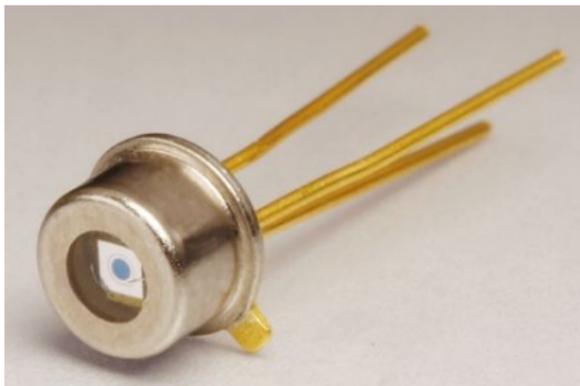


# Detekce světla – Vnitřní fotoelektrický jev

Antonín Černocho Jan Soubusta Ondřej Haderka

Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



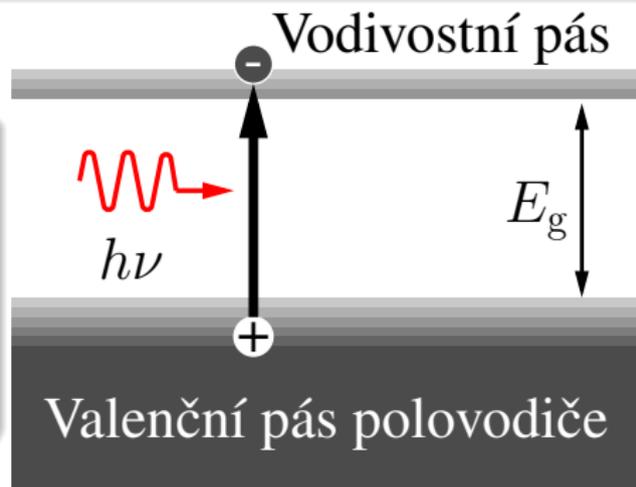
# Obsah

- 1 Úvod
- 2 Fotorezistory
- 3 Fotodiody

# Vnitřní fotoefekt

- detekce v polovodičovém materiálu v oblasti bez volných nosičů náboje (velký odpor)
- dopad fotonu ( $h\nu > E_g$ ) excituje elektron ( $-e$ ) do vodivostního pásu, na jeho místě zůstává díra ( $+e$ )

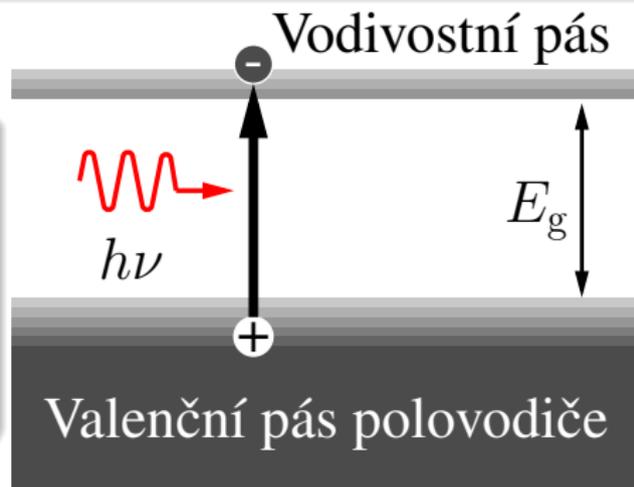
- bez elektrického pole  $\rightarrow$  náhodný pohyb, zpětná rekombinace
- s elektrickým polem  $\rightarrow$  elektrický proud  $\rightarrow$  pokles napětí v obvodu



# Vnitřní fotoefekt

- detekce v polovodičovém materiálu v oblasti bez volných nosičů náboje (velký odpor)
- dopad fotonu ( $h\nu > E_g$ ) excituje elektron ( $-e$ ) do vodivostního pásu, na jeho místě zůstává díra ( $+e$ )

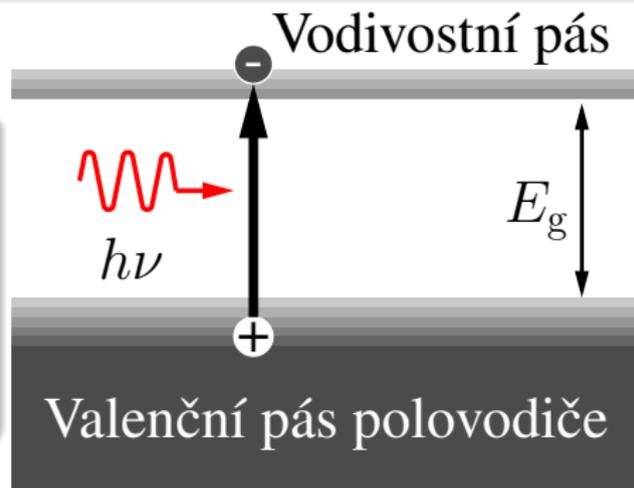
- bez elektrického pole  $\rightarrow$  náhodný pohyb, zpětná rekombinace
- s elektrickým polem  $\rightarrow$  elektrický proud  $\rightarrow$  pokles napětí v obvodu



# Vnitřní fotoefekt

- detekce v polovodičovém materiálu v oblasti bez volných nosičů náboje (velký odpor)
- dopad fotonu ( $h\nu > E_g$ ) excituje elektron ( $-e$ ) do vodivostního pásu, na jeho místě zůstává díra ( $+e$ )

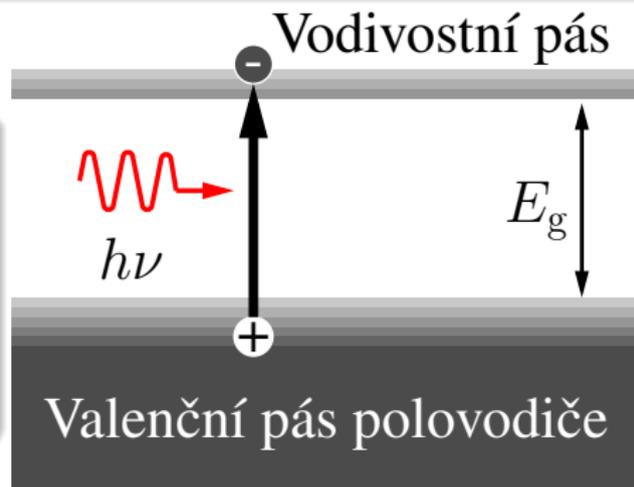
- bez elektrického pole  $\rightarrow$  náhodný pohyb, zpětná rekombinace
- s elektrickým polem  $\rightarrow$  elektrický proud  $\rightarrow$  pokles napětí v obvodu



# Vnitřní fotoefekt

- detekce v polovodičovém materiálu v oblasti bez volných nosičů náboje (velký odpor)
- dopad fotonu ( $h\nu > E_g$ ) excituje elektron ( $-e$ ) do vodivostního pásu, na jeho místě zůstává díra ( $+e$ )

- bez elektrického pole  $\rightarrow$  náhodný pohyb, zpětná rekombinace
- s elektrickým polem  $\rightarrow$  elektrický proud  $\rightarrow$  pokles napětí v obvodu



# Obsah

- 1 Úvod
- 2 Fotorezistory
  - Vlastní fotorezistory
  - Nevlastní fotorezistory
  - Homo a heterostruktury
- 3 Fotodiody

# Fotorezistory

# *Photoconductors*

- za tmy počet volných nosičů úměrný teplotě → nenulová vodivost
- dopadající fotonový tok  $\Phi_p$  → zvýšení vodivosti materiálu  $\sigma$

# Fotorezistory

# Photoconductors

- za tmy počet volných nosičů úměrný teplotě → nenulová vodivost
- dopadající fotonový tok  $\Phi_p$  → zvýšení vodivosti materiálu  $\sigma$

## Materiál polovodičového detektoru

**Vlastní** intristické, čistý polovodič bez příměsí, jen mezipásové přechody

Nevlastní extrinsické, dopovaný polovodič, přechody z donorové nebo akceptorové hladiny

Heterostruktury vrstvy různě dopovaných polovodičů, kvantové bariéry a jámy

# Fotorezistory

# Photoconductors

- za tmy počet volných nosičů úměrný teplotě → nenulová vodivost
- dopadající fotonový tok  $\Phi_p$  → zvýšení vodivosti materiálu  $\sigma$

## Materiál polovodičového detektoru

**Vlastní** intristické, čistý polovodič bez příměsí, jen mezipásové přechody

**Nevlastní** extrinsické, dopovaný polovodič, přechody z donorové nebo akceptorové hladiny

Heterostruktury vrstvy různě dopovaných polovodičů, kvantové bariéry a jámy

# Fotorezistory

# Photoconductors

- za tmy počet volných nosičů úměrný teplotě → nenulová vodivost
- dopadající fotonový tok  $\Phi_p$  → zvýšení vodivosti materiálu  $\sigma$

## Materiál polovodičového detektoru

**Vlastní** intristické, čistý polovodič bez příměsí, jen mezipásové přechody

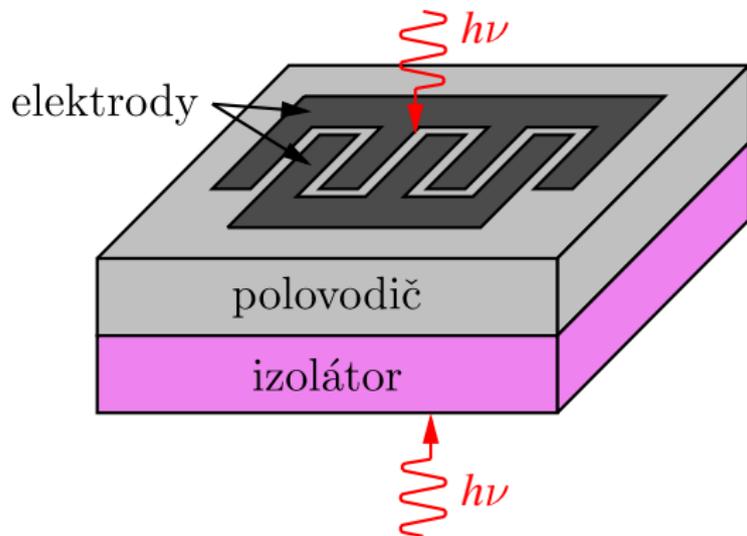
**Nevlastní** extrinsické, dopovaný polovodič, přechody z donorové nebo akceptorové hladiny

