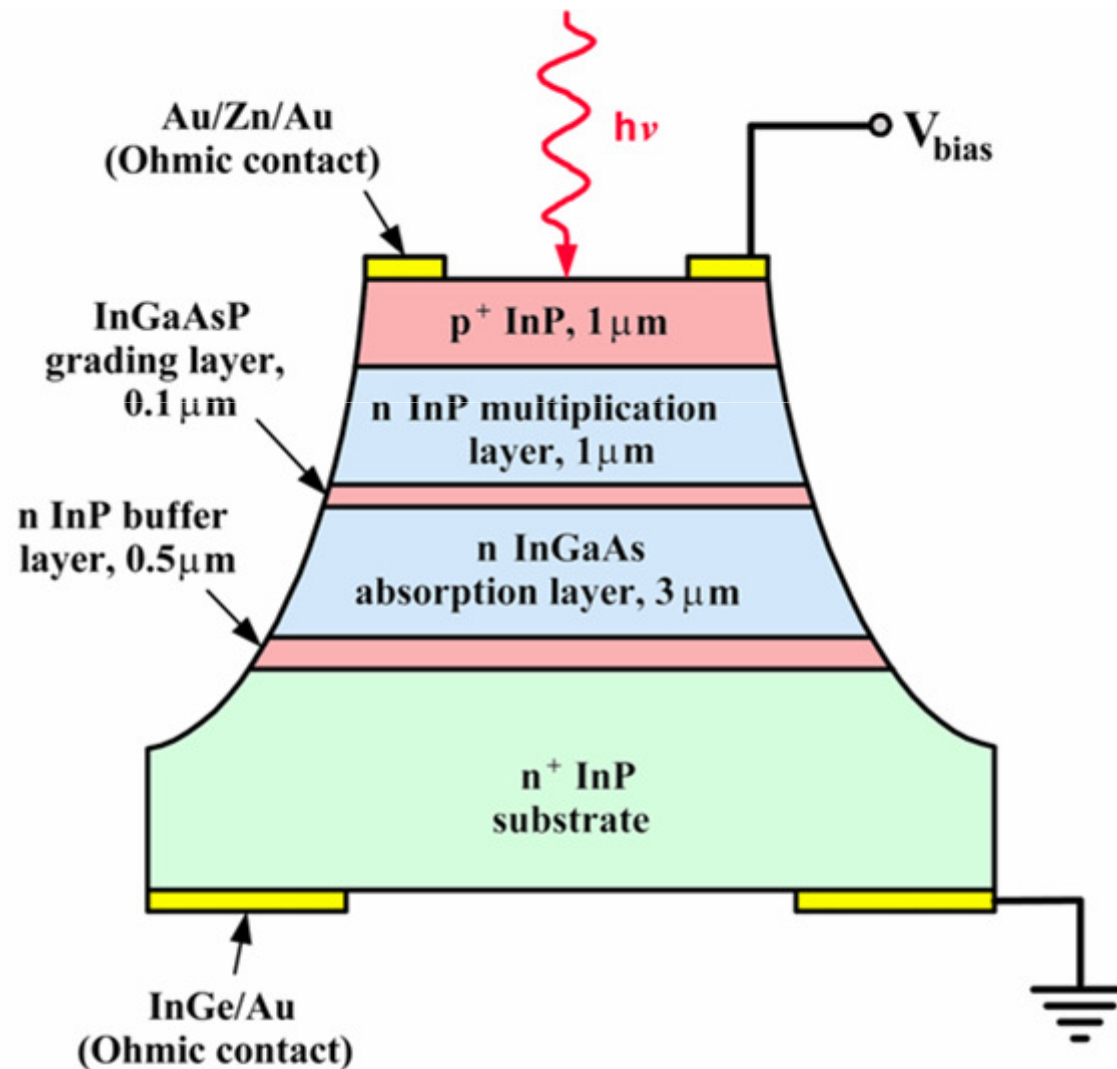


Fotodetektorji



Mobitel d.d.,
izobraževanje

18. 6. 2010,
predavanje 13

Prof. dr. Jožko
Budin

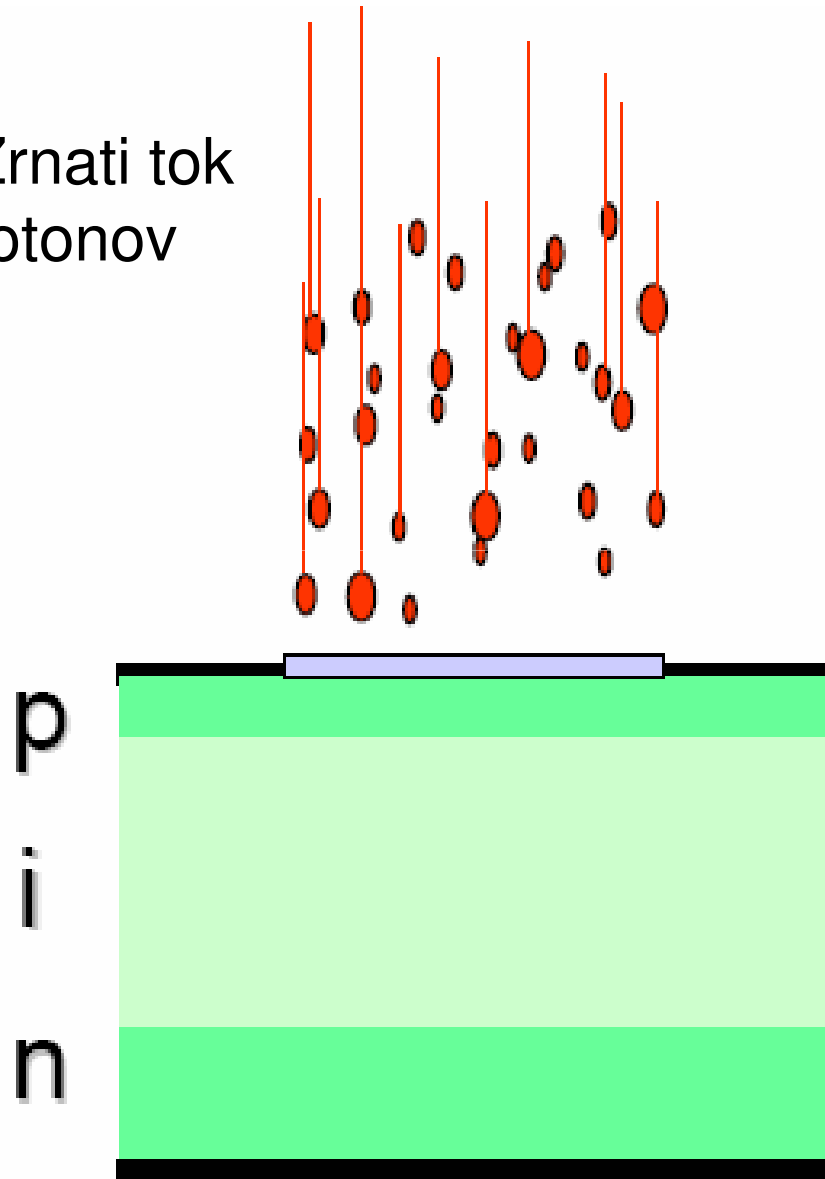
Vsebina

1. Poissonova porazdelitev verjetnosti
2. Stik polprevodnikov p-n in p-i-n
3. Materiali
4. Absorpcija, fotoionizacija, udarna ionizacija
5. Difuzija in drsenje elektronov ter vrzeli
6. Fotodiode PIN
7. Kvantni izkoristek in odzivnost diode
8. Šumi fotodiode PIN
9. Plazovna dioda APD
10. Šumi plazovne diode APD
11. Plazovna dioda SAM-APD
12. Razmerje S/N

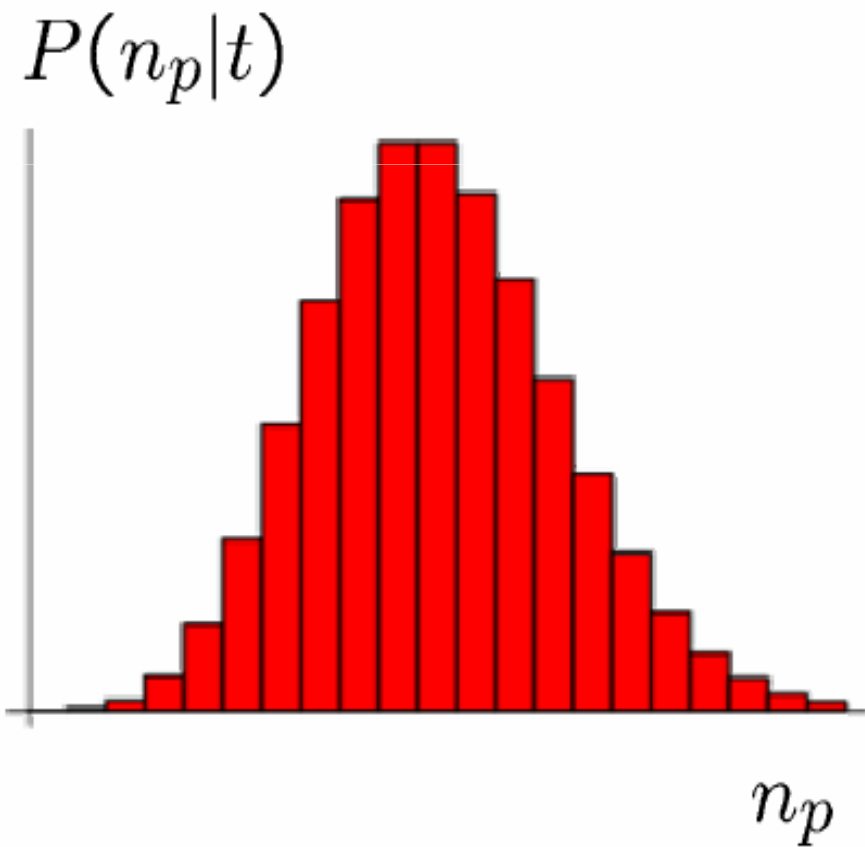
Uvod

Zrnati šum

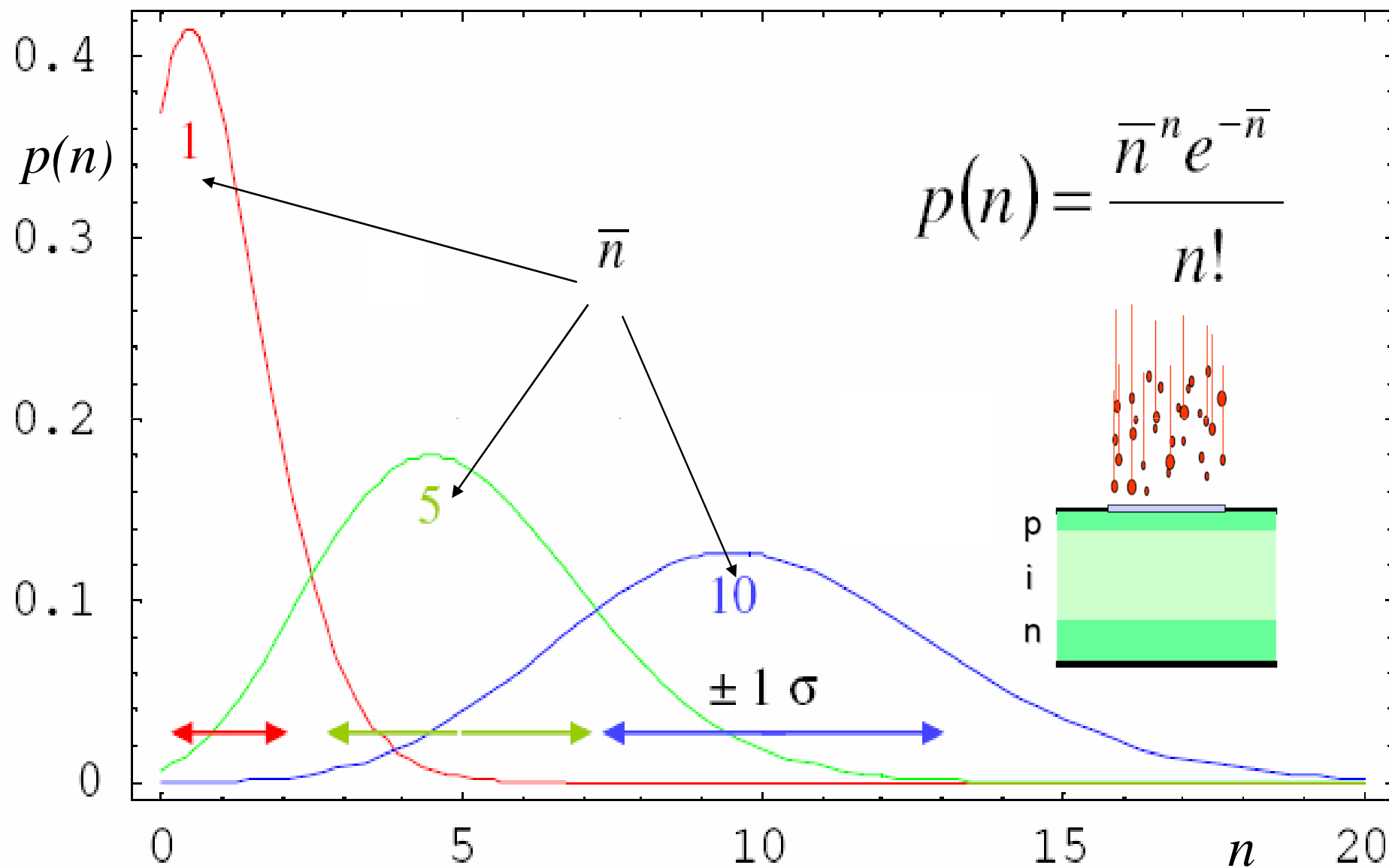
Zrnati tok
fotonov



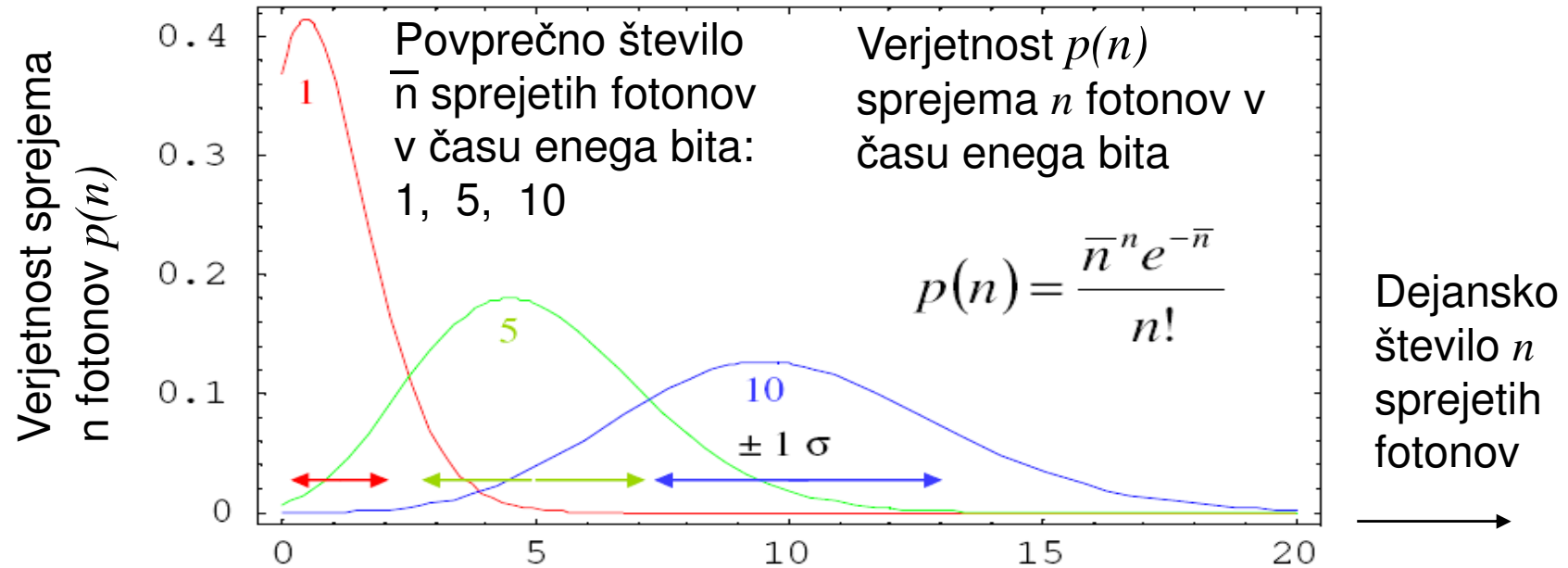
Porazdelitev verjetnosti prihoda
 n_p fotonov ob času t (v intervalu
 Δt)



