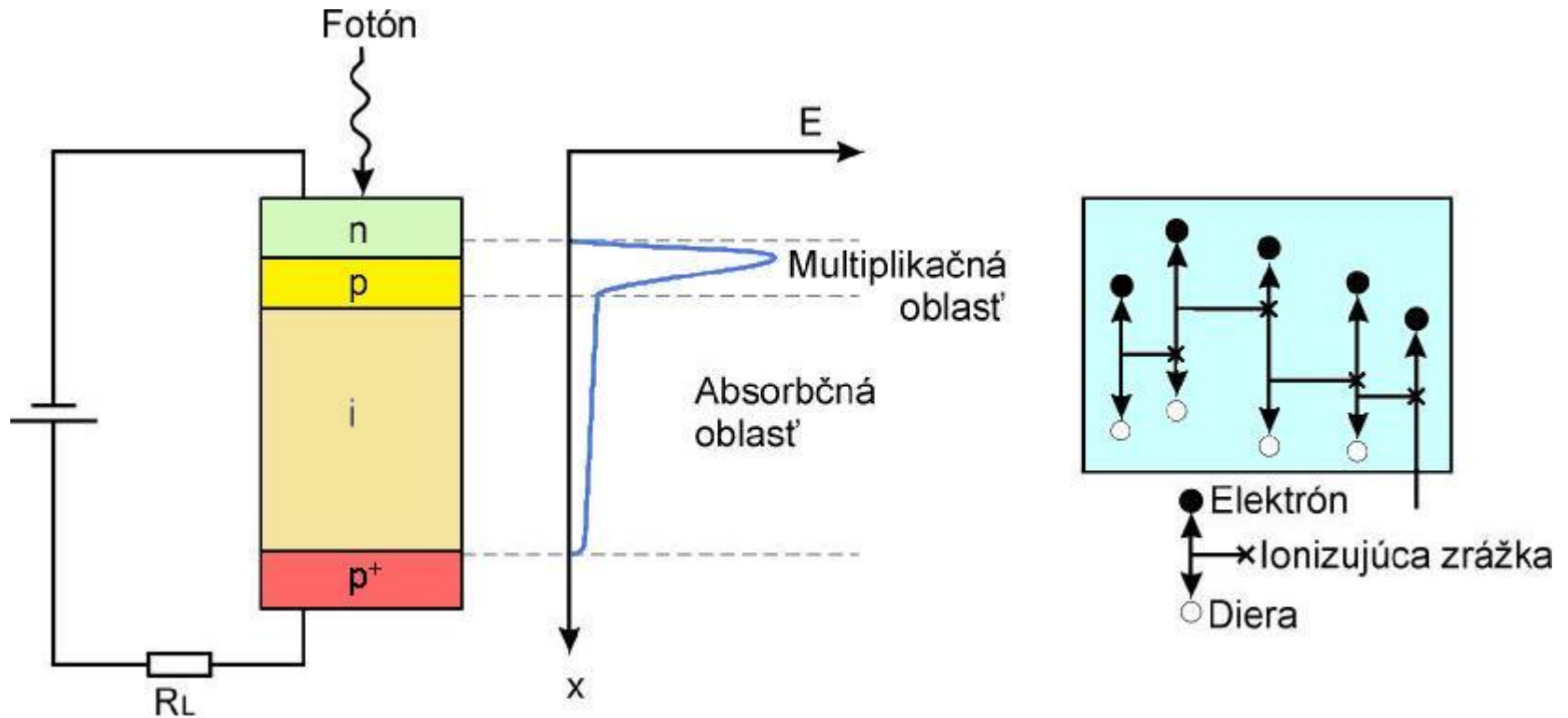
6.2 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY BEZ VNÚTORNÉHO ZISKU



Obr. 6.11 Štruktúra GaAs fotodiódy so Schottkyho priechodom.

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.3 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY S VNÚTORNÝM ZISKOM



Obr. 6.12 Fotodióda s vnútorným ziskom: (a) konštrukcia a priebeh intenzity elektrického poľa, (b) lavínový proces multiplikácie nosičov.