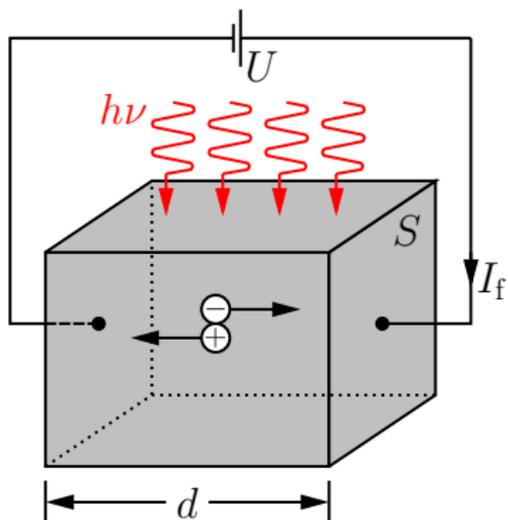
**Heterostruktury** vrstvy různě dopovaných polovodičů, kvantové bariéry a jámy

# Vlastní fotorezistory

# *Intrinsic photoconductors*

- absorpce fotonů jen díky mezipásmovým přechodům,  $h\nu > E_g$
- tvar a vzdálenost elektrod – minimalizace doby průchodu
- průhledný substrát osvětlený zezadu, beze ztrát na kontaktech

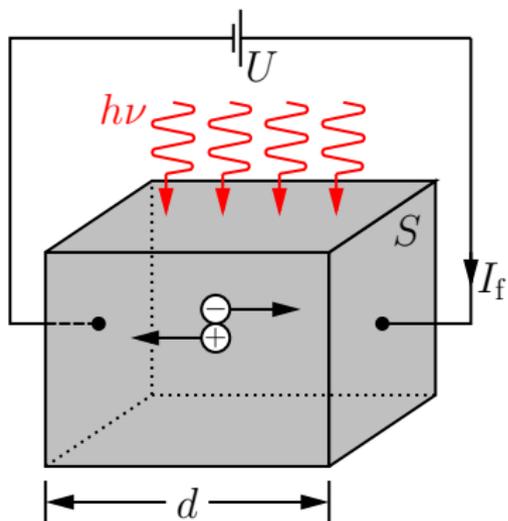




ustálený stav pro nosiče náboje:  
rychlost generace = rychlost mizení

$$\frac{\eta\Phi_p}{Sd} = \frac{\Delta n}{\tau}$$

$\Delta n$  koncentrace a  $\tau$  doba života



ustálený stav pro nosiče náboje:  
rychlost generace = rychlost mizení

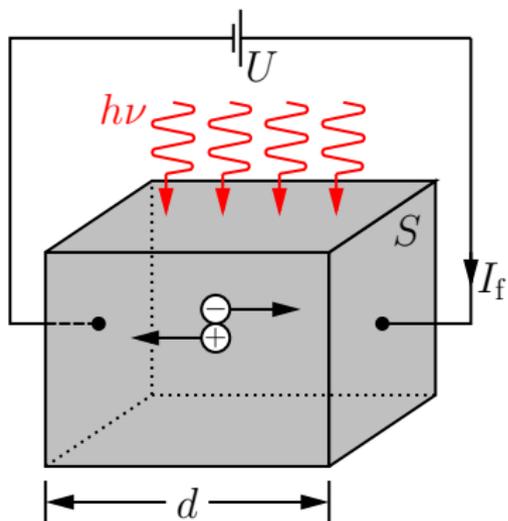
$$\frac{\eta\Phi_p}{Sd} = \frac{\Delta n}{\tau}$$

$\Delta n$  koncentrace a  $\tau$  doba života

Změna vodivosti  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = e\Delta n(\mu_e + \mu_h) = \frac{\eta e\tau(\mu_e + \mu_h)}{Sd}\Phi_p$$

$\mu_{e,h}$  - pohyblivosti elektronu a díry



ustálený stav pro nosiče náboje:  
rychlost generace = rychlost mizení

$$\frac{\eta\Phi_p}{Sd} = \frac{\Delta n}{\tau}$$

$\Delta n$  koncentrace a  $\tau$  doba života

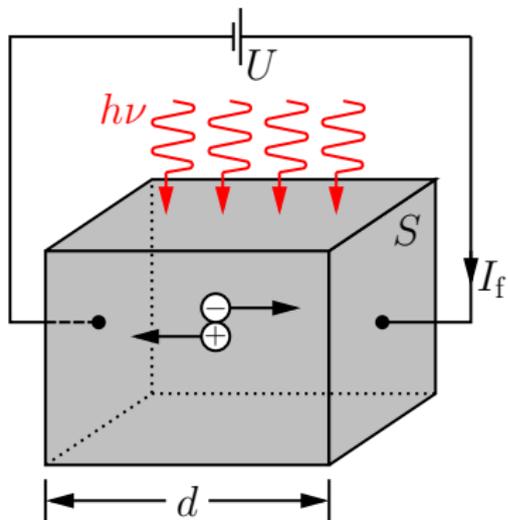
Změna vodivosti  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = e\Delta n(\mu_e + \mu_h) = \frac{\eta e\tau(\mu_e + \mu_h)}{Sd}\Phi_p$$

$\mu_{e,h}$  - pohyblivosti elektronu a díry

Ohmův zákon

$$j_f = \Delta\sigma E, \quad I_f = j_f S \quad \rightarrow \quad I_f = \eta e\tau(\mu_e + \mu_h) \frac{\Phi_p E}{d}$$

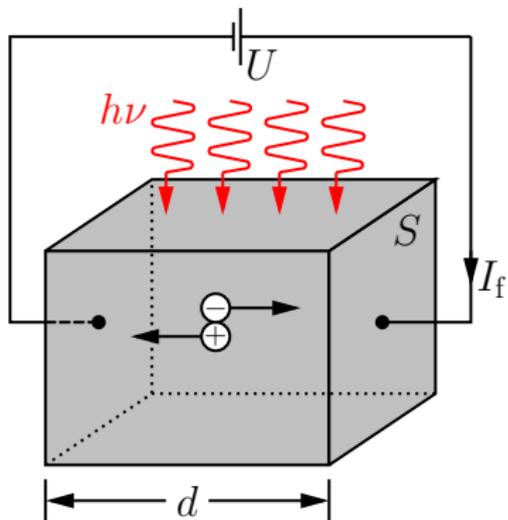


střední rychlost nosičů

$$v_{e,h} = \mu_{e,h} E$$

střední doba průchodu nosičů

$$\tau_{e,h} = d/v_{e,h}, \quad v_h \ll v_e$$



### střední rychlost nosičů

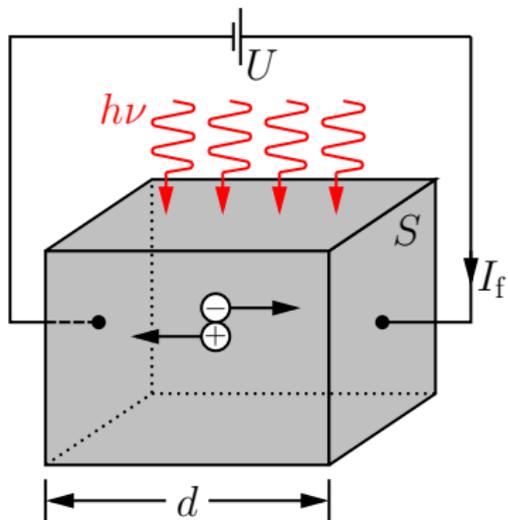
$$v_{e,h} = \mu_{e,h} E$$

### střední doba průchodu nosičů

$$\tau_{e,h} = d/v_{e,h}, \quad v_h \ll v_e$$

### proud v obvodu

$$I = \eta e \tau (v_e + v_h) \frac{\Phi_p}{d} \approx \eta e \Phi_p \frac{\tau}{\tau_e}$$



### střední rychlost nosičů

$$v_{e,h} = \mu_{e,h} E$$

### střední doba průchodu nosičů

$$\tau_{e,h} = d/v_{e,h}, \quad v_h \ll v_e$$

### proud v obvodu

$$I = \eta e \tau (v_e + v_h) \frac{\Phi_p}{d} \approx \eta e \Phi_p \frac{\tau}{\tau_e}$$

Zisk

Gain

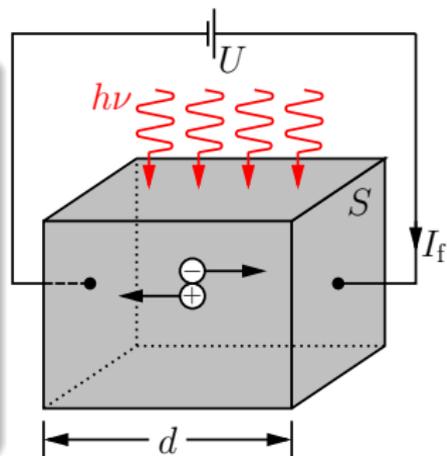
$$G = \tau/\tau_e \quad \rightarrow \quad I \approx \eta e \Phi_p G$$

$\tau < \tau_e$  –  $G < 1$ , rychlá rekombinace nosičů

$\tau > \tau_e$  –  $G > 1$ , rychlý průchod, malá vzdálenost kontaktů

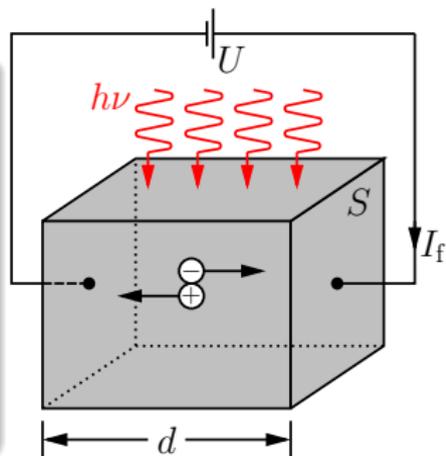
## Zákon zachování kontinuity proudu

- $v_h \ll v_e \rightarrow$  elektron dorazí na kontakt dřív než díra
- nový elektron z opačného kontaktu
- průchod celým polovodičem
- opakuje se to dokud rekombinace nebo díra na kontakt