Poissonova porazdelitev



Lastnosti Poissonove statistike



$$\sigma_n \equiv \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (n - \bar{n})^2 p(n)} = \sqrt{\bar{n}}$$

Standardna deviacija števila sprejetih fotonov

$$SNR_{optično} \equiv \frac{\bar{n}}{\sigma_n} = \frac{\bar{n}}{\sqrt{\bar{n}}} = \sqrt{\bar{n}}$$

Optično razmerje signal/šum

$$SNR_{električno} \equiv SNR_{optično}^2 = \bar{n}$$

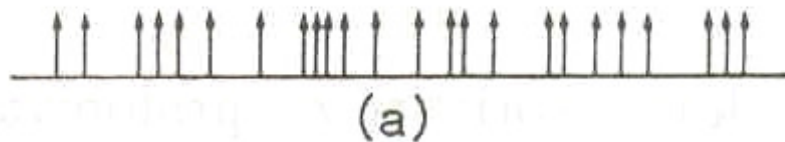
Električno razmerje signal/šum

$$SNR_{optično} = 1 \quad \text{sledi} \quad \bar{n} = 1$$

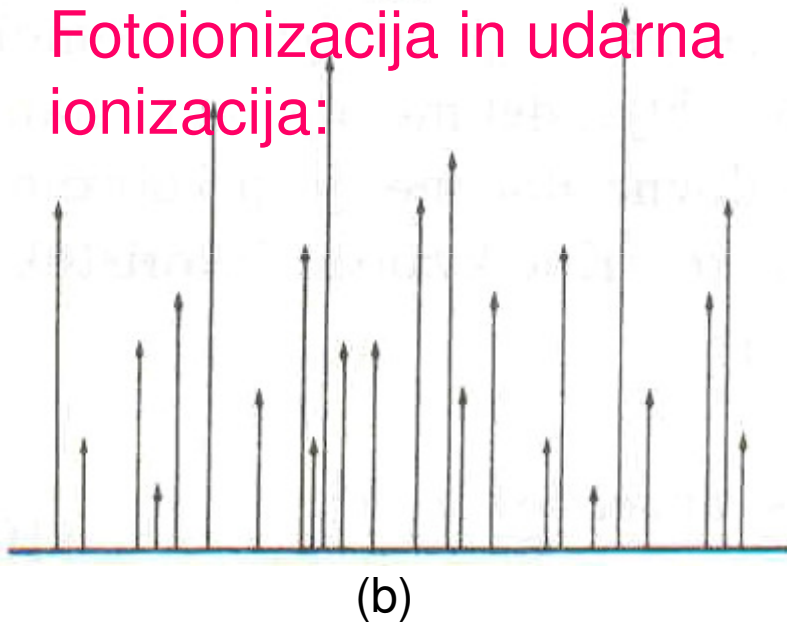
Povprečno število fotonov/bit pri $SNR = 1$

Poissonovi procesi

Fotoionizacija:

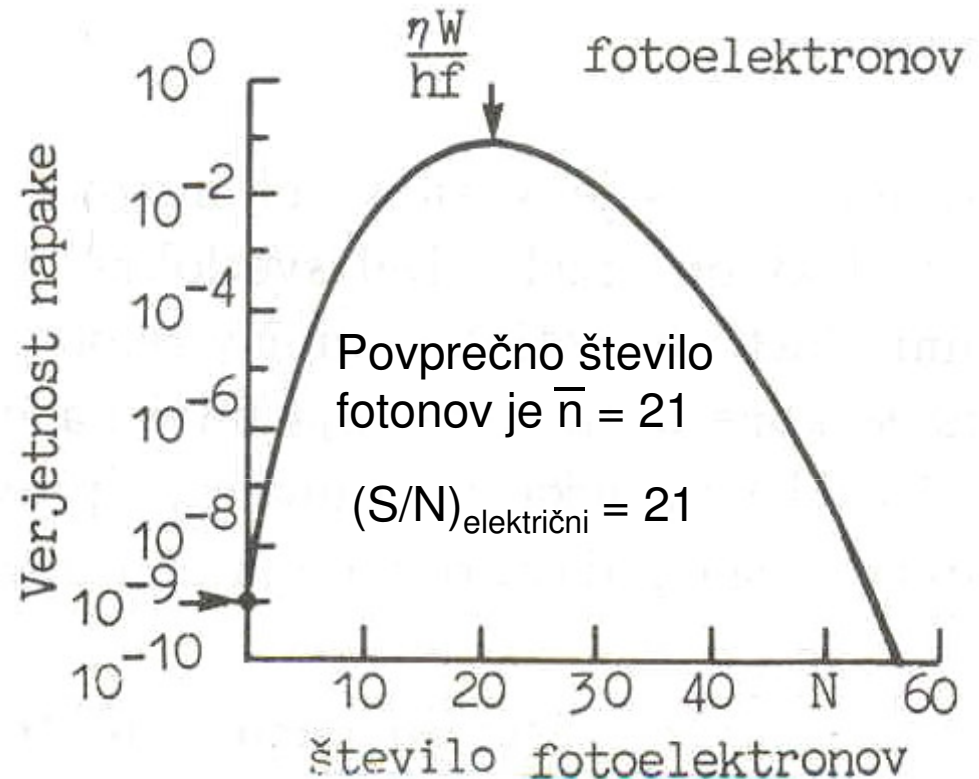


Fotoionizacija in udarna ionizacija:



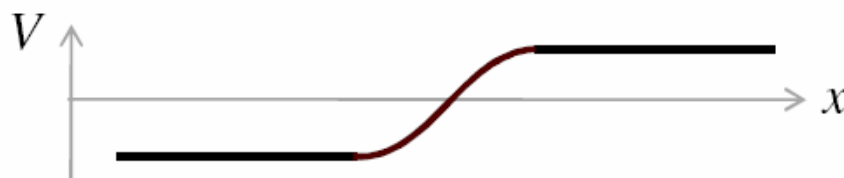
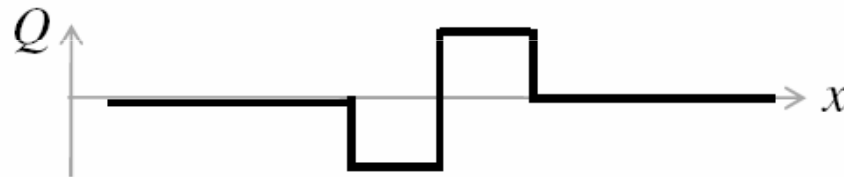
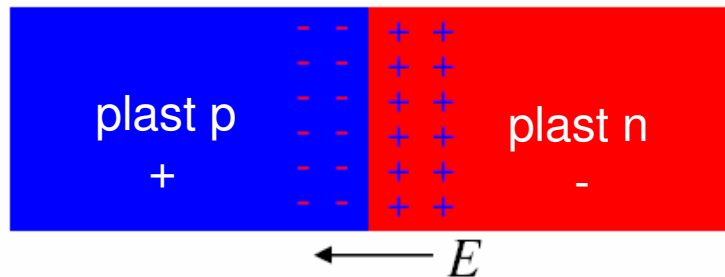
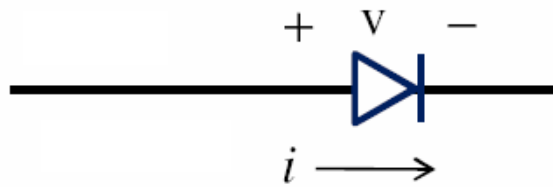
(a) verjetnost fotodetekcije

(b) verjetnost fotomultiplikacije



Verjetnost nastanka fotoelektronov pri povprečnem številu 21 fotonov: največja verjetnost je 21; verjetnost 0 fotoelektronov je 10^{-9} (verjetnost napake, BER)

Lastnost p-n stične plasti



Prosti elektroni v plasti n
in proste vrzeli v plasti p

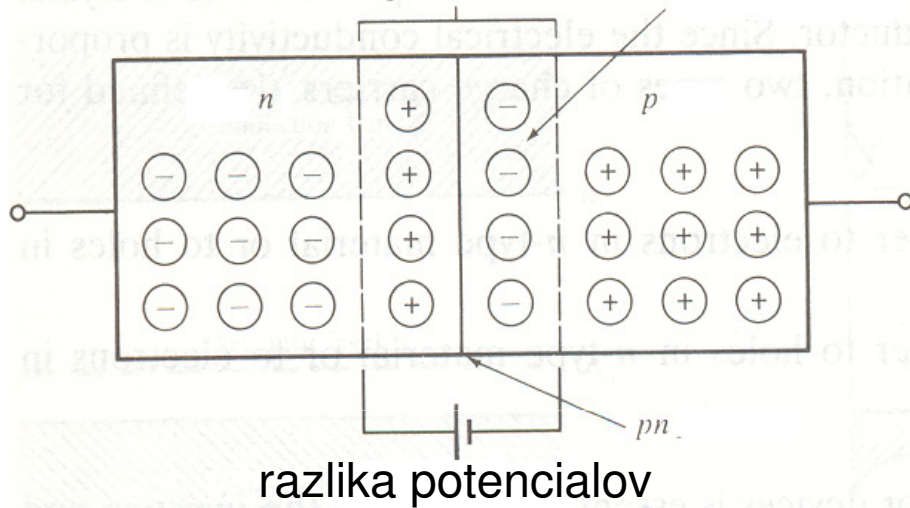
Naboji se z difuzijo naselijo
na obeh straneh stične plasti

Povzročijo električno polje in
naredijo potencialno bariero, ki
preprečuje nadaljno difuzijo

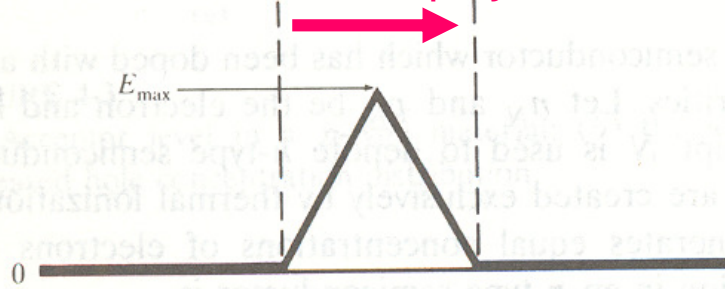
Plast p (anoda) je na nižjem
potencialu kot plast n (katoda)

Fotodetektor p-n

Področje
prostorskega naboja

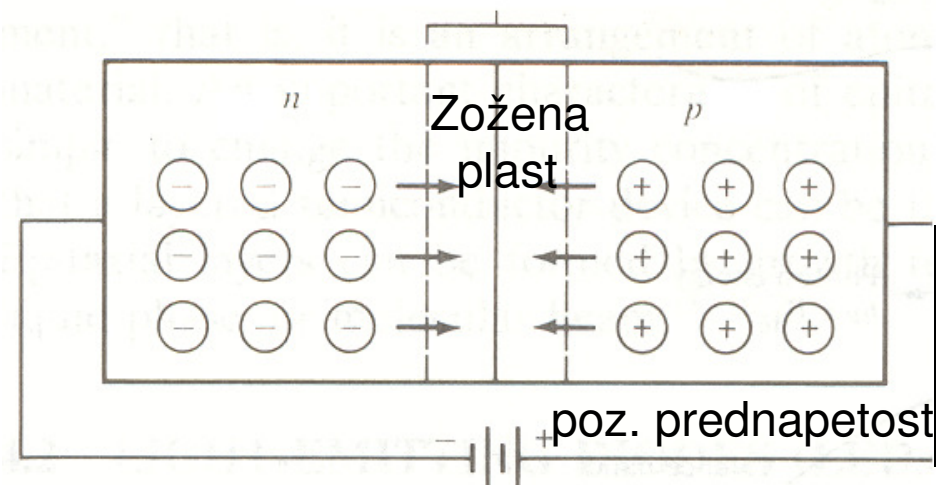
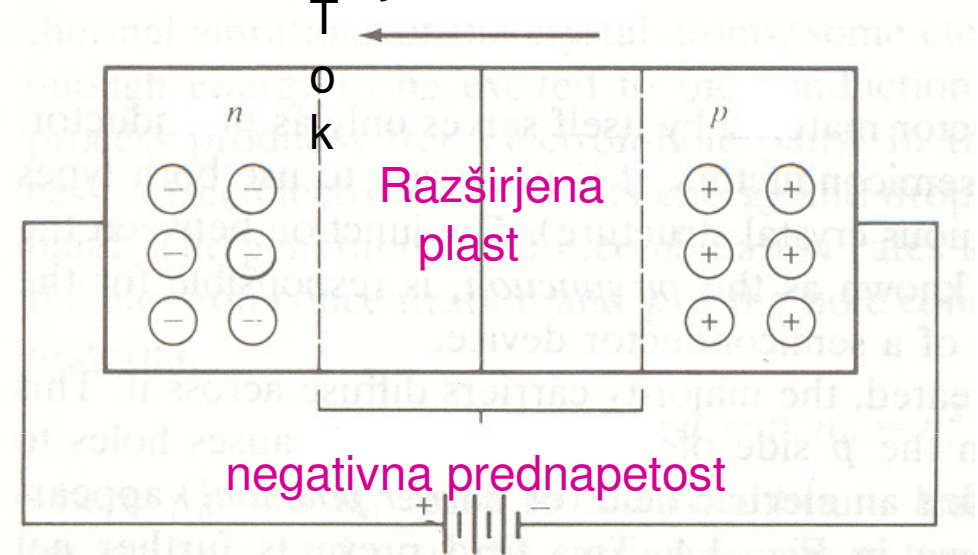


Električno polje

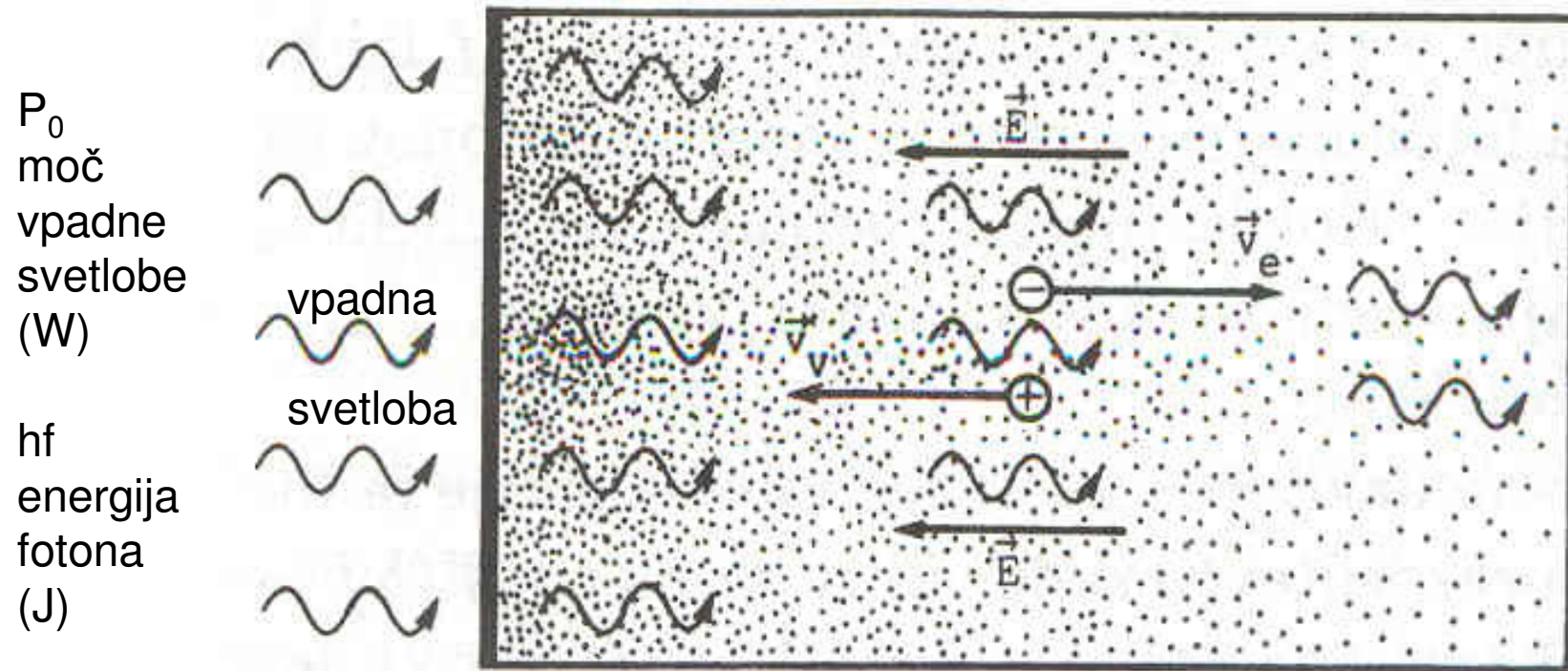


Potencialna bariera

Tok manjšinskih nosilcev



Fotoionizacija v polprevodniku



(a) Gostota pik ponazarja pojemajočo gostoto fotonov zaradi pojava fotoionizacije (tvorbe parov elektron-vrzel) v snovi fotodetektorja in delno absorpcije v snovi.