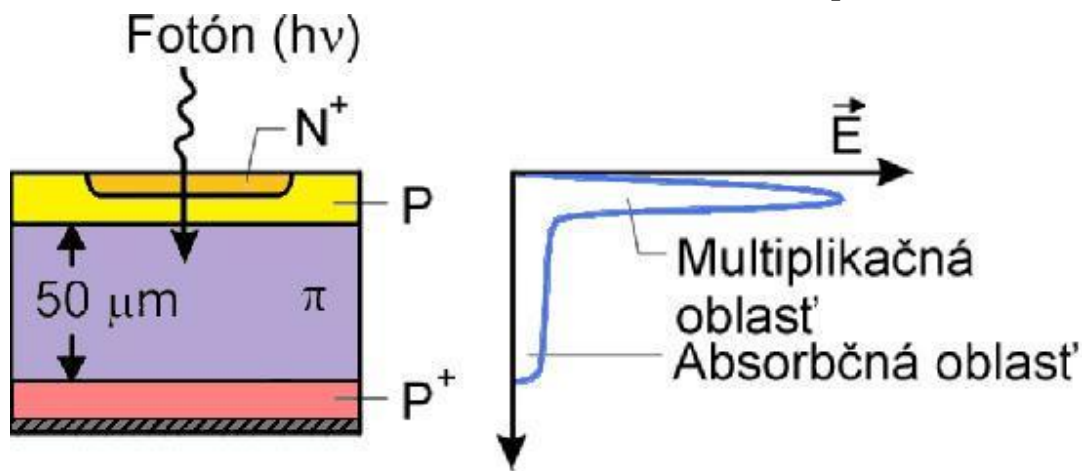
6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.3 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY S VNÚTORNÝM ZISKOM

- Veľmi veľká intenzita elektrického poľa ($\sim 3 \cdot 10^5 \text{ Vcm}^{-1}$)
- Nárazová ionizácia
- Lavínové fotodiódy (APD - Avalanche Photodiode)
- Záverné napätie (100 až 400 V)

Multiplikačný faktor

$$M = \frac{I}{I_p}$$



a)

b)

Obr. 6.13 Štruktúra kremíkovej RAPD (Reach trough APD) (a) a priebeh intenzity elektrického poľa (b).

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.3 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY S VNÚTORNÝM ZISKOM

- **Pomer signál/šum pre APD**

$$S/N = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{e \eta m P_o}{h \nu} \right)^2 M^2}{2eB(I_p + I_d)M F(M) + 2eI_l B + \frac{4kTB}{R_L}}$$

kde $F(M) = M^x$

- **Optimálna hodnota lavínového zisku APD**

$$M_{opt}^{x+2} = \frac{2eI_1 + \frac{4kT}{R_L}}{xe(I_p + I_d)}$$

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

6.3 POLOVODIČOVÉ FOTODIÓDY S VNÚTORNÝM ZISKOM

- **NEP pre APD**
$$NEP = \sqrt{2} \left(\frac{h\nu}{\eta} \right) \left[\frac{I_{eq}}{e F(M)^2} \right]$$

kde
$$I_{eq} = I_d F(M) + \frac{2kT}{e R_L M^2}$$

- Parametre APD : $\eta = 70 \%$ pre $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ potom $F(M) = M^x = 3^{1/2} = 1,73$ a $NEP = 4,2 \text{ pWHz}^{1/2}$
- **Nevýhody :**
 - Zložitejšia štruktúra – drahšia výroba
 - Náhodný charakter multiplikačného (lavínového) zisku je zdrojom ďalšieho šumu
 - Relatívne vysoké pracovné záverné napätia (100 až 400 V)
 - Závislosť zisku od teploty
- **PIN-FET modul**
- **Opticky riadené tranzistory OPFETy**

6. DETEKTORY SVETLA (FOTODETEKTORY)

Typické charakteristiky niektorých fotodetektorov

PD	λ [nm]	λ_p [nm]	R [A/W]	Gain	t_r [ns]	i_d [nA]
Si PD	200-1100	600-900	0,5-0,6	<1	0,5	0,01-0,1
Si PIN	300-1100	800-900	0,5-0,6	<1	0,03-0,05	0,01-0,1
Si APD	400-1100	830-900	40-130	10-100	0,1	1-10
Ge PD	700-1800	1500-1600	0,4-0,7	<1	0,05	$10^2 - 10^3$
Ge APD	700-1700	1500-1600	4-14	10-20	0,1	$10^2 - 10^4$
InGaAa/InP PIN	800-1700	1500-1600	0,7-0,9	<1	0,03-0,1	0,1-10
InGaAa/InP APD	800-1700	1500-1600	7-18	10-20	0,07-0,1	$10-10^2$