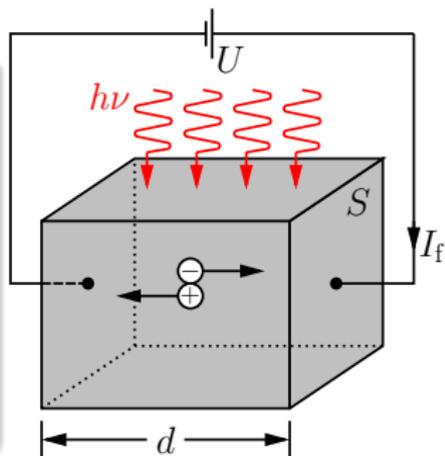
## Zákon zachování kontinuity proudu

- $v_h \ll v_e \rightarrow$  elektron dorazí na kontakt dříve než díra
- nový elektron z opačného kontaktu
- průchod celým polovodičem
- opakuje se to dokud rekombinace nebo díra na kontakt



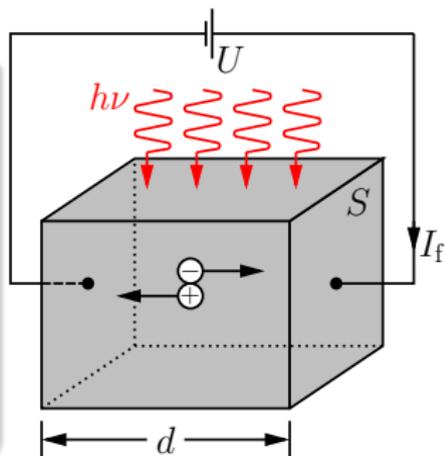
## Zákon zachování kontinuity proudu

- $v_h \ll v_e \rightarrow$  elektron dorazí na kontakt dříve než díra
- nový elektron z opačného kontaktu
- průchod celým polovodičem
- opakuje se to dokud rekombinace nebo díra na kontakt



## Zákon zachování kontinuity proudu

- $v_h \ll v_e \rightarrow$  elektron dorazí na kontakt dřív než díra
- nový elektron z opačného kontaktu
- průchod celým polovodičem
- opakuje se to dokud rekombinace nebo díra na kontakt



## Example (Zisk fotorezistoru)

- $d = 1 \text{ mm}$ ,  $v_e = 10^7 \text{ cm/s} \rightarrow \tau_e \approx 10^{-8} \text{ s}$
- $\tau$  podle materiálu od  $10^{-13} \text{ s}$  po několik sekund
- $G$  od  $10^{-5}$  teoreticky do  $10^9$
- prakticky ale jen do  $10^6$  (hustotou proudu, nárazová ionizace a průrazem dielektrika)

# Vlastnosti materiálů vlastních polovodičů

Materiál	$\epsilon_r$	$\tau$ [s]	$\mu_e$ [cm <sup>2</sup> /(Vs)]	$\mu_h$ [cm <sup>2</sup> /(Vs)]	$E_g$ [eV]
Si	11.8	$10^{-4}$	1 350	480	1.11
Ge	16	$10^{-2}$	3 900	1 900	0.67
PbS	161	$2 \times 10^{-5}$	575	200	0.37
InSb	17.7	$10^{-7}$	105	1 700	0.18
GaAs	13.2	$\geq 10^{-6}$	8 500	400	1.43
InP	12.4	$\sim 10^{-6}$	4 000	100	1.35

# Vlastnosti materiálů vlastních polovodičů

Materiál	$\epsilon_r$	$\tau$ [s]	$\mu_e$ [cm <sup>2</sup> /(Vs)]	$\mu_h$ [cm <sup>2</sup> /(Vs)]	$E_g$ [eV]
Si	11.8	$10^{-4}$	1 350	480	1.11
Ge	16	$10^{-2}$	3 900	1 900	0.67
PbS	161	$2 \times 10^{-5}$	575	200	0.37
InSb	17.7	$10^{-7}$	105	1 700	0.18
GaAs	13.2	$\geq 10^{-6}$	8 500	400	1.43
InP	12.4	$\sim 10^{-6}$	4 000	100	1.35

## Spektrální citlivost

- závisí na  $\eta$  materiálu, dlouhovlnný limit dán  $E_g$
- slitina  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  má  $E_g \in [1.55, 0]$  eV  $\rightarrow \lambda_g \in [800, \infty]$  nm (HgTe je kov)
- posun  $\lambda_g$  podle teploty o 5 až 10 %, nad 1  $\mu\text{m}$  chlazení

## Citlivost $\mathcal{R}$

- úměrná  $G$  a  $\eta$ , tvar a velikost kontaktů, předpětí až po průrazné (potom fluktuace vodivosti, nárůst šumu, destrukce)
- materiály s velkou  $\tau$  (nepřímý přechod, vysoká čistota bez rekombinačních center)

## Citlivost $\mathcal{R}$

- úměrná  $G$  a  $\eta$ , tvar a velikost kontaktů, předpětí až po průrazné (potom fluktuace vodivosti, nárůst šumu, destrukce)
- materiály s velkou  $\tau$  (nepřímý přechod, vysoká čistota bez rekombinačních center)

## Doba odezvy

závisí na  $\tau_{e,h}$  a  $RC$  konstantě

$$R = \frac{d^2}{\eta e \Phi \tau (\mu_e + \mu_h)}, \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\tau \sim G \text{ ale } \tau \sim 1/B \quad \rightarrow \quad GB \approx 10^9$$

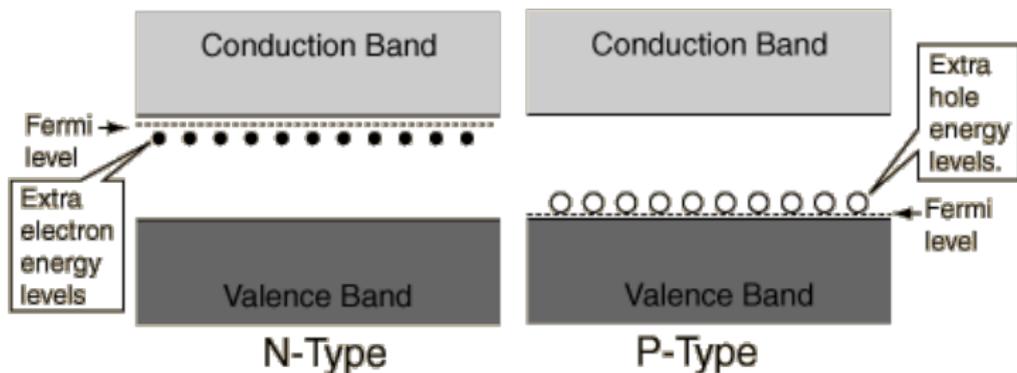
$B$  – šířka pásma (rychlost odezvy, mezní frekvence  $\frac{1}{2\pi\tau}$ )

# Nevlastní fotorezistory

# *Extrinsic photoconductors*

- excitace elektronu z donorové hladiny do vodivostního pásu za vzniku vázané díry
- excitace díry z akceptorové hladiny do valenčního pásu za vzniku vázaného elektronu

větší pravděpodobnost termální excitace – chlazení až na 4 K



## Absorpční koeficient $\alpha(\lambda) = \sigma_i(\lambda)N_{a,d}$

- $\sigma_i(\lambda)$  – fotoionizační průřez,  $N_{a,d}$  – koncentrace dopantu
- koncentrace  $N_1$  limitována rozpustností ( $10^{14}$ – $10^{21}$  cm<sup>-3</sup>) a nežádoucím nárůstem vodivosti ( $10^{15}$ – $10^{16}$  cm<sup>-3</sup>)
- absorpční koeficient menší cca o tři řády oproti vlastním polovodičům → zvětšení objemu

Dopant	Typ	Ge		Si	
		$\lambda_m$ [μm]	$\sigma_i$ [ $10^{-15}$ cm <sup>2</sup> ]	$\lambda_m$ [μm]	$\sigma_i$ [ $10^{-15}$ cm <sup>2</sup> ]
Al	p			18.5	0.8
B	p	119	10	28	1.4
Be	p	52		8.3	0.005
Ga	p	115	10	17.2	0.5
In	p	111		7.9	0.033
As	n	98	11	23	2.2
Cu	p	31	1	5.2	0.005
P	n	103	15	27	1.7
Sb	n	129	16	29	6.2

## Homostruktury a heterostruktury

- vrstvení různě dotovaných polovodičů → potenciálové jámy (GaAs) a bariéry (AlGaAs)
- QWIP *Quantum-well* a QDIP *quantum-dot infrared photodetector*
- stlačený materiál (*stressed*) – narušení krystalové mřížky, snížení excitační energie

## Homostruktury a heterostruktury

- vrstvení různě dotovaných polovodičů → potenciálové jámy (GaAs) a bariéry (AlGaAs)
- QWIP *Quantum-well* a QDIP *quantum-dot infrared photodetector*
- stlačený materiál (*stressed*) – narušení krystalové mřížky, snížení excitační energie

### Komerční fotorezistory Tesly Blatná a.s.

Typ	$U_{\max}$ [V]	$P_{\max}$ [mW]	$\lambda_{\mathcal{R}\max}$ [nm]	$R_{10lx}$ [k $\Omega$ ]	$R_{\min}$ [M $\Omega$ ]
M0856 20	250	125	560	13...27	2
P0860 200	320	125	600	130...260	50
K0772 10	150	125	720	6.5...13.5	10