Kvantni izkoristek:

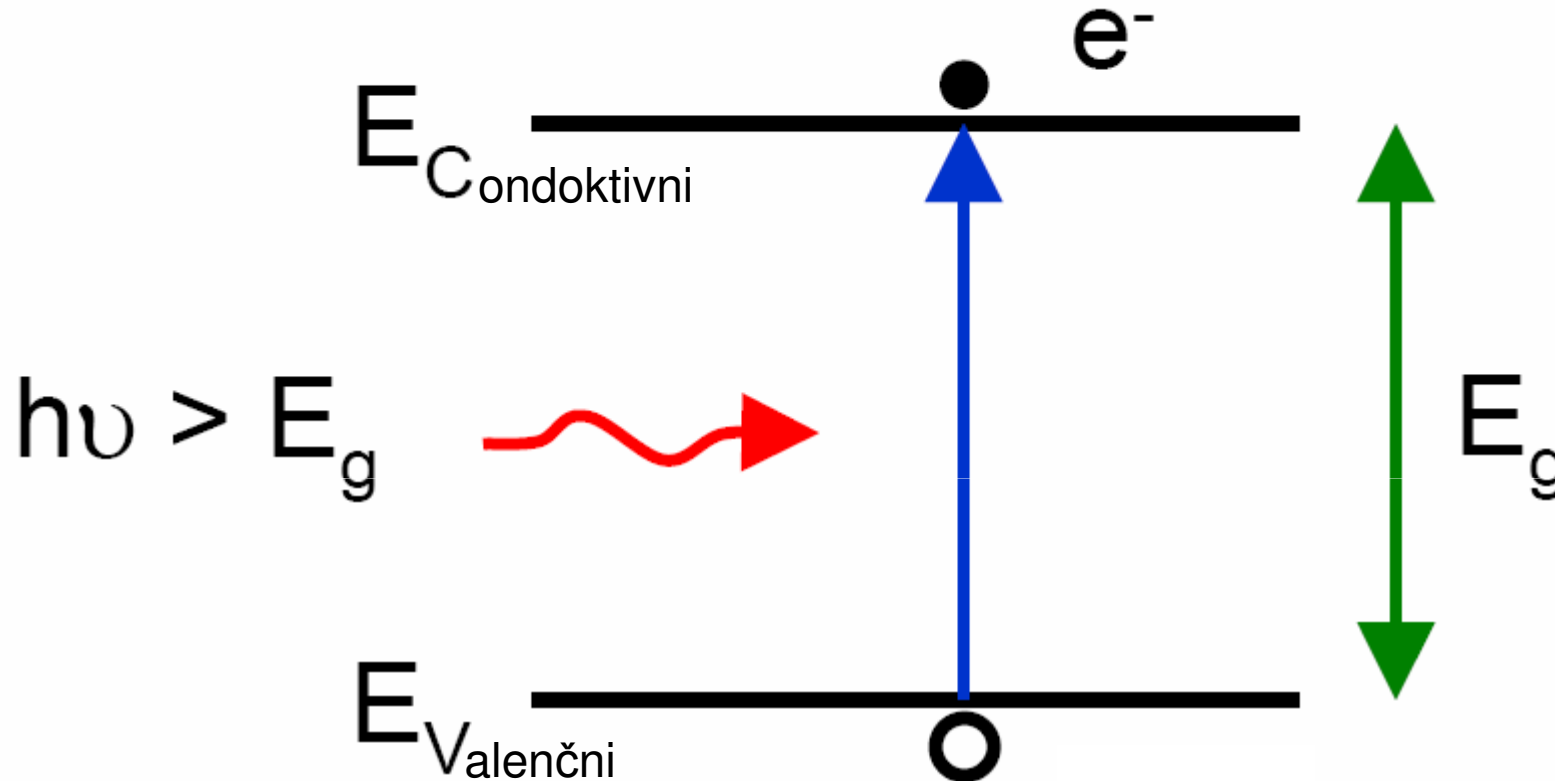
$$\eta = \frac{\text{število parov elektron - vrzel}}{\text{število vpadnih fotonov}} = \frac{I/|e|}{P_0/hf}$$

Vzroki:

- odboj
- absorpcija

Fotoionizacija

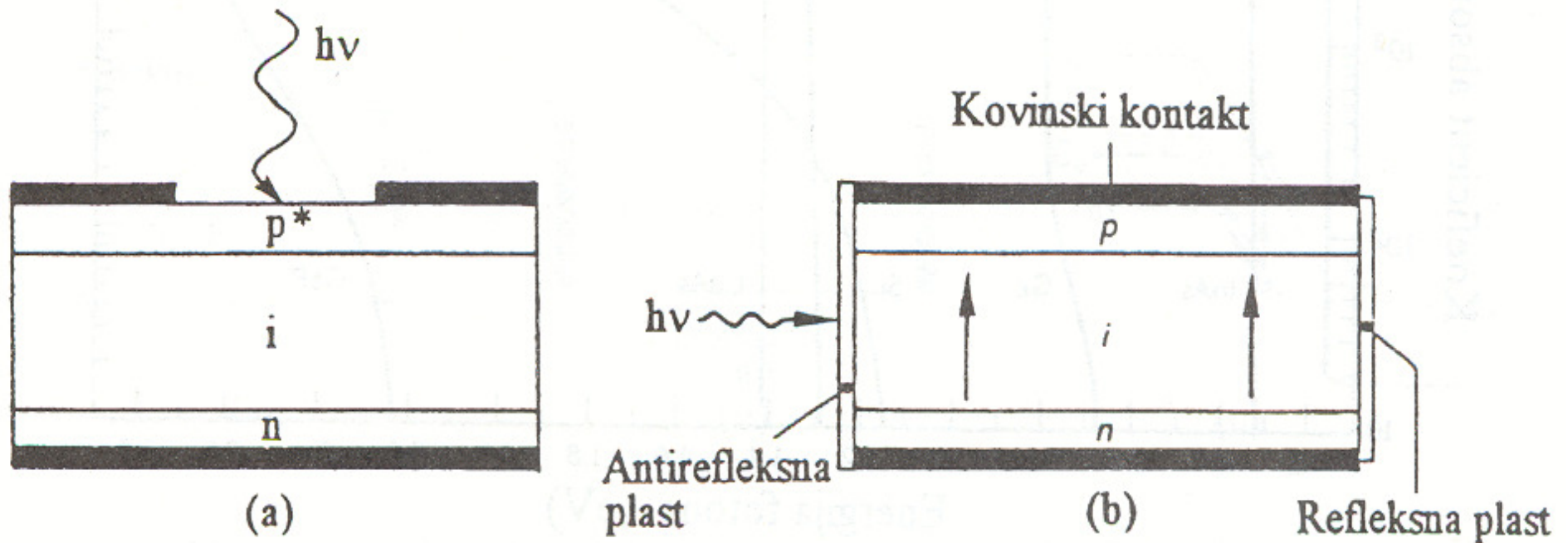
Princip fotodetekcije je fotoionizacija (fotoefekt, A. Einstein, 1905)



Foton, ki ima večjo (ali enako) energijo, kot je energija energijskega pasu polprevodnika, lahko spodbudi elektron v valenčnem pasu za prehod v prevodni pas. S tem nastane ioniziran par elektron–vrzel. Enačba fotoionizacije:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} \mu\text{m}$$

Čelni in stranski način fotoionizacije

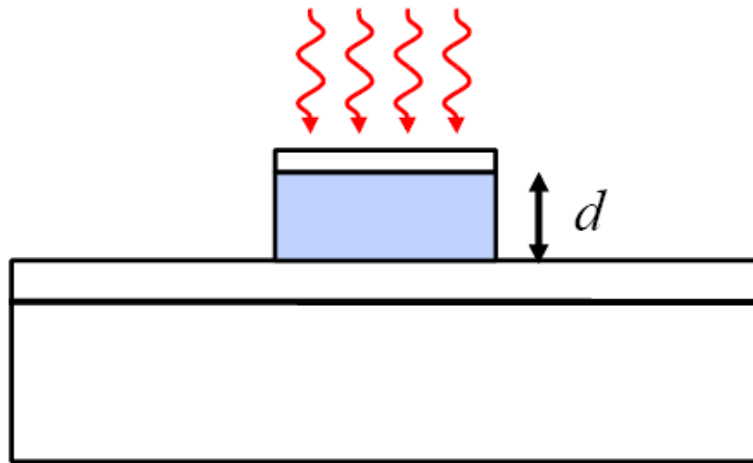


Čelni način

Stranski način

i – intrinzična, osiromašena, izpraznjena plast (depleted)

Čelna in stranska osvetlitev diode

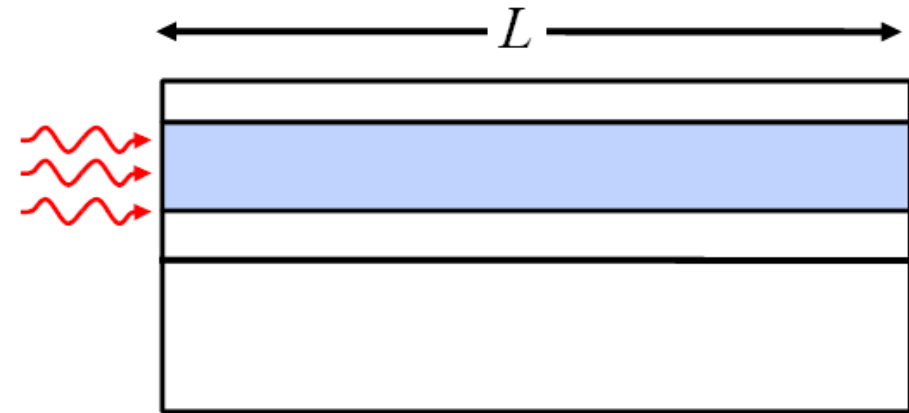


$$\eta = \eta_i(1 - R)(1 - e^{-\alpha d})$$

η_i : Notranji kvantni izkoristek

R : Odbojnost po moči na meji

d : Debelina plasti



$$\eta = \eta_i(1 - R)(1 - e^{-\Gamma\alpha L})$$

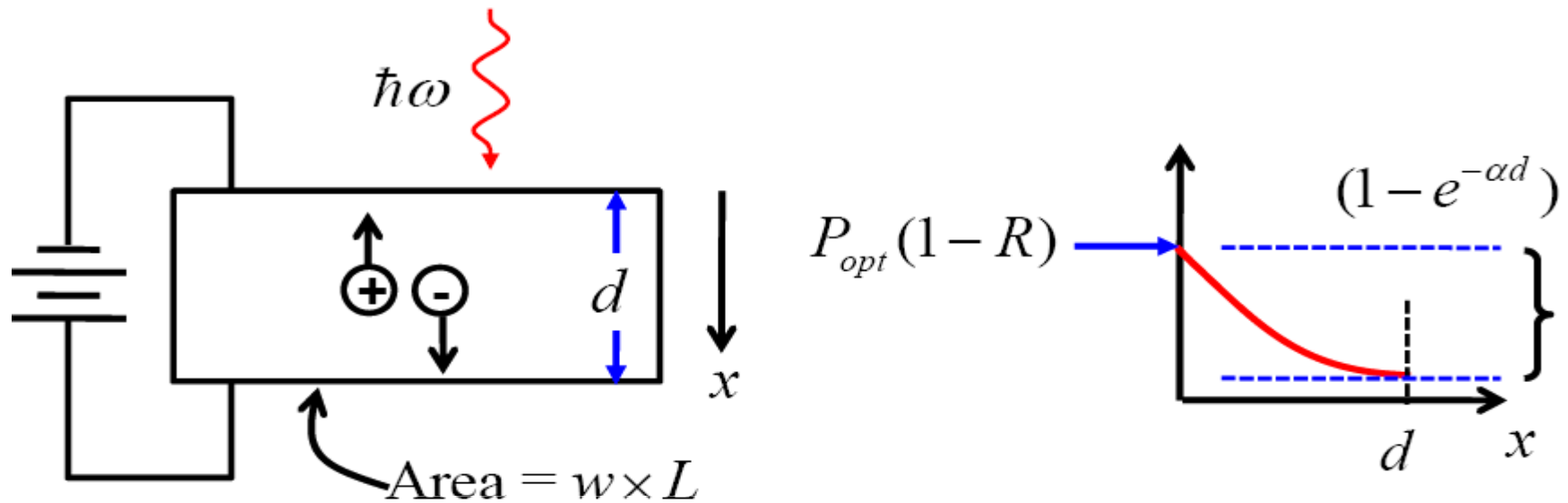
η_i : Notranji kvantni izkoristek

R : Odbojnost po moči na

Γ : vhodu

L : Dolžina

Izkoristek svetlobe



$$G_0 = \eta \frac{P_{opt}}{\hbar\omega} \frac{1}{lwd} \left[\frac{1}{\text{cm}^3 \text{s}} \right]$$

$$\eta = \eta_i (1 - R) (1 - e^{-\alpha d})$$

R :

α :

d :

Izkoriščenost fotonov

Izkoristek svetlobne moči

Odbojnost moči na meji

Koeficient slabljenja

Dolžina absorpcijske poti

Fotodetektorji

- 1. Dioda PIN
- 1. Dioda APD
- 1. Dioda SAM-APD
- 1. Dioda na kvantno jamo

Dioda PIN

Karakteristike PIN diode

- Vrste običajnih PIN diod

Parameter	Oznaka	Enota	Si	Ge	InGaAs
Valovna dolžina	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Odzivnost	R	A/W	0.4–0.6	0.5–0.7	0.6–0.9
Kvantni izkoristek	η	%	75–90	50–55	60–70
Temni tok	I_d	nA	1–10	50–500	1–20
Dvižni čas	T_r	ns	0.5–1	0.1–0.5	0.02–0.5
Frekvenčni pas	Δf	GHz	0.3–0.6	0.5–3	1–10
Prednapetost	V_b	V	50–100	6–10	5–6