# Obsah

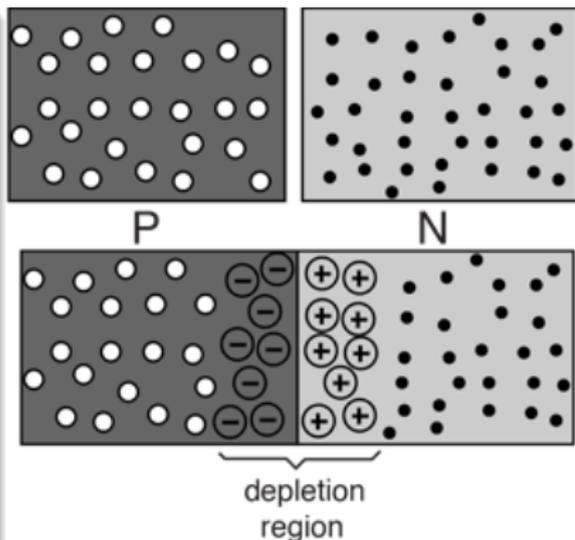
- 1 Úvod
- 2 Fotorezistory
- 3 Fotodiody**
  - p-n fotodiody
  - p-i-n fotodiody
  - Lavinové fotodiody
  - APD v Geigerově módu

## Fotodiody

## Photodiodes

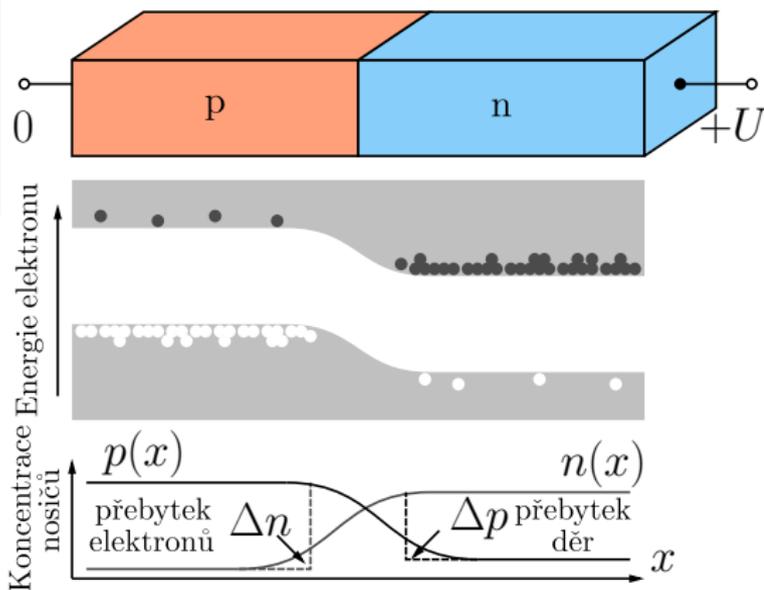
## Princip

- velká vodivost p a n typu
- vnitřní elektrické pole  $U_0$
- ochuzená oblast bez volných nosičů
- jen mezipásmové přechody majoritního čistého polovodiče
- pohyb excitovaných nosičů díky vnitřnímu elektrickému poli
- nevykazují zisk



# p-n fotodiody

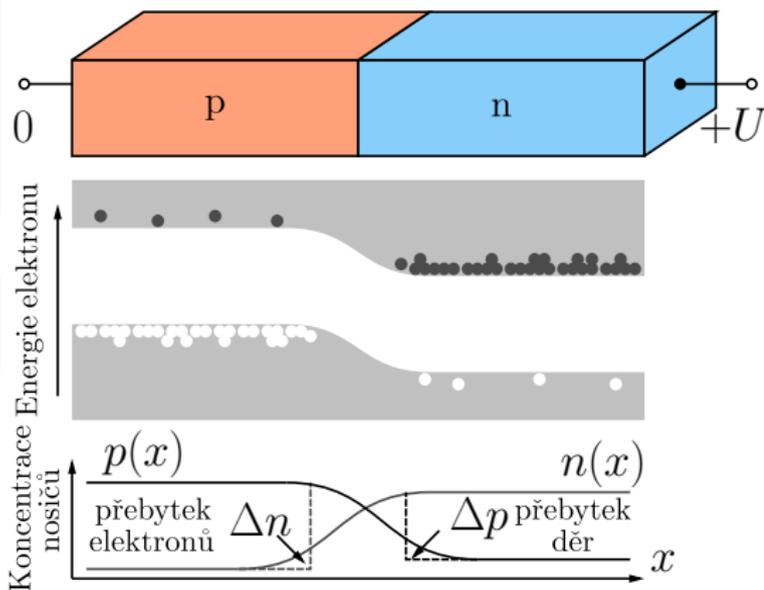
- závěrné napětí → sečtení potenciálů
- zvětšení ochuzené oblasti a odporu
- zmenšení kapacity



# p-n fotodiody

- závěrné napětí → sečtení potenciálů
- zvětšení ochuzené oblasti a odporu
- zmenšení kapacity

$$\mathcal{R} = \frac{I_f}{\Phi_r} = \frac{e\eta}{h\nu}$$



# p-n fotodiody

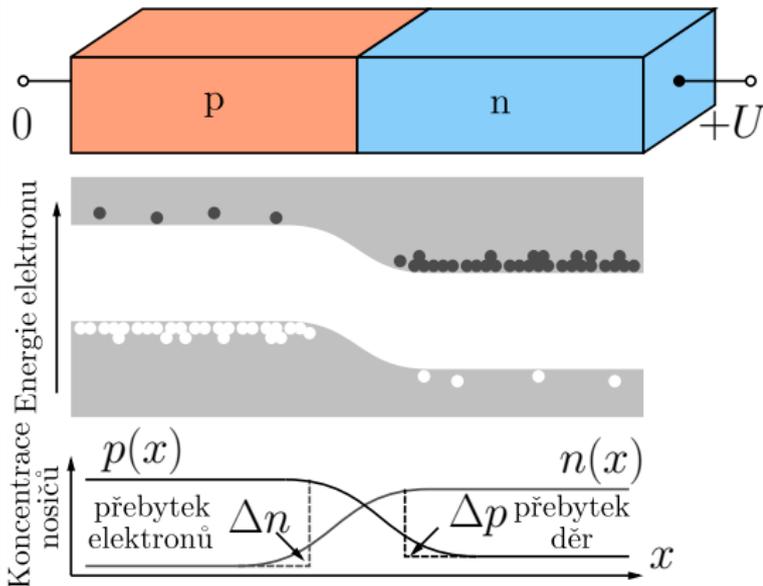
- závěrné napětí → sečtení potenciálů
- zvětšení ochuzené oblasti a odporu
- zmenšení kapacity

$$\mathcal{R} = \frac{I_f}{\Phi_r} = \frac{e\eta}{h\nu}$$

$$I = I_s \left[ e^{(eU/k_B T)} - 1 \right] - I_f$$

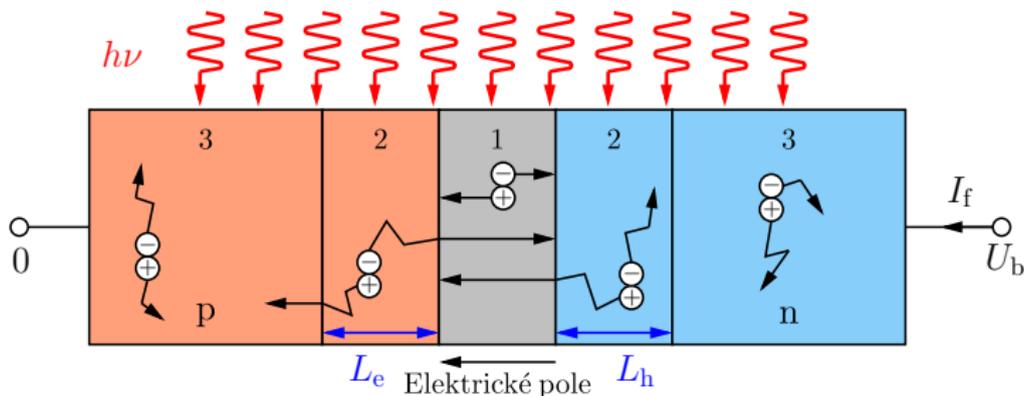
$I_s$  – satureovaný proud

$I_f = \eta e \Phi_p$  – foton proud



## Oblasti absorpce podle transportu nosičů

- 1 ochuzená oblast, transport vlivem vnitřního elektrického pole
- 2 v bezprostřední blízkosti ochuzené oblasti může nosič náboje náhodně dodriftovat do oblasti s elektrickým polem, koeficient difuze  $D_{e,h}$  [cm<sup>2</sup>/s], difuzní délka  $L_{e,h} = \sqrt{D_{e,h}\tau_{e,h}}$  [cm]
- 3 ve vzdálenosti větší jak  $L_{e,h}$  nepřispějí nosiče k proudu ve vnějším obvodu



## Doba odezvy

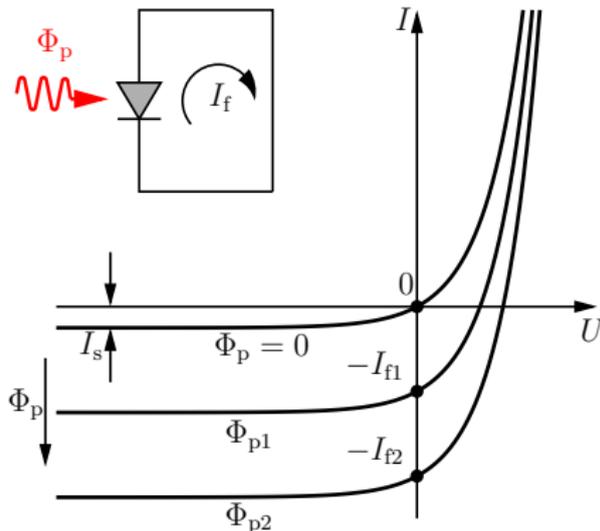
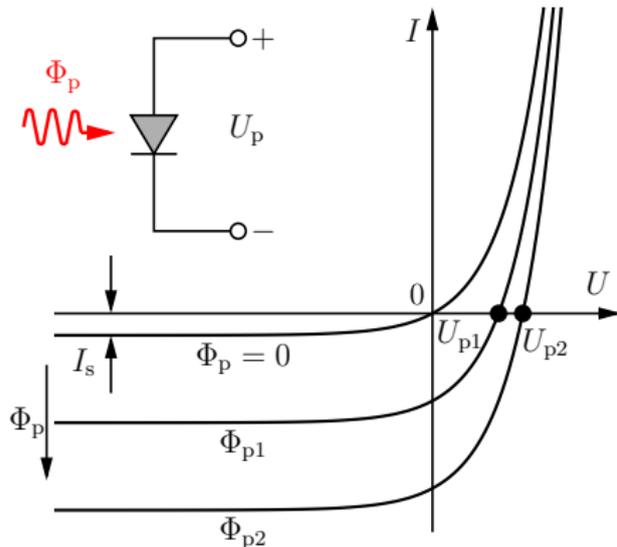
- závisí na  $\tau_{e,h}$  a  $RC$  konstantě stejně jako u fotorezistoru
- navíc doba pohybu nosičů vzniklých mimo ochuzenou oblast