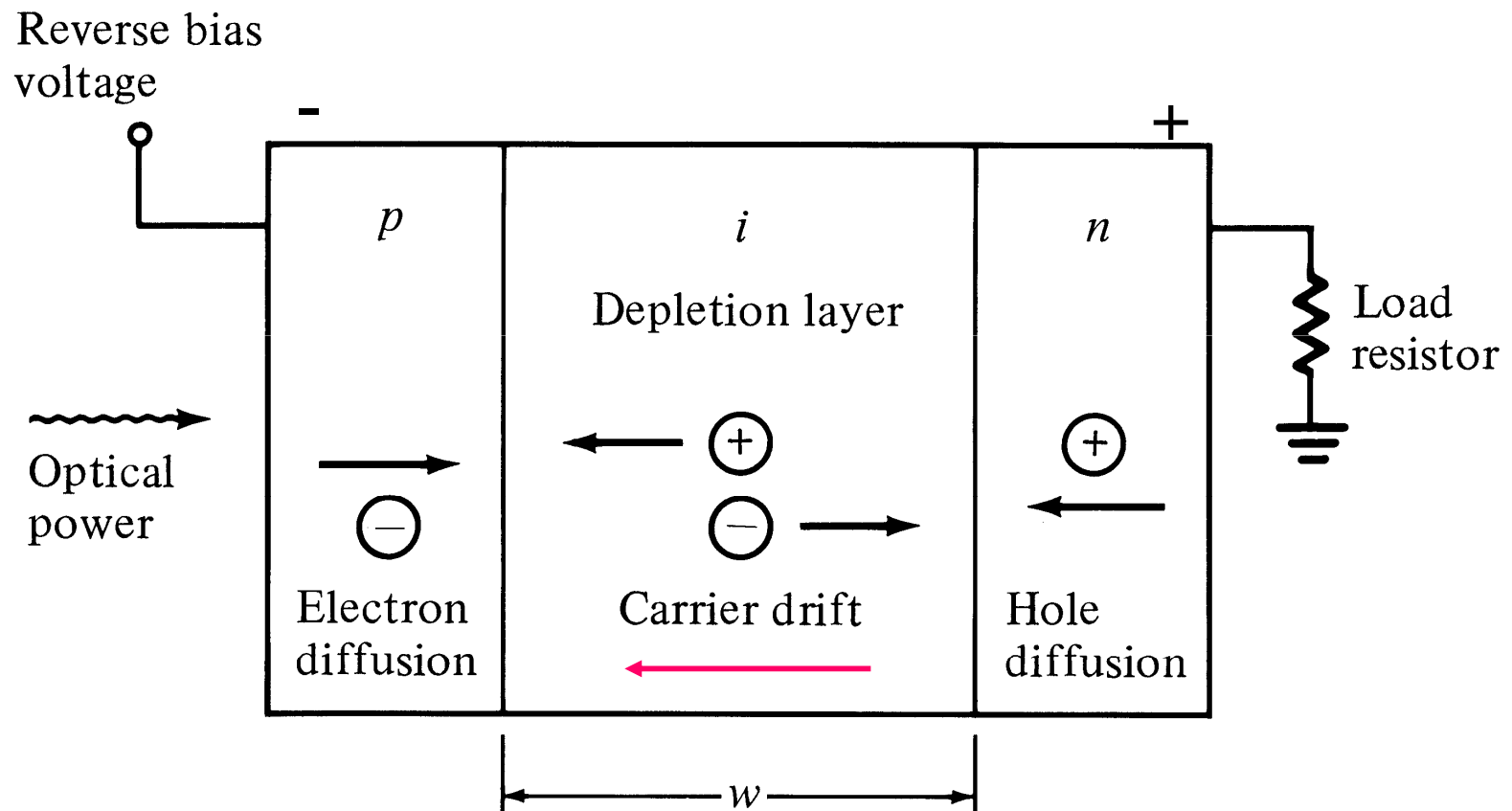
$$\eta = \frac{\text{število parov elektron - vrzel}}{\text{število vpadnih fotonov}} = \frac{I/|e|}{P_o/hf}$$

Kvantni izkoristek

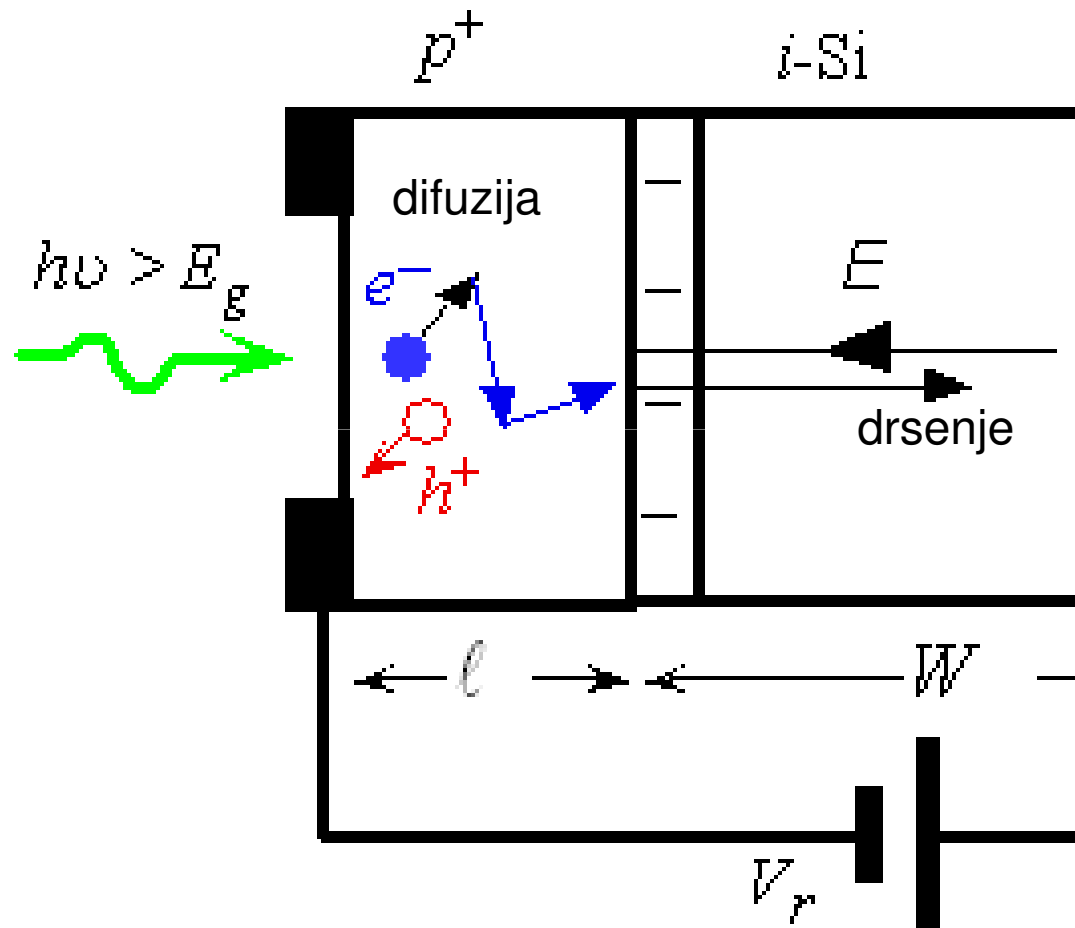
$$\mathfrak{R} = \frac{I_P}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad [\text{A/W}]$$

Odzivnost diode
(responsivity)

Načini premikanja delcev

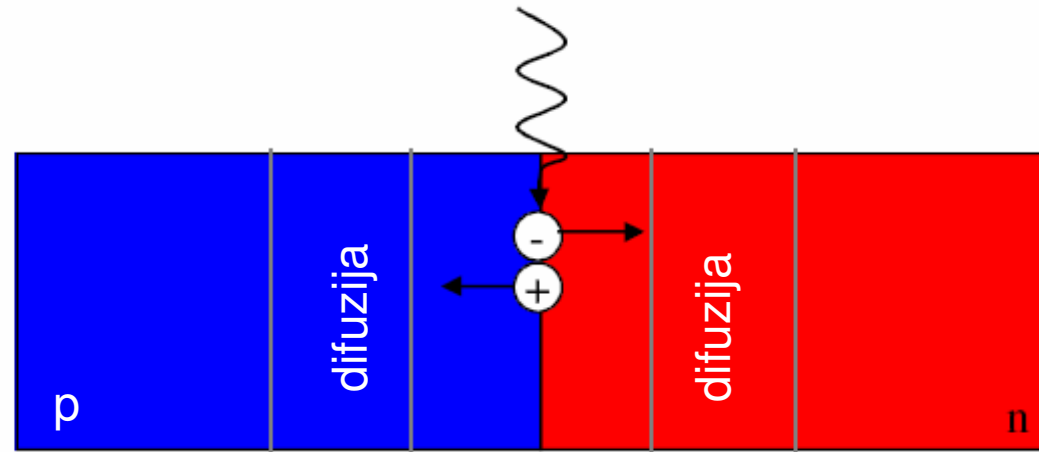


Difuzija in drsenje delcev

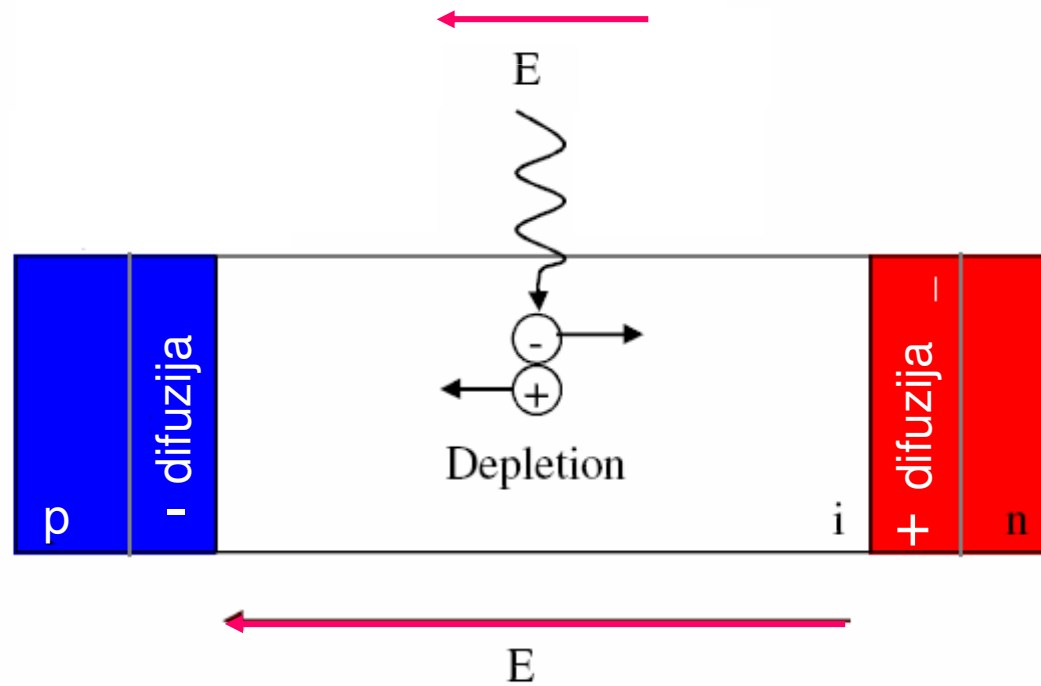


Stik pn in pin

pn:



pin:



Struktura diode PIN

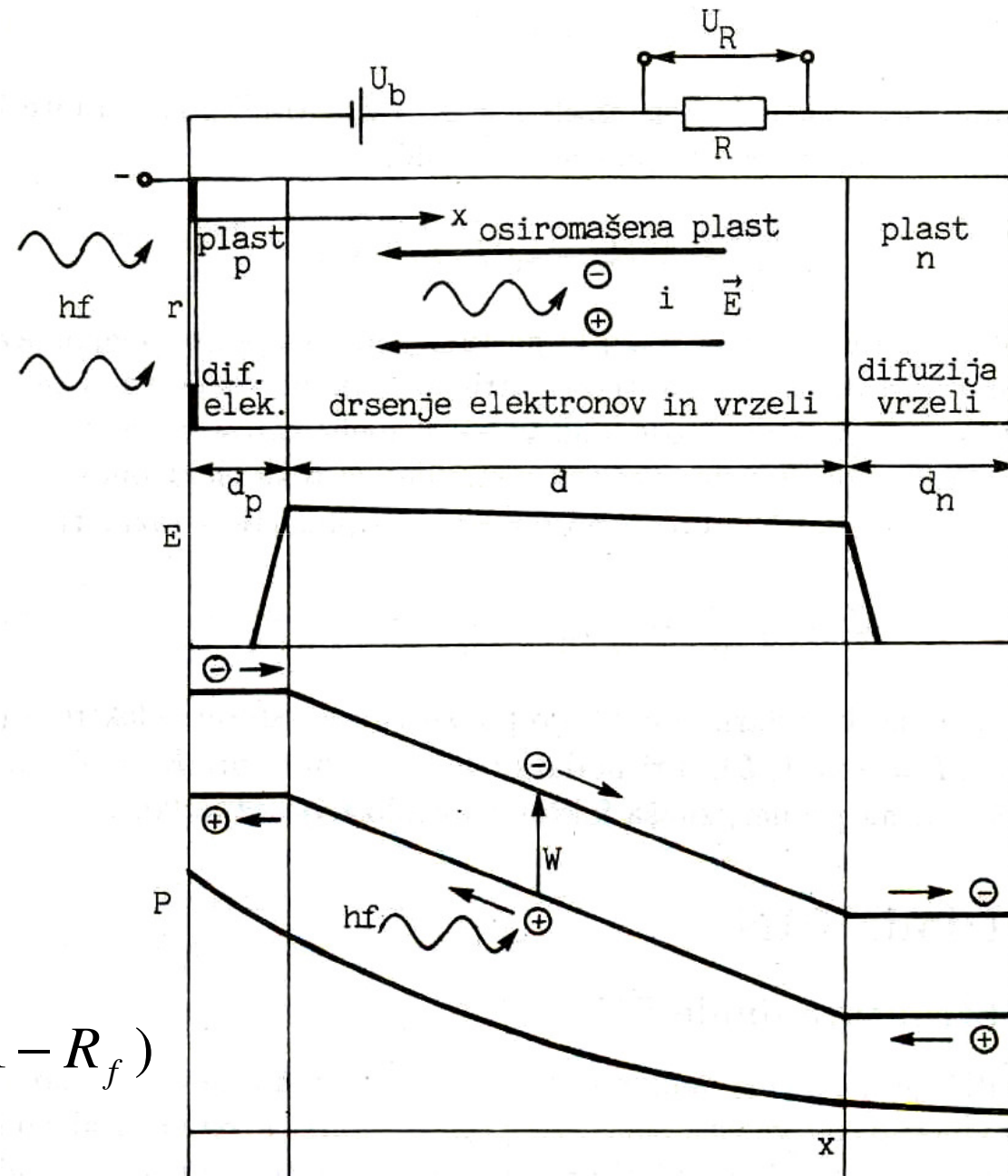
Zunanje vzbujanje
Plasti diode PIN
Načini gibanja
elektronov
in vrzeli

Električno polje v plasteh

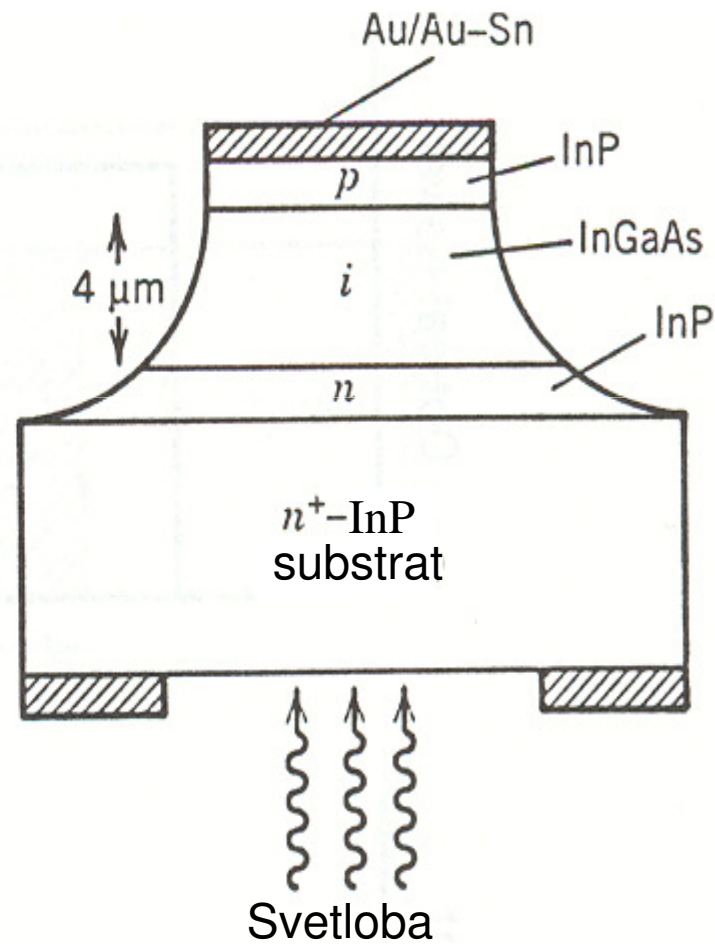
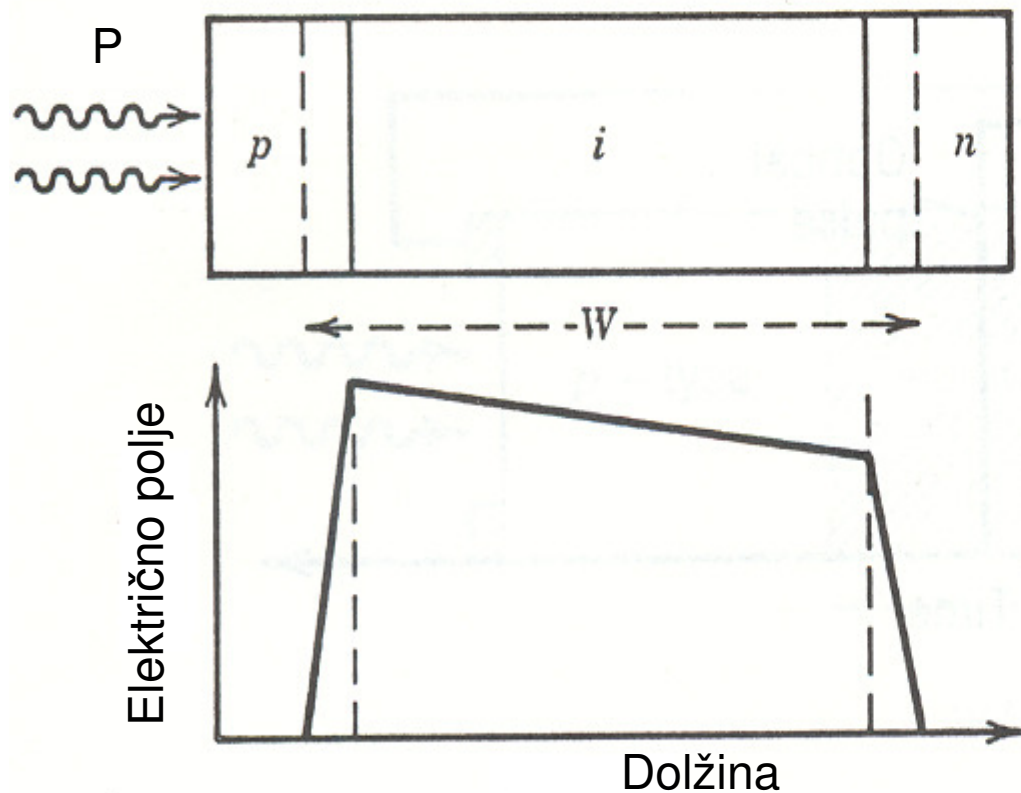
Energijski pasovi
Pot elektronov in vrzeli

Slabljenje fotonskega toka

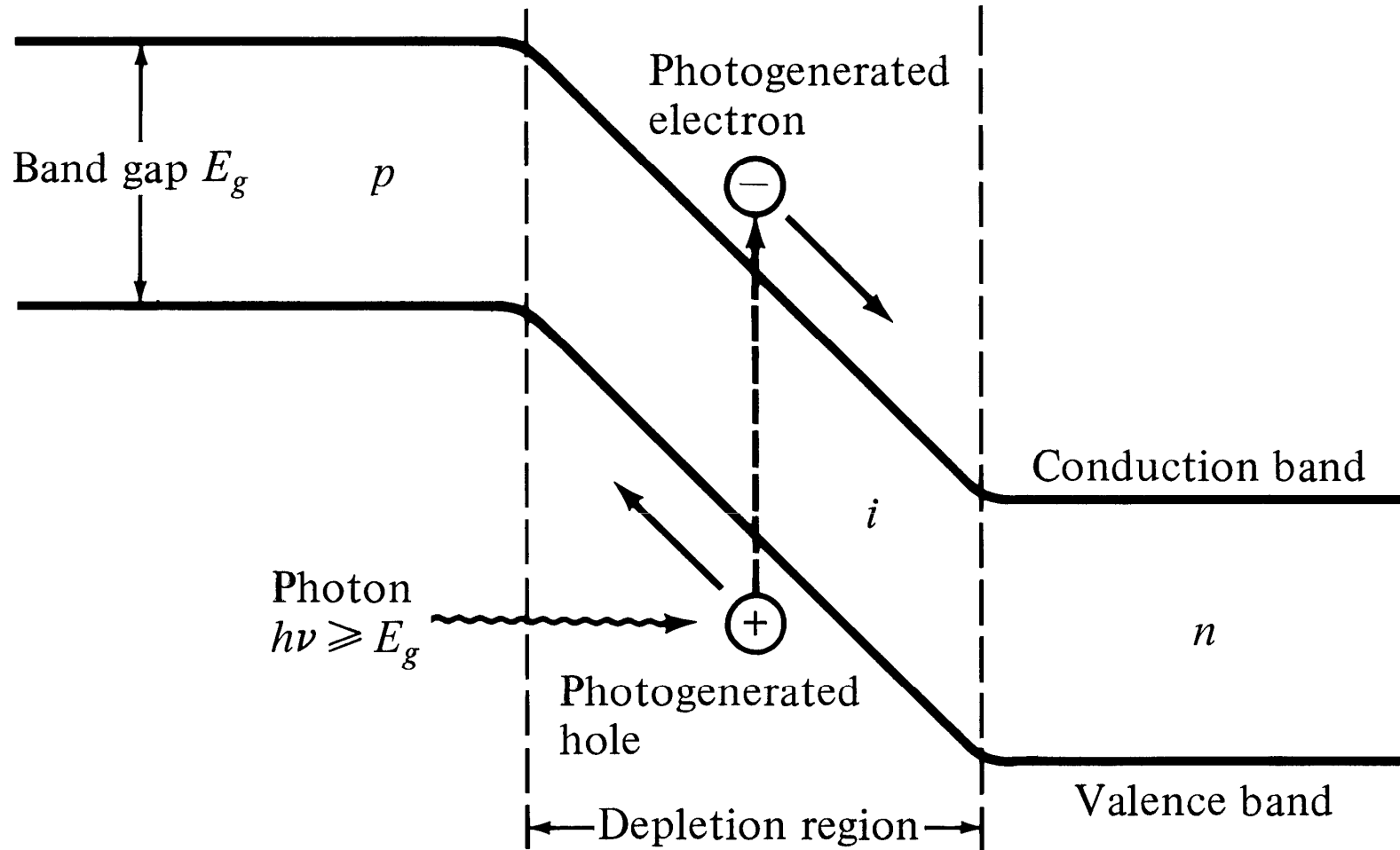
$$I_p = \frac{q}{h\nu} P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)w}) (1 - R_f)$$



Struktura diode PIN



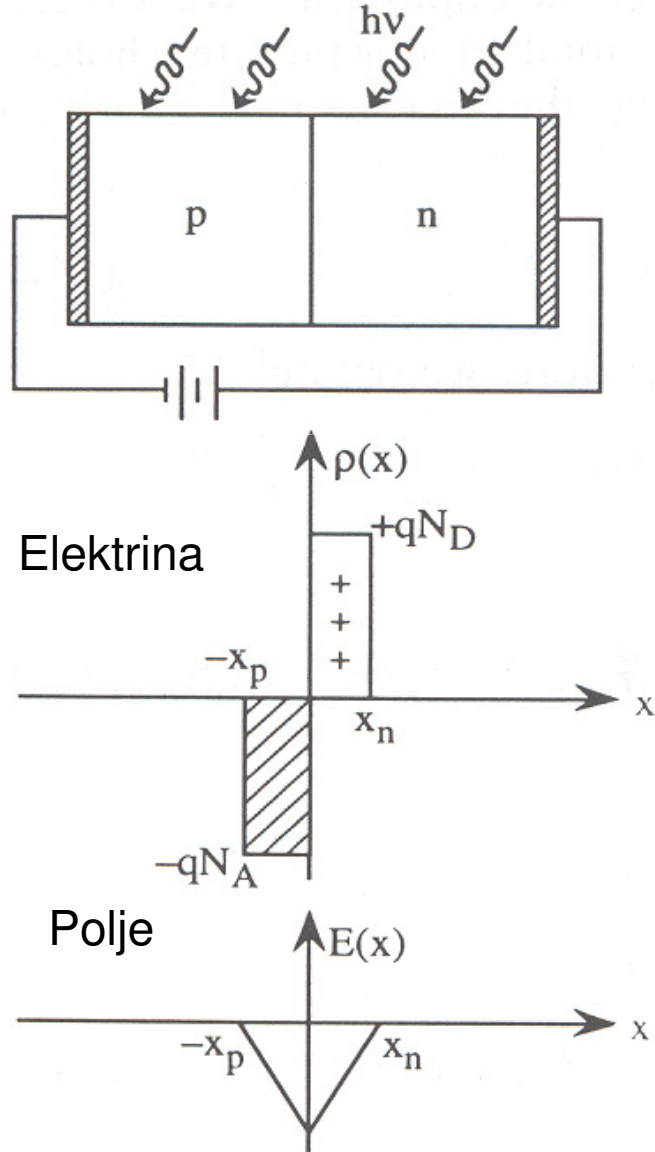
Energijski pasovi



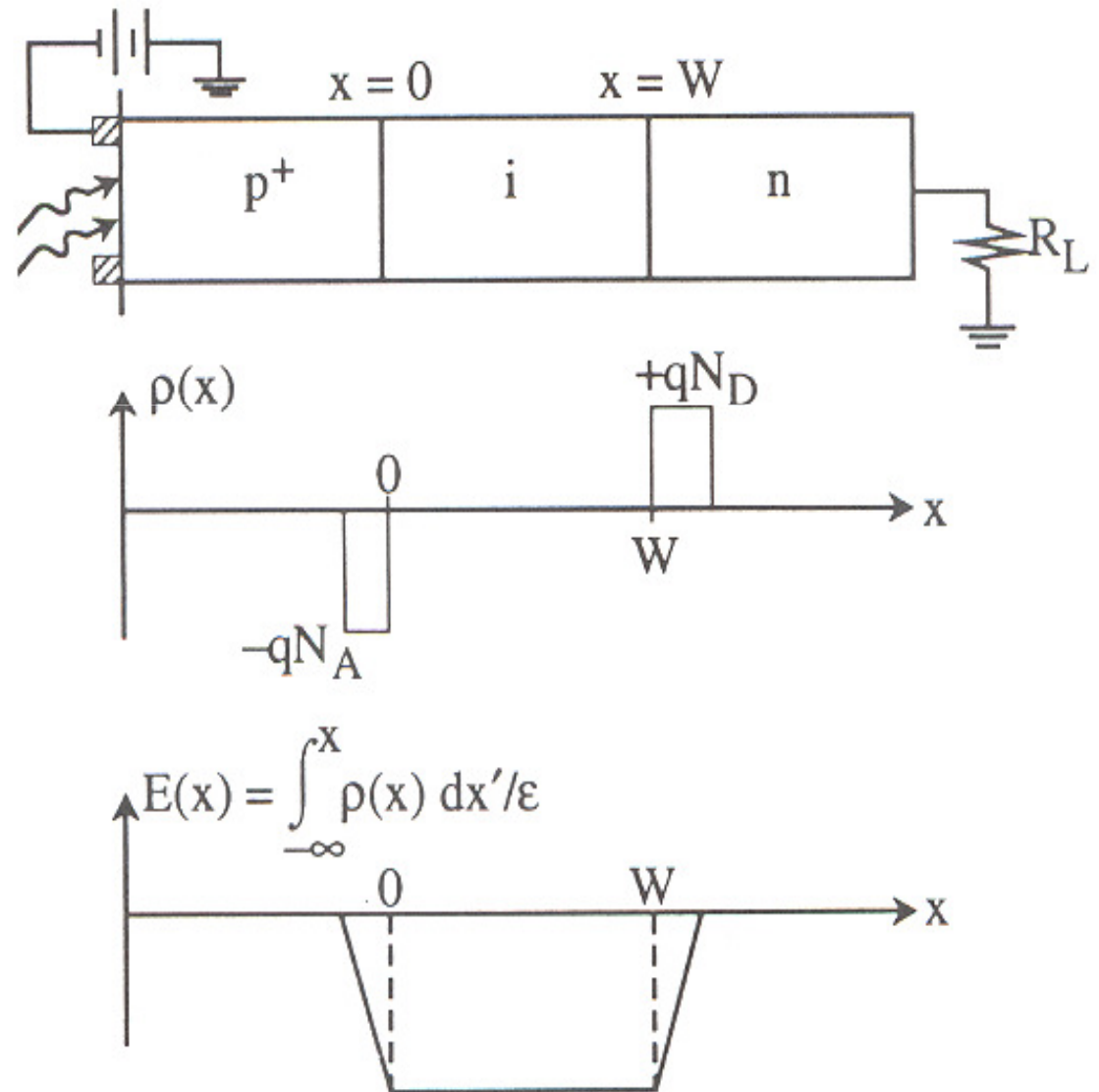
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} \mu\text{m}$$