## Materiály fotodiody s mezní vlnovou délkou

diamantové vrstvy	230 nm	GaN	370 nm
$Al_xGa_{1-x}N$	200-370 nm	GaP	520 nm
$Al_xGa_{1-x}AsSb$	0.75-1.7 $\mu m$	Si	1.1 $\mu m$
GaInAs	1.65 $\mu m$	Ge	1.8 $\mu m$
InAs	3.4 $\mu m$	InSb	6.8 $\mu m$
$Hg_{1-x}Cd_xTe$	1-15 $\mu m$		

# Elektrické zapojení I

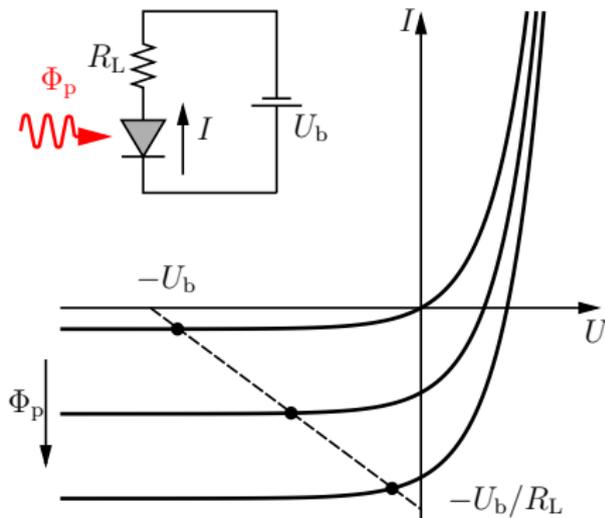
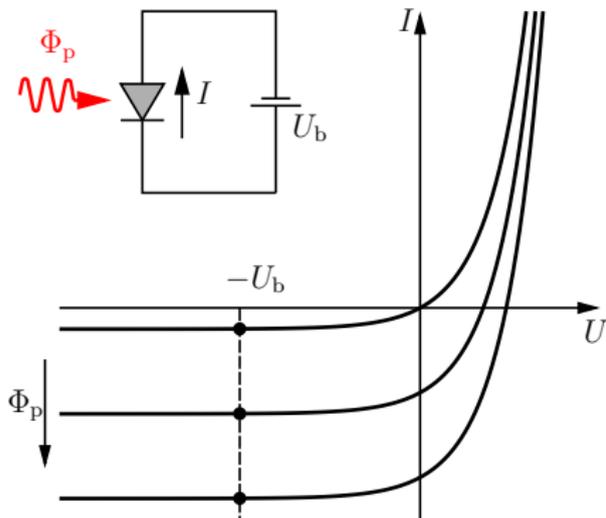
- 1 **na prázdkno** – zvýšení elektrického pole (napětí na kontaktech), citlivost ve  $V/W$
- 2 **na krátko** – přímé spojení, měří se fotoproud  $i_p$



# Elektrické zapojení II

3 se závěrným napětím

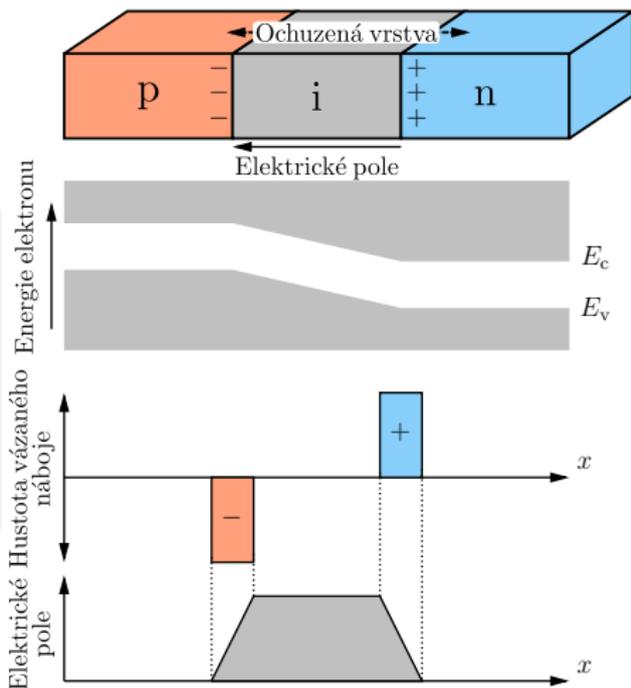
4 se závěrným napětím s odporem v sérii



# p-i-n fotodiody

## širší ochuzená vrstva

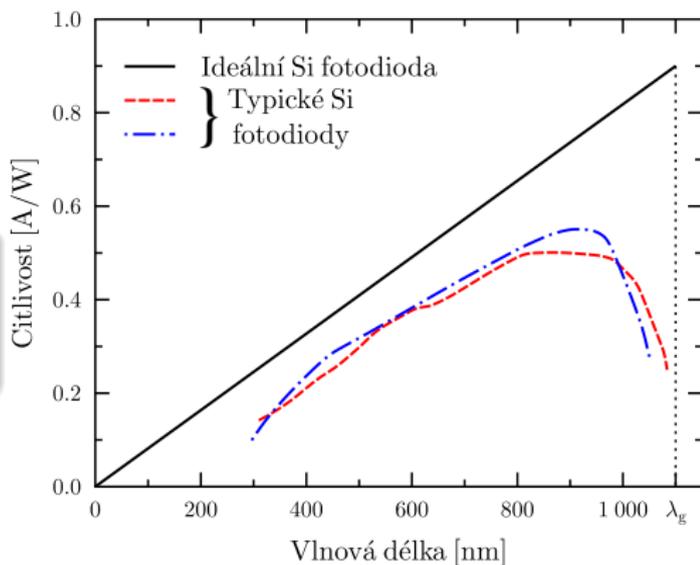
- větší světlocitlivá oblast
- snížení  $C$  ale prodloužení  $\tau_{e,h}$
- menší poměr mezi difuzní a driftovou vzdáleností  $\rightarrow$  rychlejší odezva



# Vlastnosti p-i-n

## Citlivost

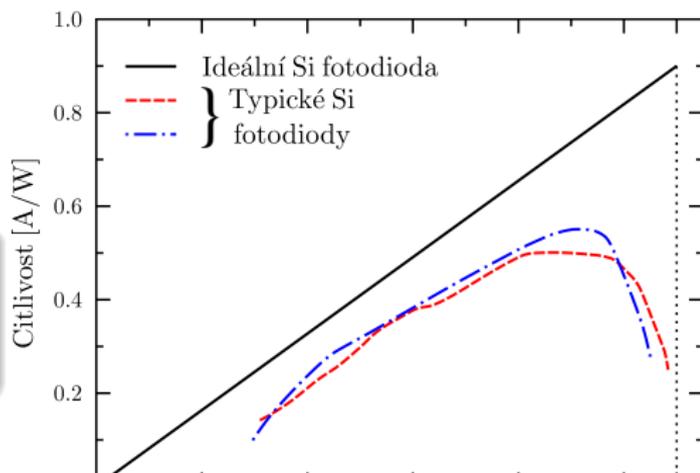
nepřímý zakázaný pás  $\rightarrow$   
maximum  $\mathcal{R}$  pro  $\lambda < \lambda_g$



# Vlastnosti p-i-n

## Citlivost

nepřímý zakázaný pás  $\rightarrow$   
maximum  $\mathcal{R}$  pro  $\lambda < \lambda_g$

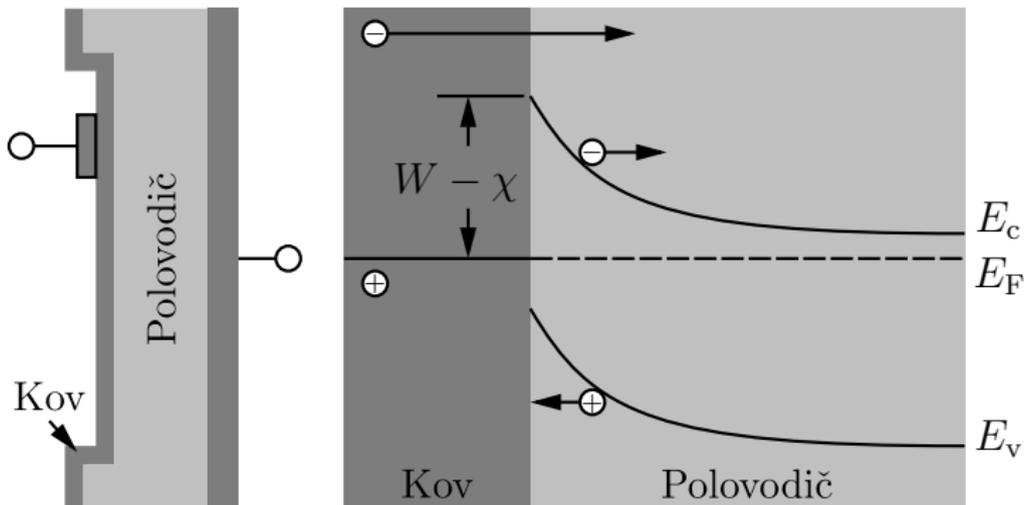


## Heterostruktury

- vrstva s větší šířkou zakázaného pásu – průhledné okénko
- AlGaAs/GaAs – 700-780 nm
- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  – 1.3-1.6  $\mu\text{m}$ ,  $\eta \sim 75\%$ ,  $\mathcal{R} \sim 0.9 \text{ A/W}$
- $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}$  – 3-17  $\mu\text{m}$ , noční vidění, komunikace

# Fotodiody s Schottkyho bariérou

- heteropřechod kovu a polovodiče, majoritní nosiče
- tenká ochuzená oblast poblíž povrchu – detekce krátkých  $\lambda$
- rychlá odezva (ps), malá  $RC$  konstanta (malý odpor kovu)



# Technické parametry komerčních fotodiod

$\lambda_{\mathcal{R}\max}$  pro maximum citlivosti

$R_L$  odporový bočník

$C$  kapacita přechodu

$U_b$  předpětí

$B$  šířka pásma,  $B = \frac{1}{2\pi R_L C}$

$U_{\text{out}}$  výstupní napětí  $U_{\text{out}} = \Phi_r \mathcal{R}(\lambda) R_L$

$I_d$  temný proud

NEP (*noise equivalent power*)

$$\text{NEP} = \frac{\Delta I_{\text{noise}}}{\mathcal{R}G} [\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

$I_{\text{noise}}$  šumový proud

(termální+temný+signální+ziskový)

$G$  zisk transimpedančního zesilovače

# Technické parametry komerčních fotodiód

$\lambda_{\mathcal{R}_{\max}}$  pro maximum citlivosti

$R_L$  odporový bočník

$C$  kapacita přechodu

$U_b$  předpětí

$B$  šířka pásma,  $B = \frac{1}{2\pi R_L C}$

$U_{\text{out}}$  výstupní napětí  $U_{\text{out}} = \Phi_r \mathcal{R}(\lambda) R_L$

$I_d$  temný proud

NEP (*noise equivalent power*)

$$\text{NEP} = \frac{\Delta I_{\text{noise}}}{\mathcal{R}G} \text{ [W}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

$I_{\text{noise}}$  šumový proud

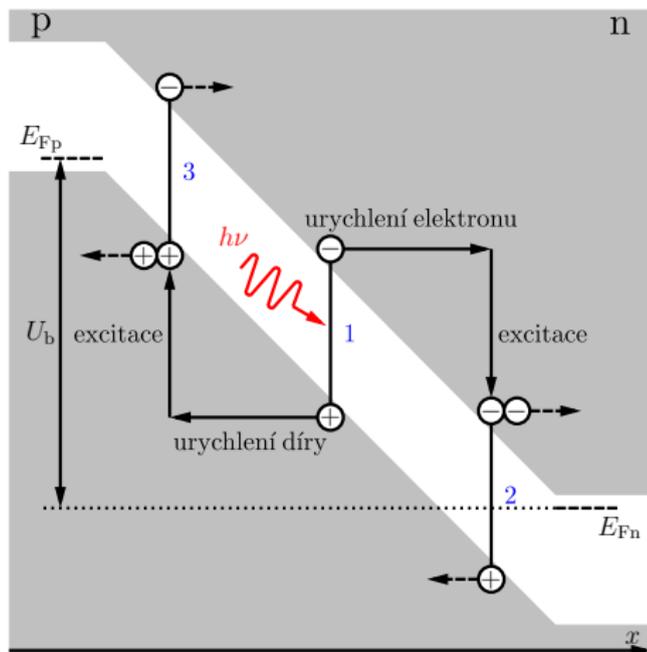
(termální+temný+signální+ziskový)

$G$  zisk transimpedančního zesilovače

- aktivní oblast
- rozsah detekovaných vlnových délek
- mez linearity
- práh zničení
- délka náběžné a úběžné hrany impulzu ( $t_r \approx 0.35/B$ )

# Lavinové fotodiody APD – *Avalanche photodiodes*

- nadprůrazné napětí na p-n přechodu
- urychlení nosičů náboje
- nárazová ionizace
- lavinové násobení nosičů náboje



# Koeficient ionizace a ionizační poměr

$\alpha_{e,h}$  koeficient ionizace elektronů a děr [ $\text{cm}^{-1}$ ]

- roste s elektrickým polem
- klesá s teplotou

# Koeficient ionizace a ionizační poměr

$\alpha_{e,h}$  koeficient ionizace elektronů a děr [ $\text{cm}^{-1}$ ]

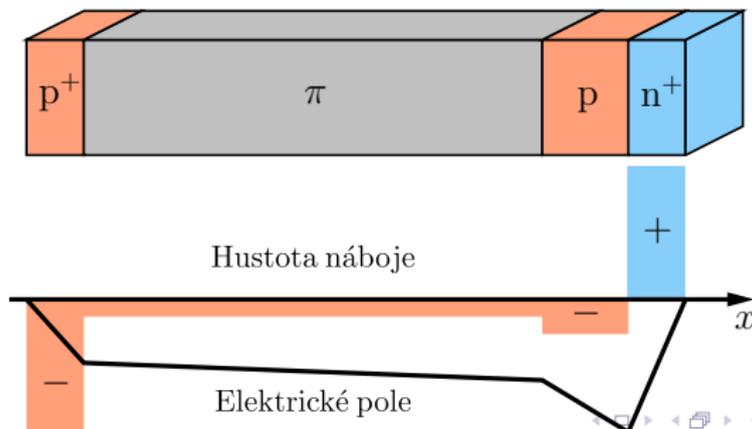
- roste s elektrickým polem
- klesá s teplotou

$\mathcal{K}$  ionizační poměr  $\mathcal{K} = \frac{\alpha_h}{\alpha_e}$

- $\alpha_h \ll \alpha_e$ ,  $\mathcal{K} \ll 1$ , excitují jen elektrony, lavina směrem k n
- $\alpha_h \gg \alpha_e$ ,  $\mathcal{K} \gg 1$ , excitují jen díry, lavina směrem k p
- $\alpha_h \approx \alpha_e$ ,  $\mathcal{K} \approx 1$ , excitují oba nosiče
  - větší zisk
  - delší odezva (menší šířka pásma  $B$ )
  - více šumový, nestabilní, možnost lokálního průrazu a poškození detektoru

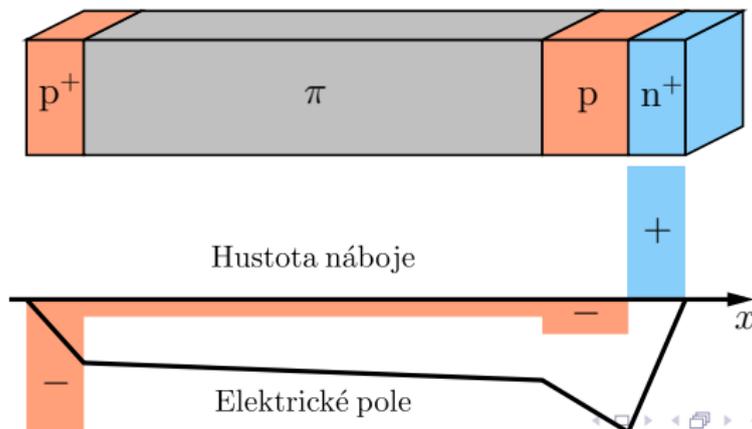
# SAM APD *Separate Absorption-Multiplication APD*

- u APD velikosti světlocitlivé plochy  $\times$  multiplikační oblasti
- z materiálů s malým  $\mathcal{K}$
- ve velké slabě dotované oblasti ( $\pi$ ) elektrické pole malé na nárazovou ionizaci – detekce
- úzká multiplikační oblast s velkým elektrickým polem – lavinové zesílení



# SAM APD *Separate Absorption-Multiplication APD*

- u APD velikosti světlocitlivé plochy  $\times$  multiplikační oblasti
- z materiálů s malým  $\mathcal{K}$
- ve velké slabě dotované oblasti ( $\pi$ ) elektrické pole malé na nárazovou ionizaci – detekce
- úzká multiplikační oblast s velkým elektrickým polem – lavinové zesílení



# Zisk APD

- $\mathcal{K} = 0 \rightarrow j_e(x) = j_e(0)e^{\alpha_e x}$

$$G = e^{\alpha_e d}$$

$$j_e(x) + j_h(x) = \text{konst.}$$

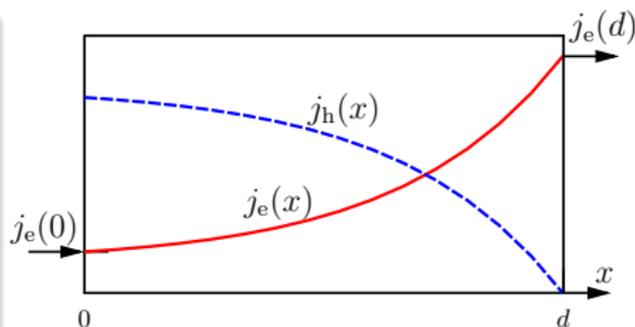
- multiplikace elektronů i děr

$$G = \frac{1 - \mathcal{K}}{e^{-(1-\mathcal{K})\alpha_e d} - \mathcal{K}}$$

- $\mathcal{K} = 1 \rightarrow G = \frac{1}{1 - \alpha_e d}$

pro  $\alpha_e d = 1$  je  $G = \infty$

→ nestabilní situace, možnost zničení detektoru



# Zisk APD

- $\mathcal{K} = 0 \rightarrow j_e(x) = j_e(0)e^{\alpha_e x}$

$$G = e^{\alpha_e d}$$

$$j_e(x) + j_h(x) = \text{konst.}$$

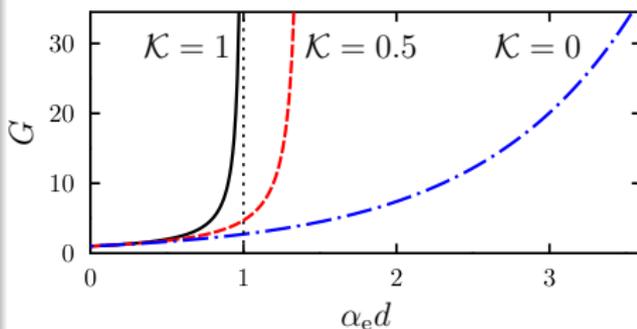
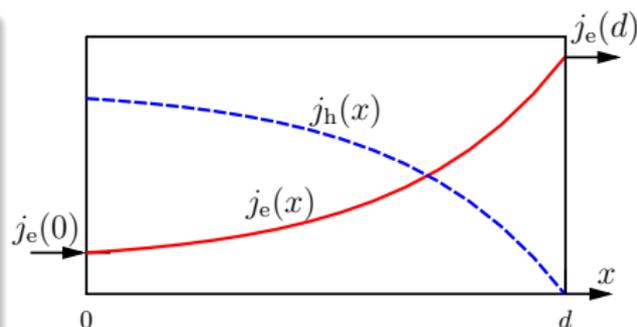
- multiplikace elektronů i děr