Primerjava p-n in p-i-n stika

Stik p-n

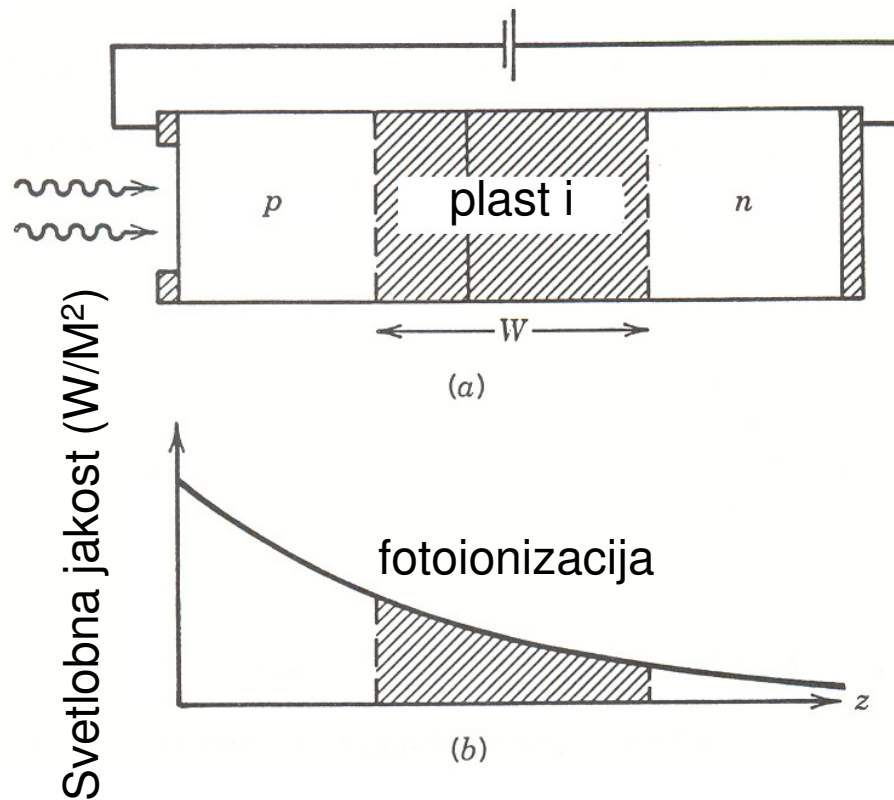


Stik p-i-n

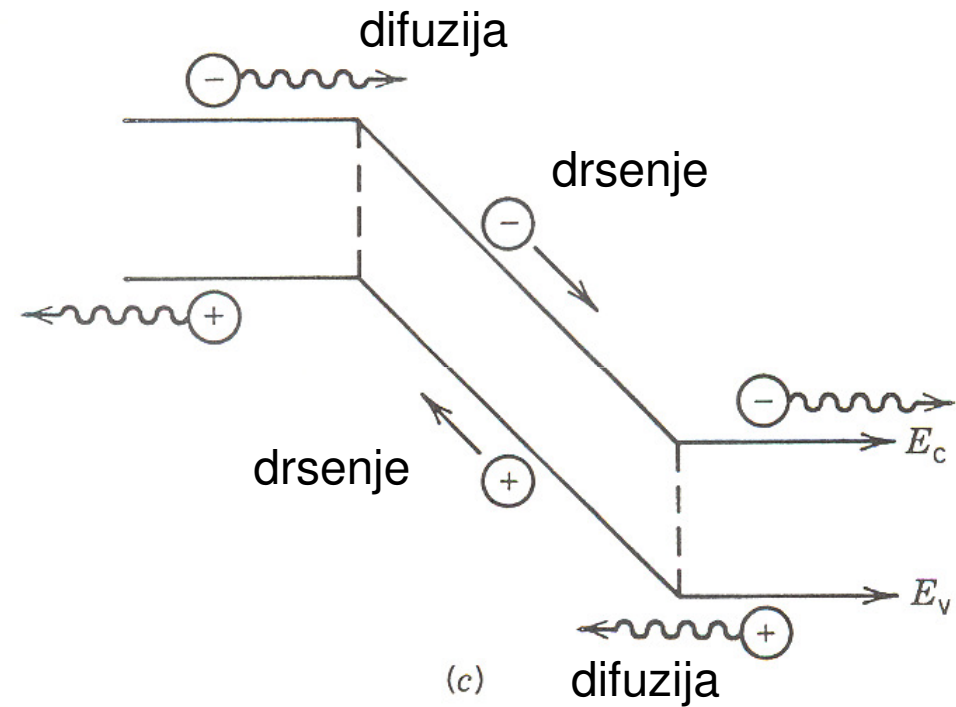


Pojavi v fotodiodi PIN

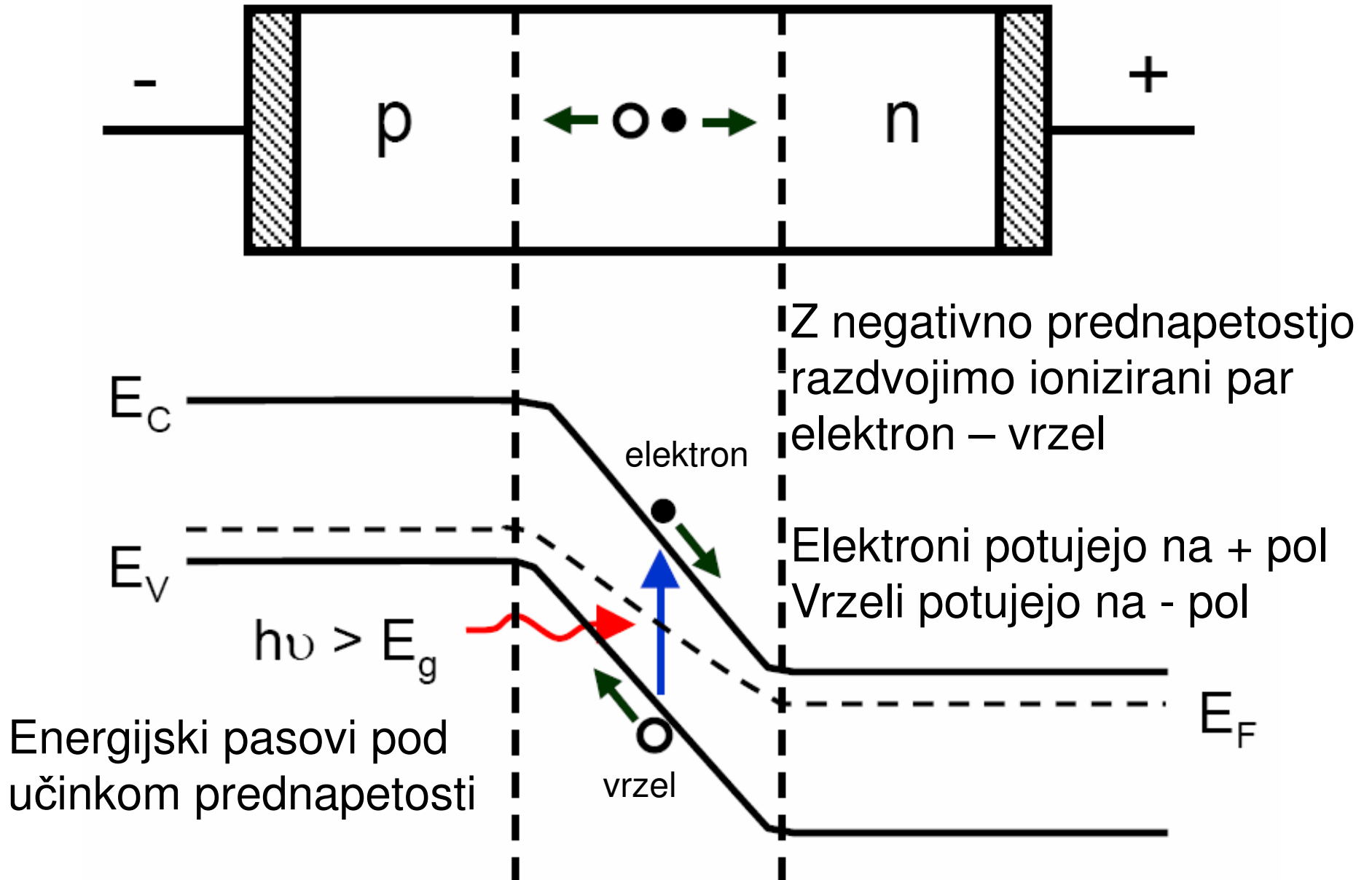
Fotoionizacija



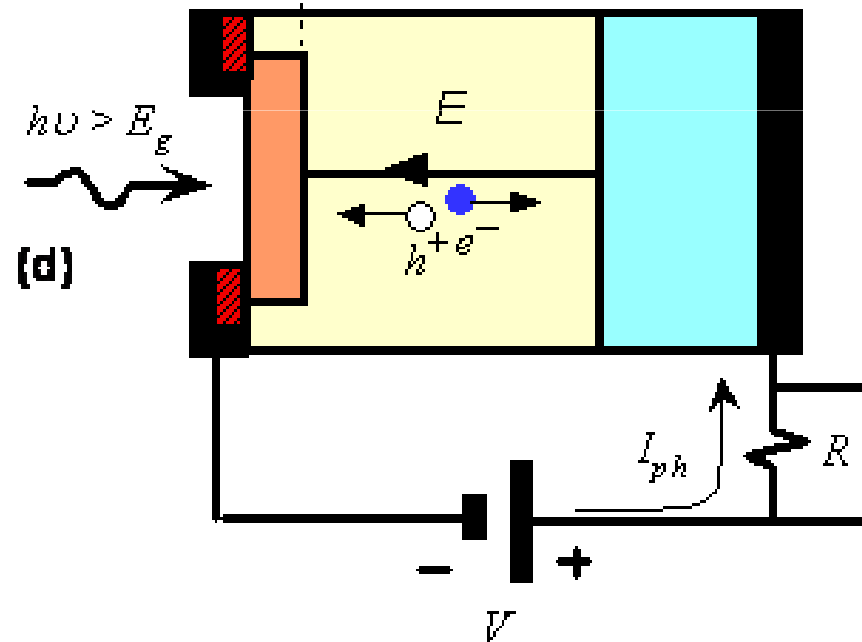
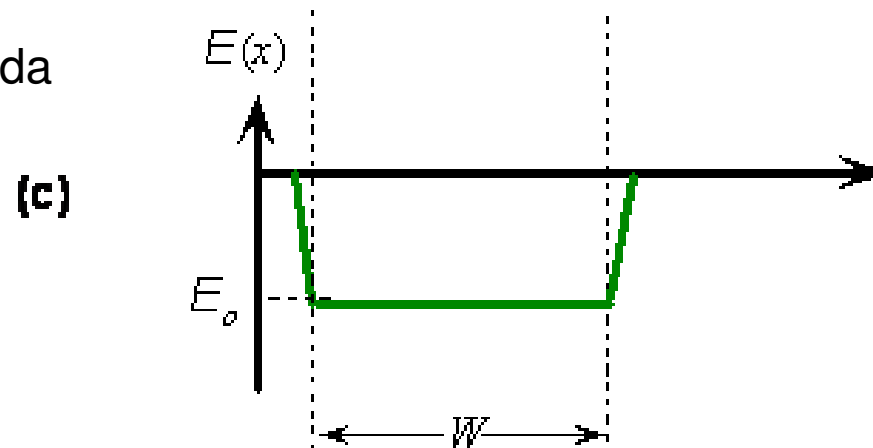
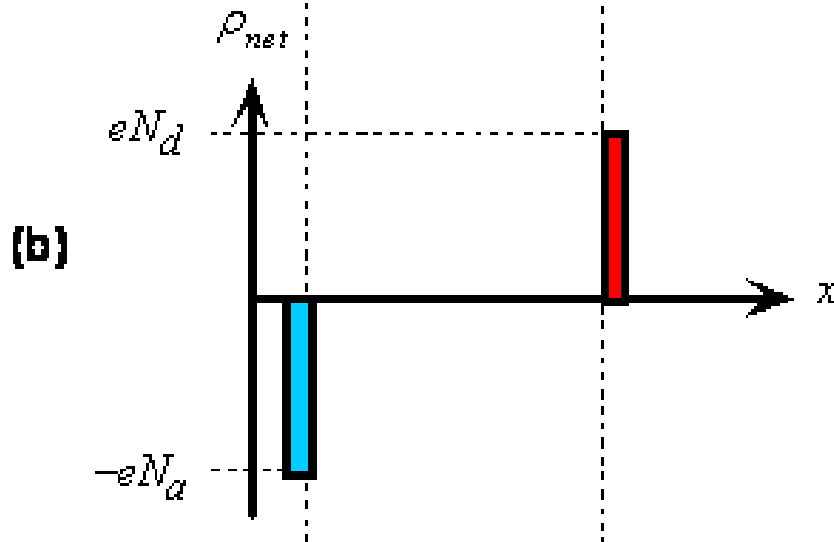
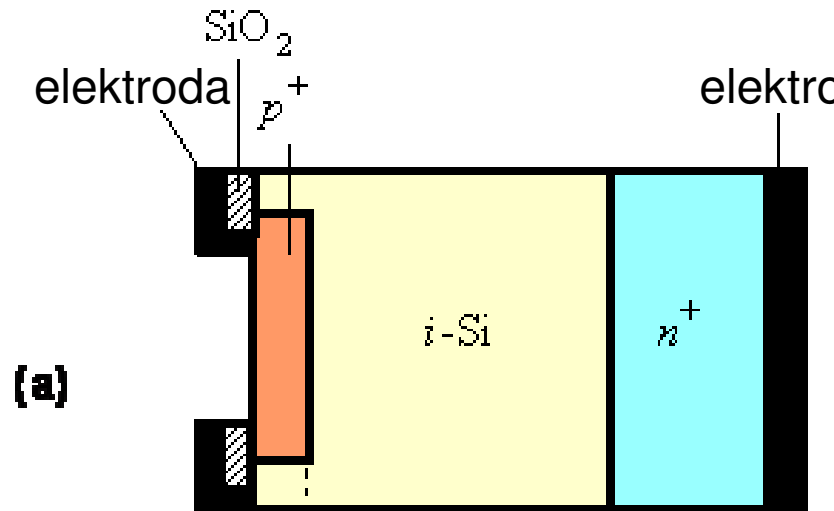
Način gibanja delcev



Delovanje diode PIN



Delovanje diode PIN



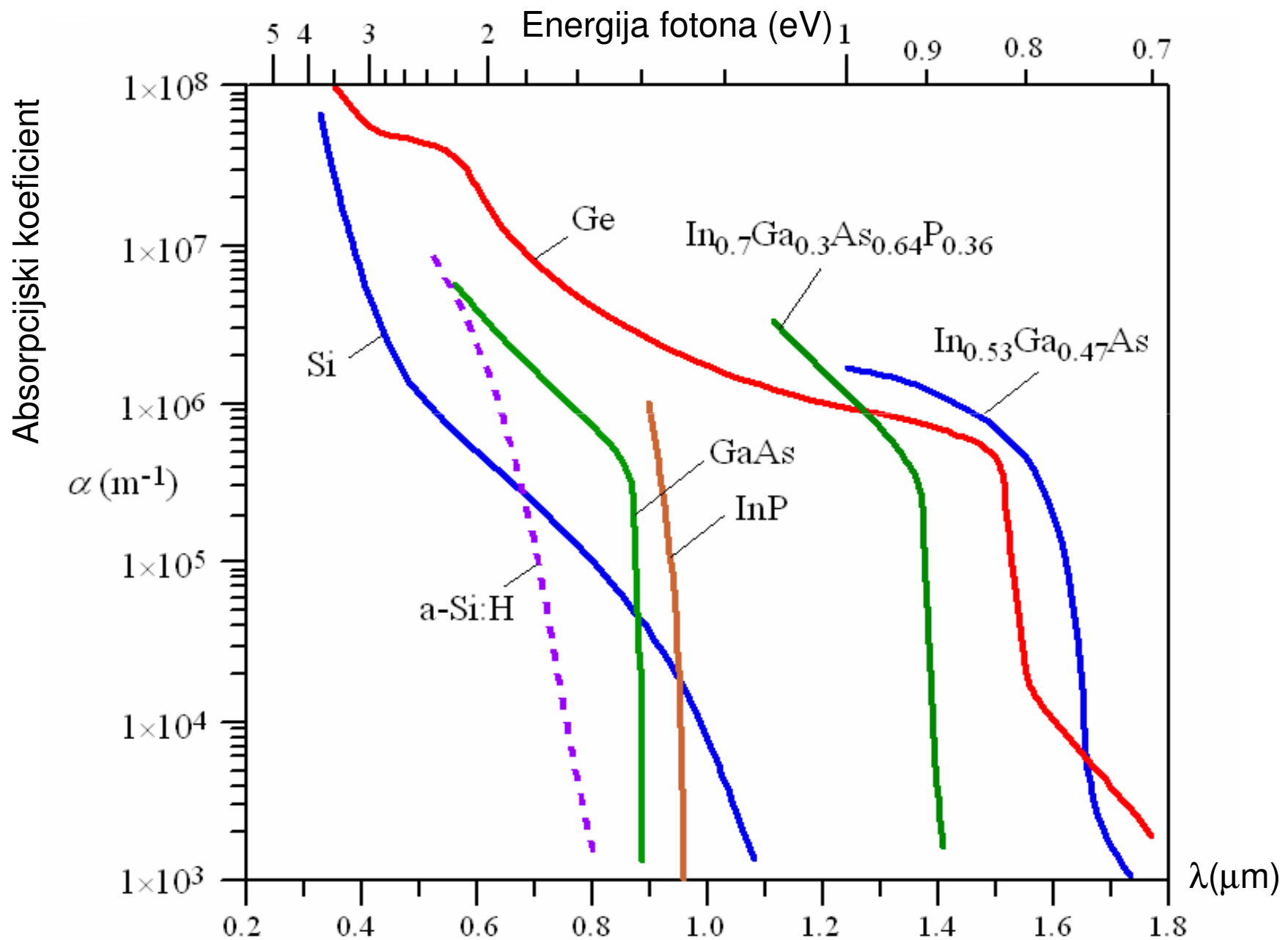
(a) Struktura diode p-i-n

(b) Pozitivna in negativna elektrina na robu n in p plasti

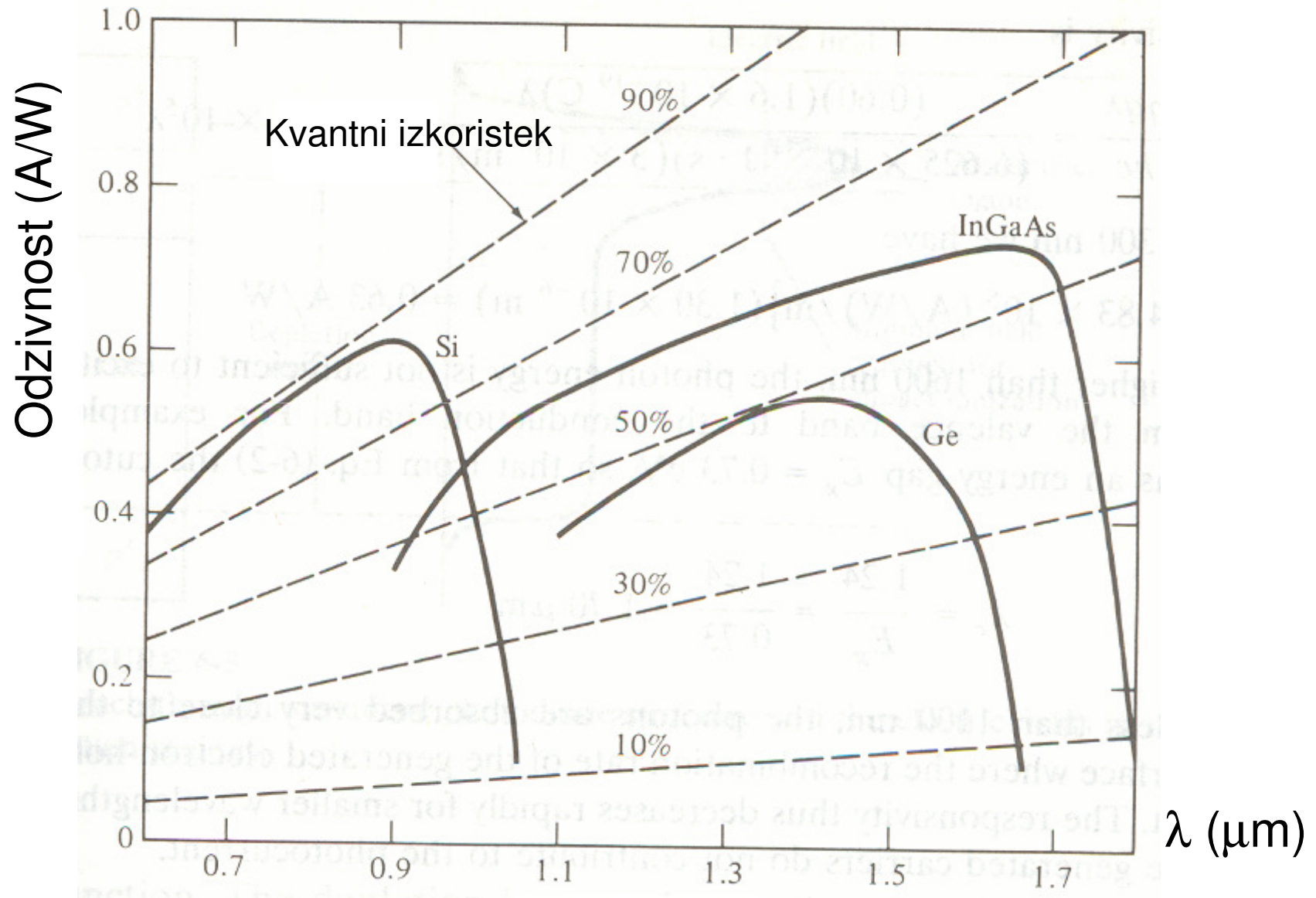
(c) Električno polje v plasti i

(d) Drsenje elektronov in vrzeli pod vplivom električnega polja

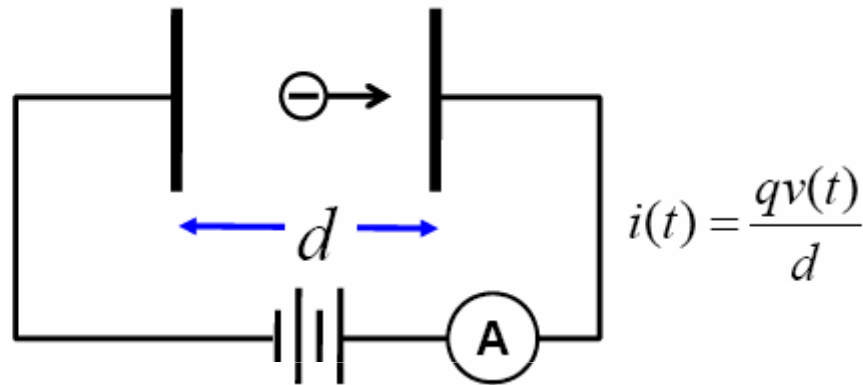
Absorpcijski koeficient svetlobe v materialih²⁸



Kvantni izkoristek in odzivnost



Kontinuiteta toka v kondenzatorju



Mehansko delo:

$W = \text{sila} \times \text{premik}$

$$= qEdx = q \frac{V}{d} dx$$

Električno delo:

$$W = i(t)Vdt$$

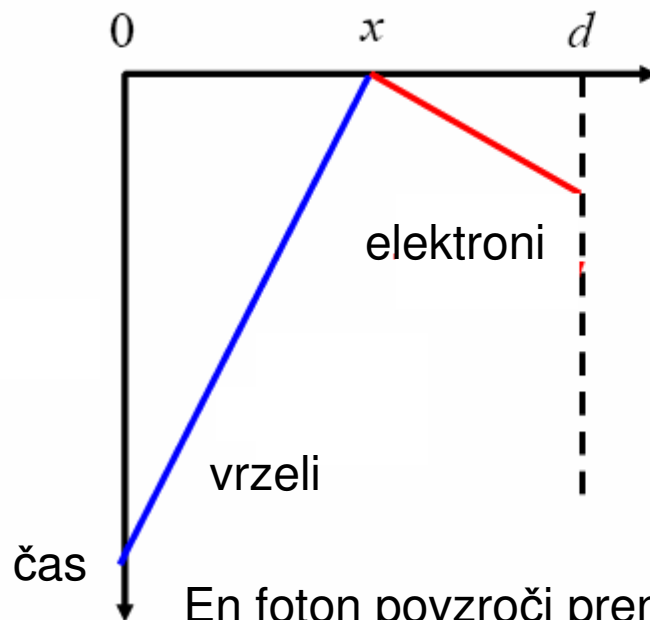
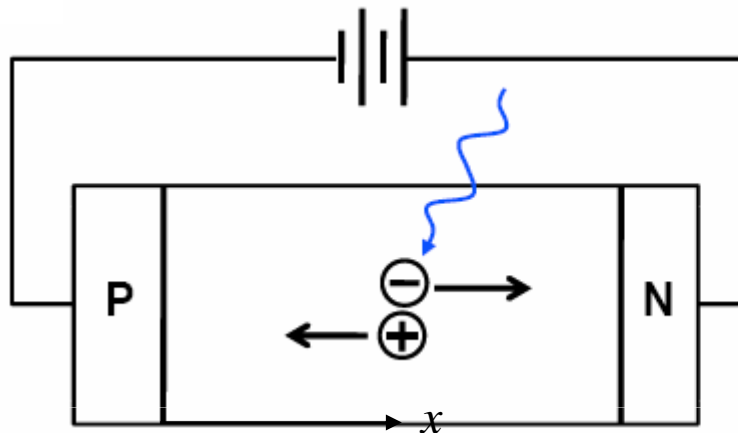
\Rightarrow

$$i(t)Vdt = q \frac{V}{d} dx$$

$$i(t) = \frac{q}{d} \frac{dx}{dt} = \frac{qv(t)}{d}$$

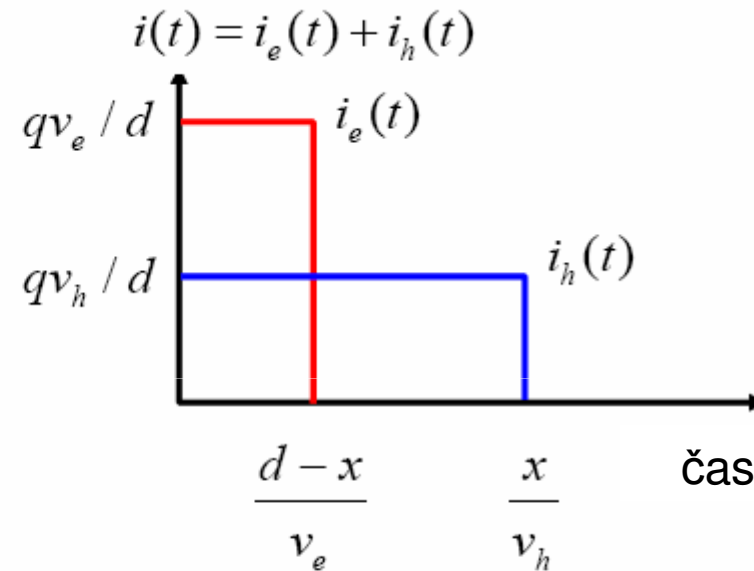
Prenos elektrine v fotodetektorju

Foton povzroča par elektron-vrzel



En foton povzroči prenos ene elektrine

Tok elektronov in tok vrzeli:



Prenešana elektrina:

$$Q = \int_0^{\infty} i_e(t) dt + \int_0^{\infty} i_h(t) dt$$

$$= \frac{qv_e}{d} \frac{d-x}{v_e} + \frac{qv_h}{d} \frac{x}{v_h} = q$$

Dioda PIN - tokovi

Tok:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) , \quad I_0 \text{ temni tok pri } V \ll 0$$

Svetlobni tok:

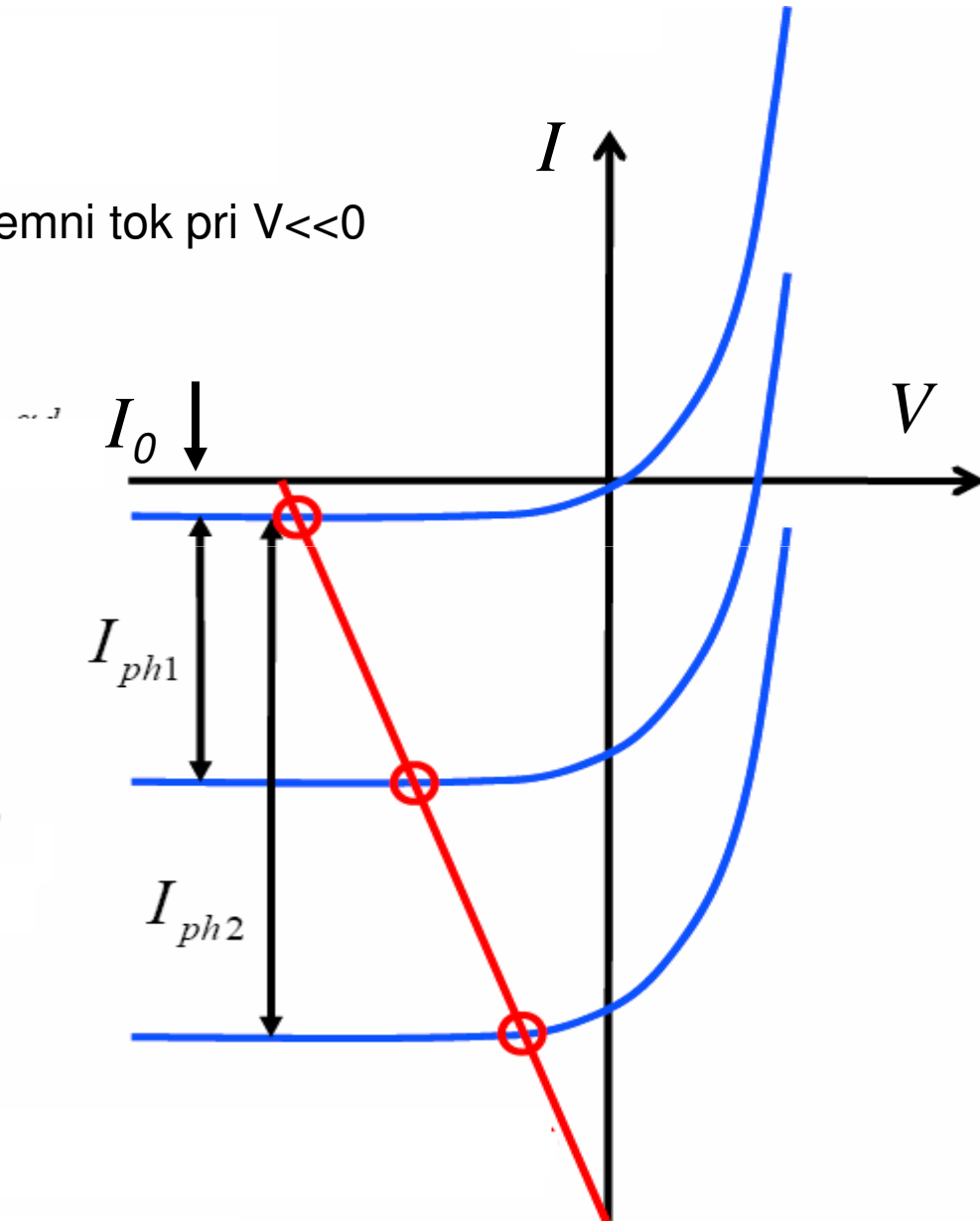
$$I_{ph} = \frac{\eta q}{\hbar \omega} P_{opt}$$

Skupni izkoristek:

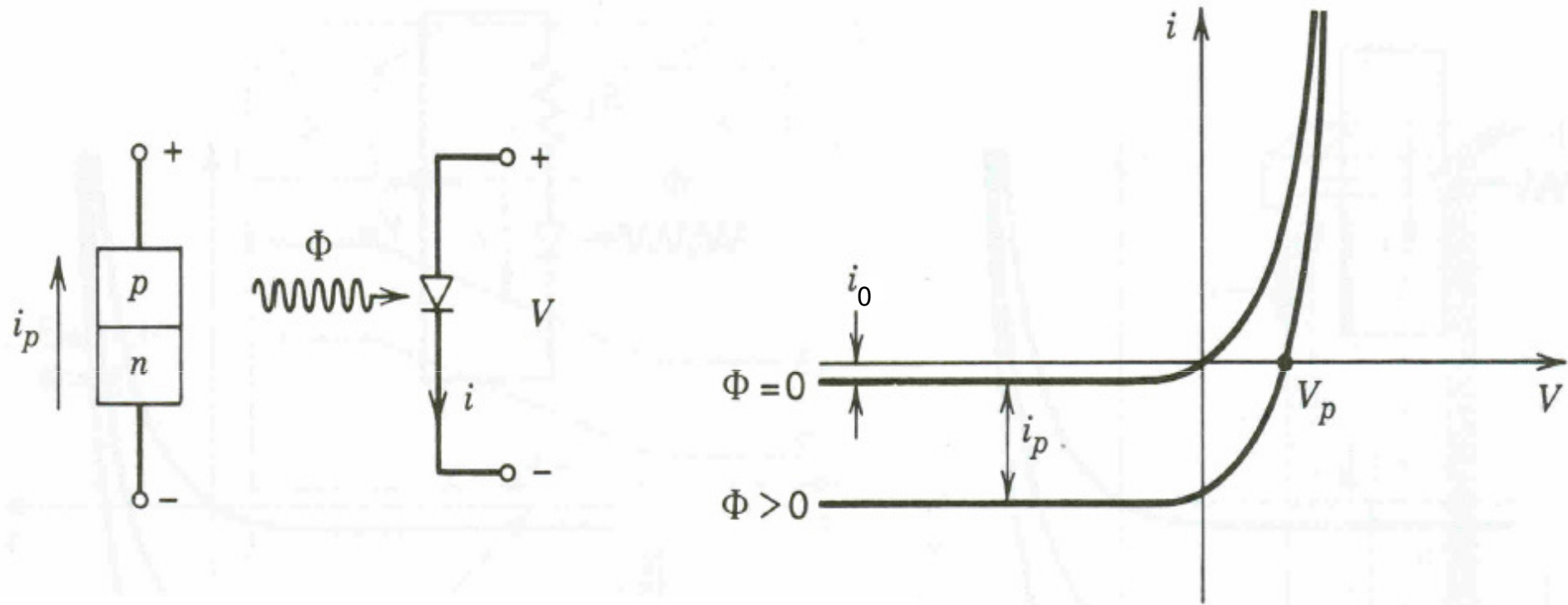
$$\eta = \eta_i (1 - R) (1 - e^{-\alpha a})$$