$$G = \frac{1 - \mathcal{K}}{e^{-(1-\mathcal{K})\alpha_e d} - \mathcal{K}}$$

- $\mathcal{K} = 1 \rightarrow G = \frac{1}{1 - \alpha_e d}$

pro  $\alpha_e d = 1$  je  $G = \infty$

→ nestabilní situace, možnost zničení detektoru



# Zisk APD

- $\mathcal{K} = 0 \rightarrow j_e(x) = j_e(0)e^{\alpha_e x}$

$$G = e^{\alpha_e d}$$

$$j_e(x) + j_h(x) = \text{konst.}$$

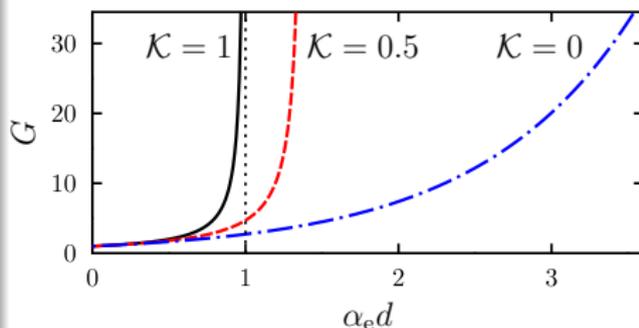
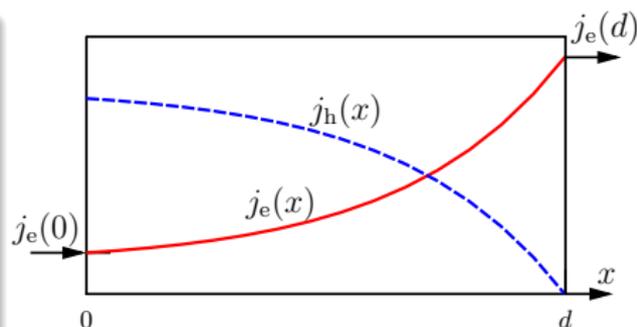
- multiplikace elektronů i děr

$$G = \frac{1 - \mathcal{K}}{e^{-(1-\mathcal{K})\alpha_e d} - \mathcal{K}}$$

- $\mathcal{K} = 1 \rightarrow G = \frac{1}{1 - \alpha_e d}$

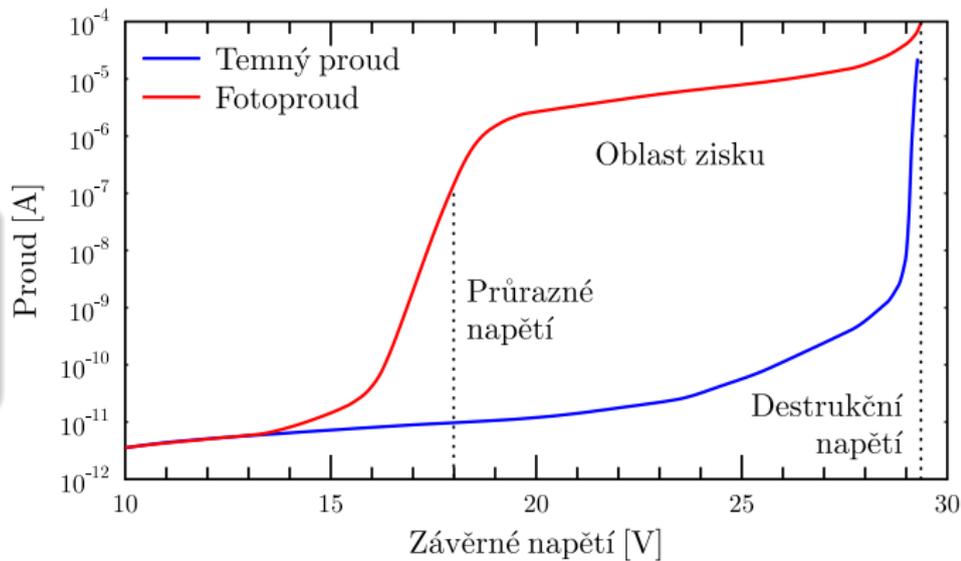
pro  $\alpha_e d = 1$  je  $G = \infty$

→ nestabilní situace, možnost zničení detektoru



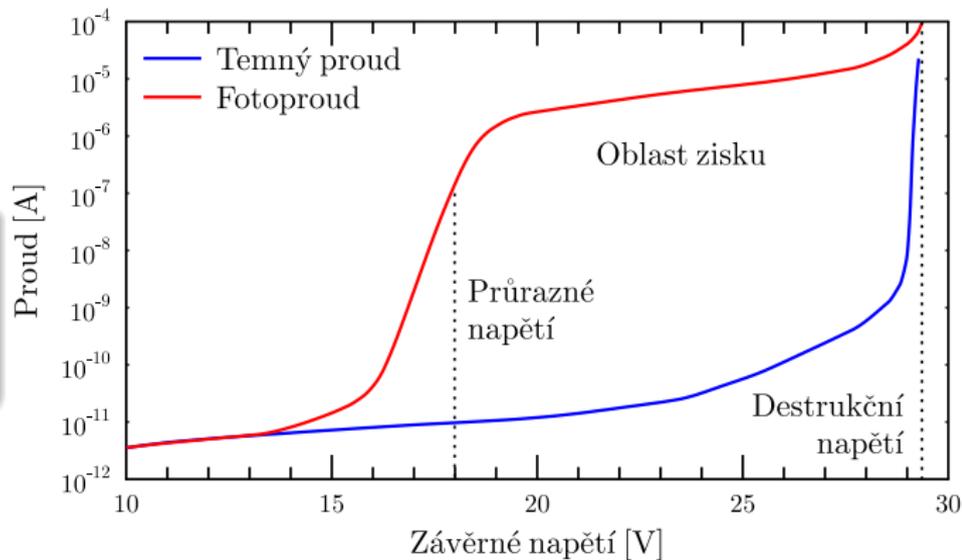
## Citlivost APD

$$\mathcal{R} = \frac{\eta Ge}{h\nu}$$



## Citlivost APD

$$\mathcal{R} = \frac{\eta Ge}{h\nu}$$



## Materiály

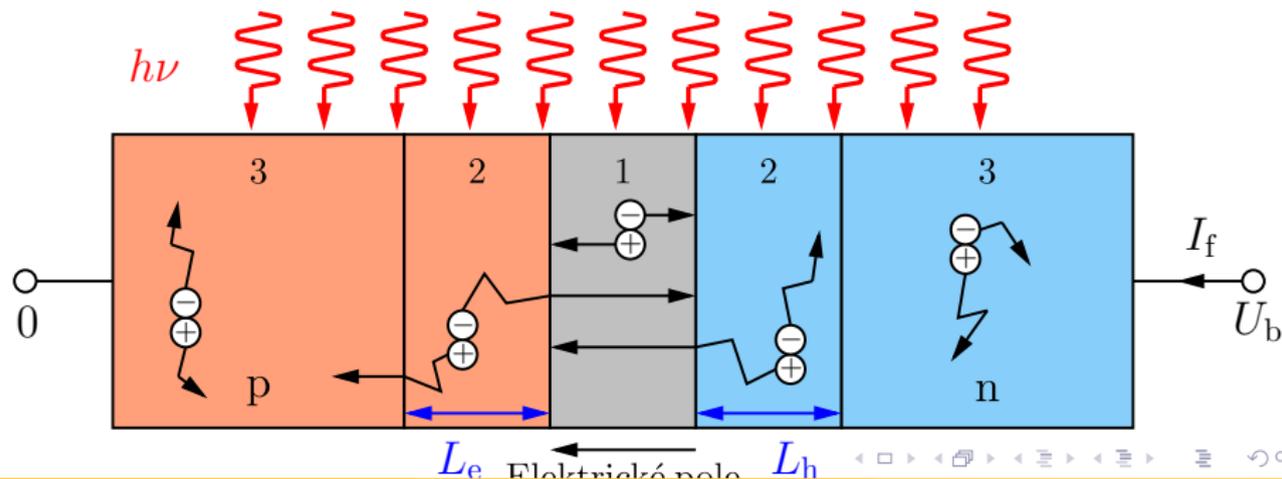
podobně jako u p-i-n fotodiod

Si 700-900 nm,  $\mathcal{K}$  mezi 0.1 a 0.2 ale i 0.006

InGaAs 1.3-1.6  $\mu\text{m}$ , větší  $\mathcal{K}$  i citlivost, střední šum,  
pracovní napětí  $10^5$  V/cm

# Doba odezvy APD

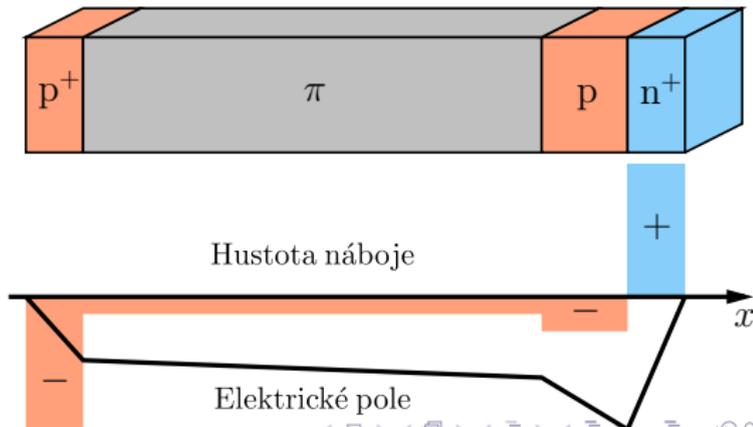
- 1 doba průchodu ochuzenou vrstvou šířky  $d_0$
- 2 doba driftu poblíž ochuzené vrstvy
- 3  $RC$  konstanta
- 4 charakteristická doba lavinového násobení  $\tau_m$



# Doba odezvy APD

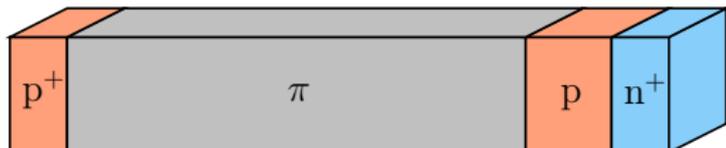
- 1 doba průchodu ochuzenou vrstvou šířky  $d_o$
- 2 doba driftu poblíž ochuzené vrstvy
- 3  $RC$  konstanta
- 4 **charakteristická doba lavinového násobení  $\tau_m$**

$$\tau_{e,h} = \frac{d_o}{v_e} + \frac{d_o}{v_h} + \tau_m$$

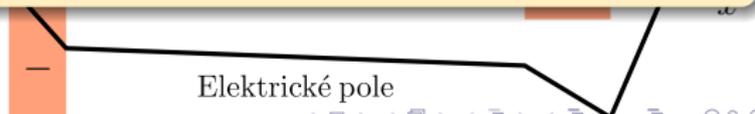


# Doba odezvy APD

- 1 doba průchodu ochuzenou vrstvou šířky  $d_0$
- 2 doba driftu poblíž ochuzené vrstvy
- 3  $RC$  konstanta
- 4 **charakteristická doba lavinového násobení  $\tau_m$**

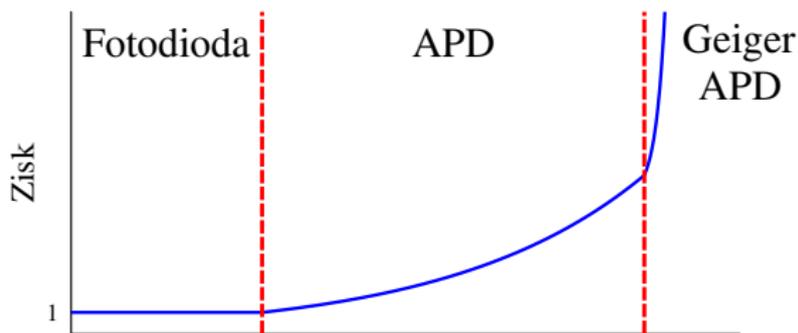


- $\mathcal{K} = 0 \rightarrow \tau_m \leq \frac{d_m}{v_e} + \frac{d_m}{v_h}, \quad d_m \text{ šířka multiplikační oblasti}$
- $0 < \mathcal{K} < 1 \text{ a } G \gg 1 \rightarrow \tau_m \approx \frac{G\mathcal{K}d_m}{v_e} + \frac{d_m}{v_h}$



# APD v Geigerově módu – jednofotonové APD

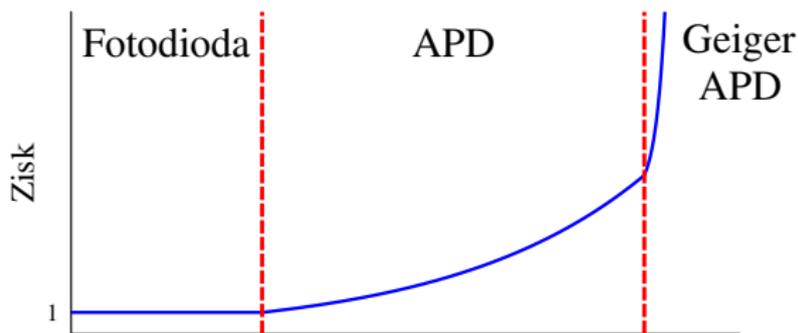
- vysoké závěrné napětí, dopad fotonu → velká lavina, která by zničila detektor, nutné aktivní či pasivní zhášení
- dokáží zaznamenat dopad jednotlivých fotonů
- pro zobrazování, navádění satelitů, kvantová informatika
- binární – dopadl foton × nedopadl foton
- samovolná (temná) detekce termální excitací nebo *afterpulse*



Závěrné napětí

# APD v Geigerově módu – jednofotonové APD

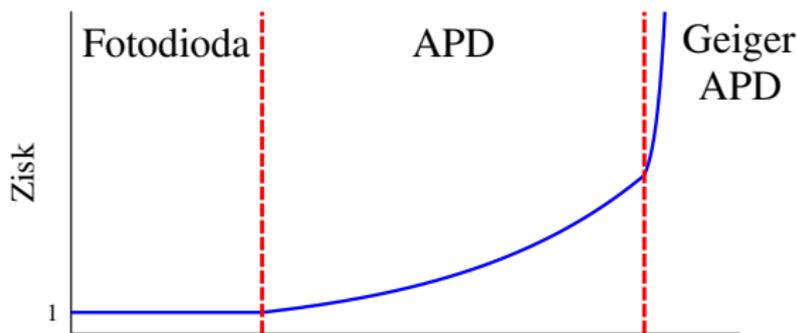
- vysoké závěrné napětí, dopad fotonu → velká lavina, která by zničila detektor, nutné aktivní či pasivní zhášení
- dokáží zaznamenat dopad jednotlivých fotonů
- pro zobrazování, navádění satelitů, kvantová informatika
- binární – dopadl foton × nedopadl foton
- samovolná (temná) detekce termální excitací nebo *afterpulse*



Závěrné napětí

# APD v Geigerově módu – jednofotonové APD

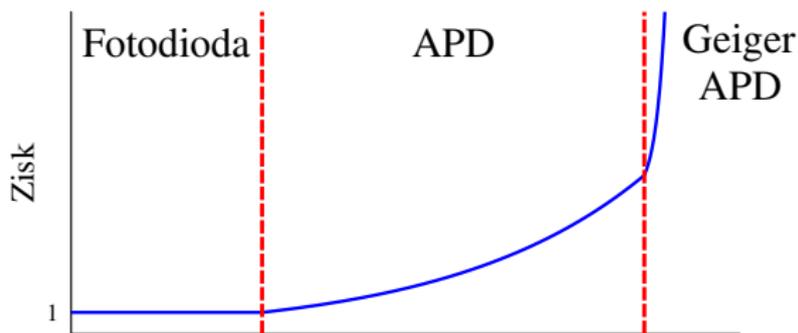
- vysoké závěrné napětí, dopad fotonu → velká lavina, která by zničila detektor, nutné aktivní či pasivní zhášení
- dokáží zaznamenat dopad jednotlivých fotonů
- pro zobrazování, navádění satelitů, kvantová informatika
- binární – dopadl foton × nedopadl foton
- samovolná (temná) detekce termální excitací nebo *afterpulse*



Závěrné napětí

# APD v Geigerově módu – jednofotonové APD

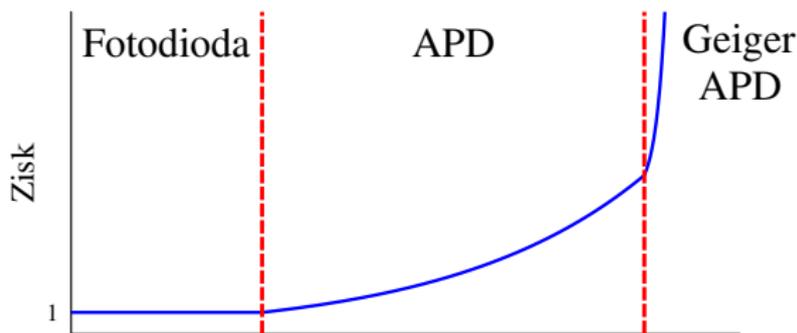
- vysoké závěrné napětí, dopad fotonu  $\rightarrow$  velká lavina, která by zničila detektor, nutné aktivní či pasivní zhášení
- dokáží zaznamenat dopad jednotlivých fotonů
- pro zobrazování, navádění satelitů, kvantová informatika
- binární – dopadl foton  $\times$  nedopadl foton
- samovolná (temná) detekce termální excitací nebo *afterpulse*



Závěrné napětí

## APD v Geigerově módu – jednofotonové APD

- vysoké závěrné napětí, dopad fotonu  $\rightarrow$  velká lavina, která by zničila detektor, nutné aktivní či pasivní zhášení
- dokáží zaznamenat dopad jednotlivých fotonů
- pro zobrazování, navádění satelitů, kvantová informatika
- binární – dopadl foton  $\times$  nedopadl foton
- samovolná (temná) detekce termální excitací nebo *afterpulse*



Závěrné napětí

## Materiály jednofotonových APD

Si 0.4-1  $\mu\text{m}$ ,  $\eta_{\text{max}} \approx 75\%$ , temné detekce  $< 50 \text{ s}^{-1}$ ,  
rychlé (50 ns aktivní zhášení)

InGaAs/InP 1.3-1.6  $\mu\text{m}$ ,  $\eta_{\text{max}} \approx 20\%$ , temné detekce  $5\,000 \text{ s}^{-1}$ ,  
pomalejší

- Ge a Si-Ge pro telekomunikační oblast 1.3-1.6  $\mu\text{m}$
- pro IČ do 4  $\mu\text{m}$  detektor s absorpční oblastí z InAsSb, multiplikační oblast z AlGaAsSb na substrátu z GaSb
- GaN a SiC pro UV, SiC odolný velkým teplotám a nehostinnému prostředí
- lepší kvantová účinnost na úkor opakovací frekvence