Skupni tok:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) + I_{ph}$$

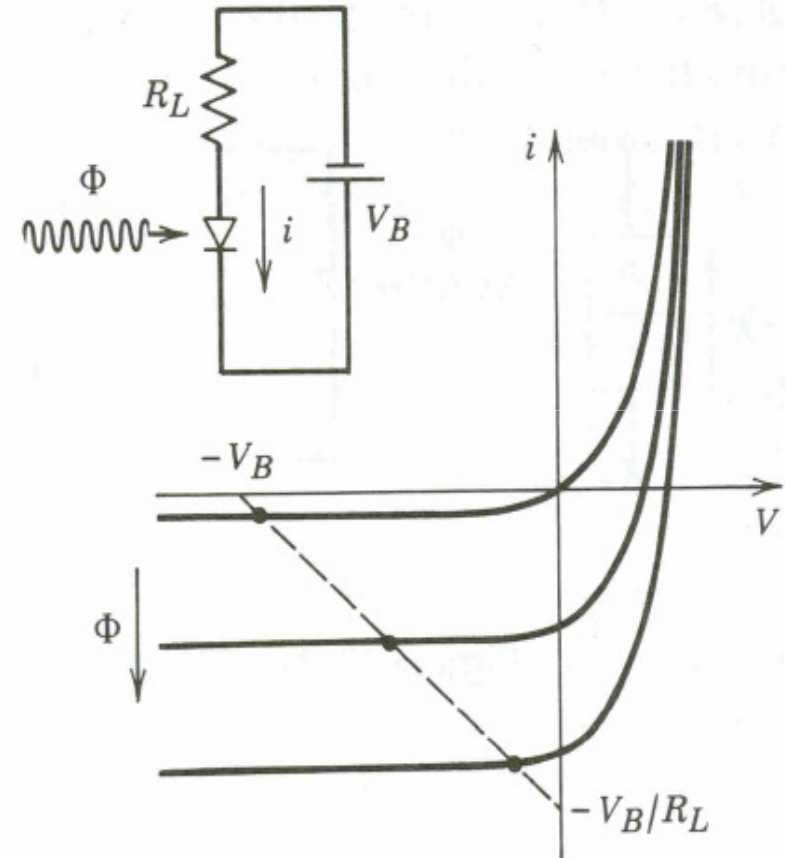
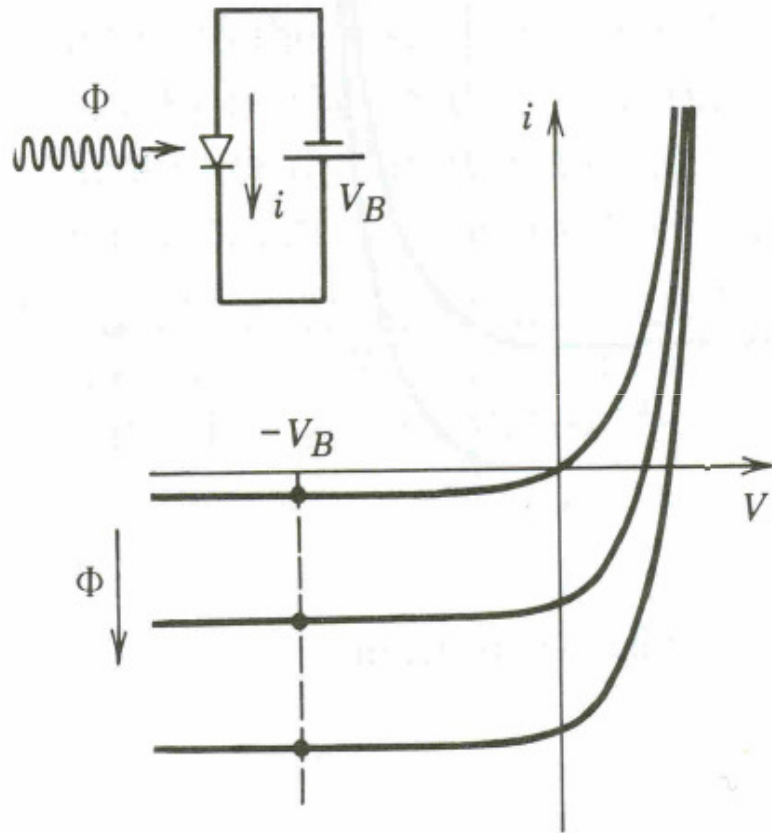


Načini uporabe fotodiode - 1



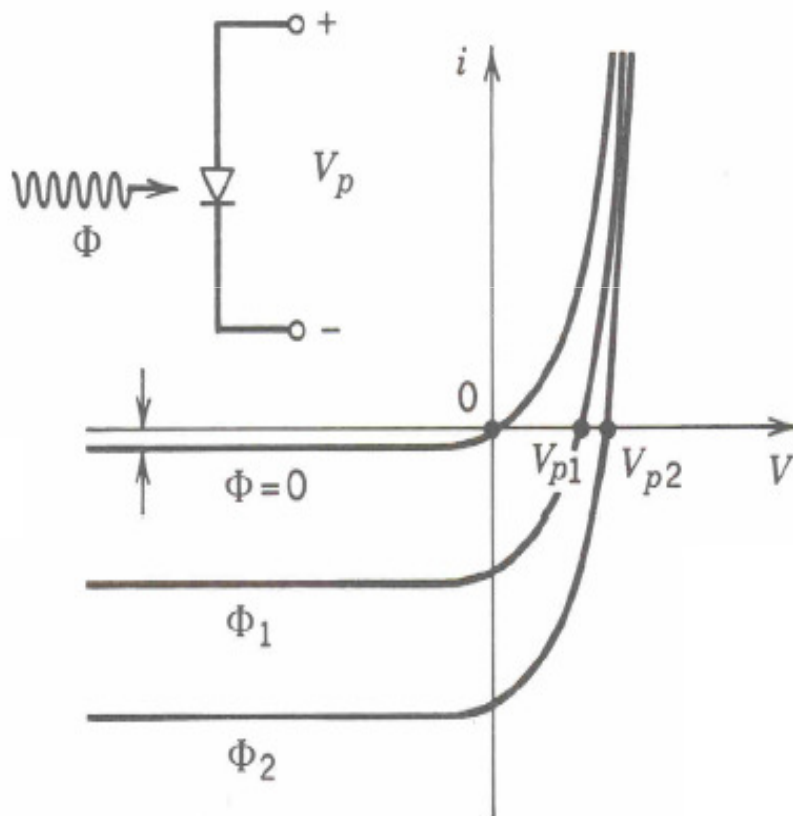
$$i = i_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] - i_p$$

Načini uporabe fotodiode -2

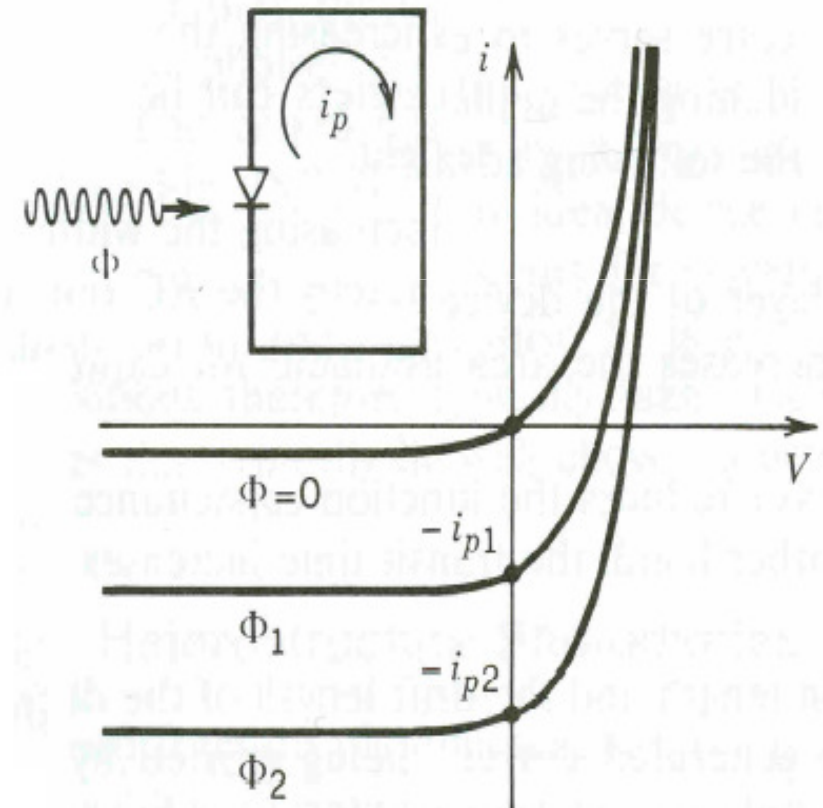


Načini uporabe fotodiode - 3

Fotonapetostni (fotovoltaični)
način



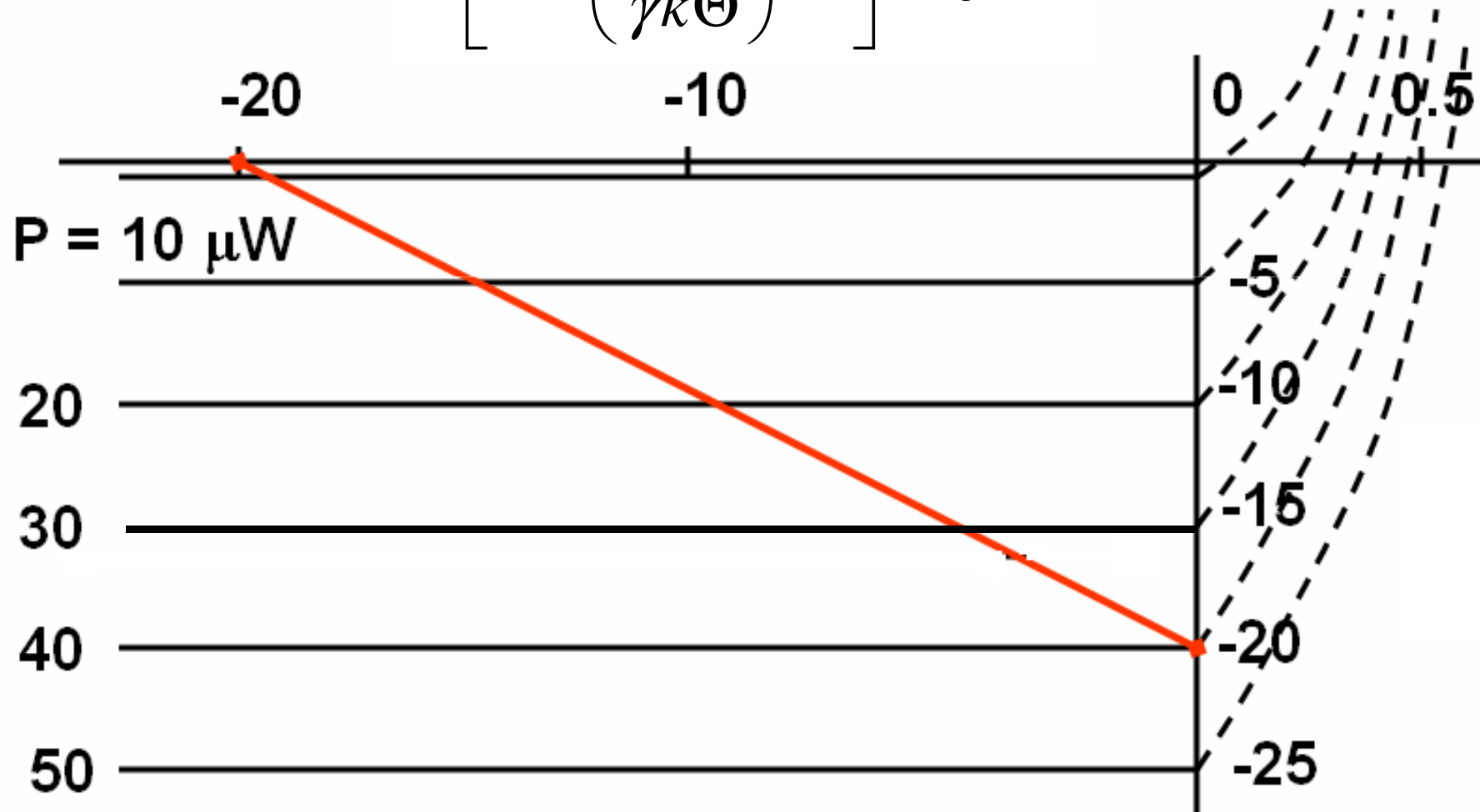
Kratkostični način



Gospodarsko najbolj pomembna prihodnja uporaba fotodiode

Delovna karakteristika fotodiode

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma k \Theta}\right) - 1 \right] - I_p$$



Dioda PIN – glavni šumi

1. Kvantni šum fototoka in temnega toka:

$$\sigma_s^2 = 2q(I_p + I_d)\Delta f$$

2. Toplotni šum uporovnega bremena:

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} F_n \Delta f$$

Dioda APD

Karakteristike APD diode

- vrste običajnih diod APD

Parameter	Oznaka	Enota	Si	Ge	InGaAs
Valovna dolžina	λ	μm	0.4–1.1	0.8–1.8	1.0–1.7
Odzivnost	R_{APD}	A/W	80–130	3–30	5–20
Ojačenje diode	M	—	100–500	50–200	10–40
Faktor k	k_A	—	0.02–0.05	0.7–1.0	0.5–0.7
Temni tok	I_d	nA	0.1–1	50–500	1–5
Dvižni čas	T_r	ns	0.1–2	0.5–0.8	0.1–0.5
Frekvenčni pas	Δf	GHz	0.2–1.0	0.4–0.7	1–3
Prednapetost	V_b	V	200–250	20–40	20–30

Ojačevalni faktor $M = I_M/I_p$; Odzivnost $\mathfrak{R}_{\text{APD}} = \frac{\eta q}{h\nu} M = \mathfrak{R}_0 M$

Faktor ionizacije $k = k_e/k_v < 1$ ali obratno $k_v/k_e < 1$

Fotoionizacija in udarna ionizacija

• Fotoelektrični pojav

$$h\nu > W_J$$

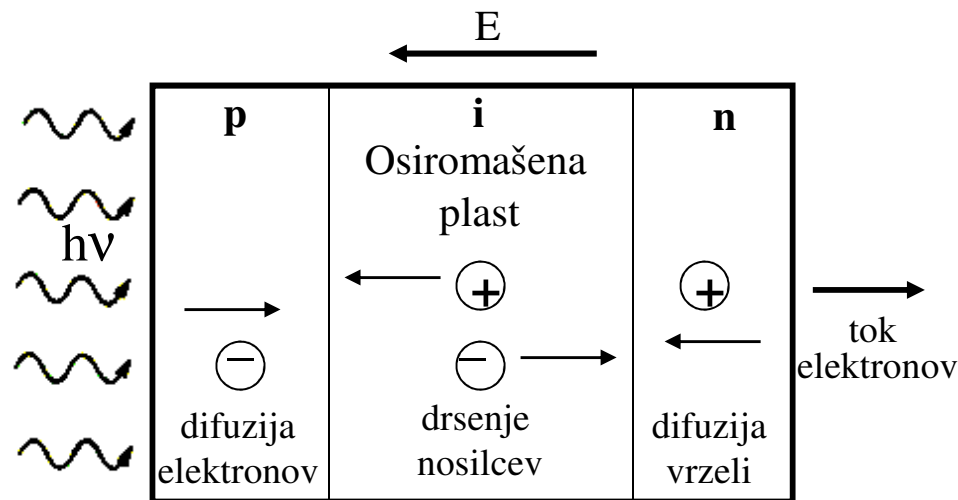
fotoefekt - nastanek para elektron - vrzel

$$\lambda < \frac{1,2398}{W_{eV}}$$

valovna dolžina svetlobe, potrebne za ionizacijo

• Fotoionizacija:

- vpadna svetloba moči P
- ionizacija v plasti i spoja pin



• Signal:

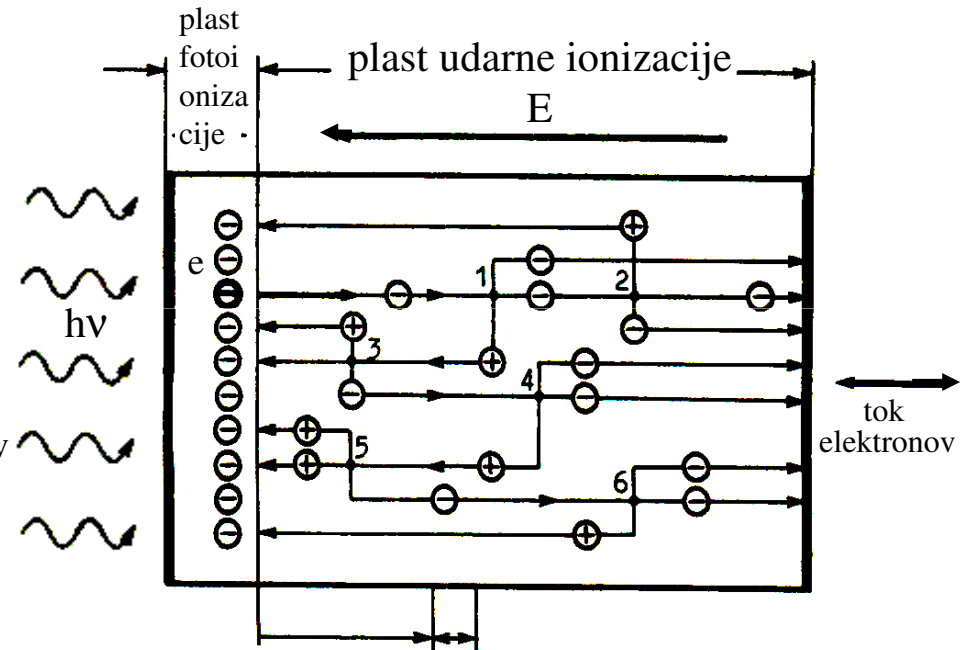
$$I = \rho P, \quad \rho = \frac{\eta e}{h\nu}$$

odzivnost fotodetektorja
 $\rho = (0,5 - 0,8) \text{ A/W}$

• Šum:

$$\overline{i^2} = 2eI\Delta f$$

• Udarne ionizacija:



• Signal:

$$I = M\rho P, \quad \rho = \frac{\eta e}{h\nu}$$

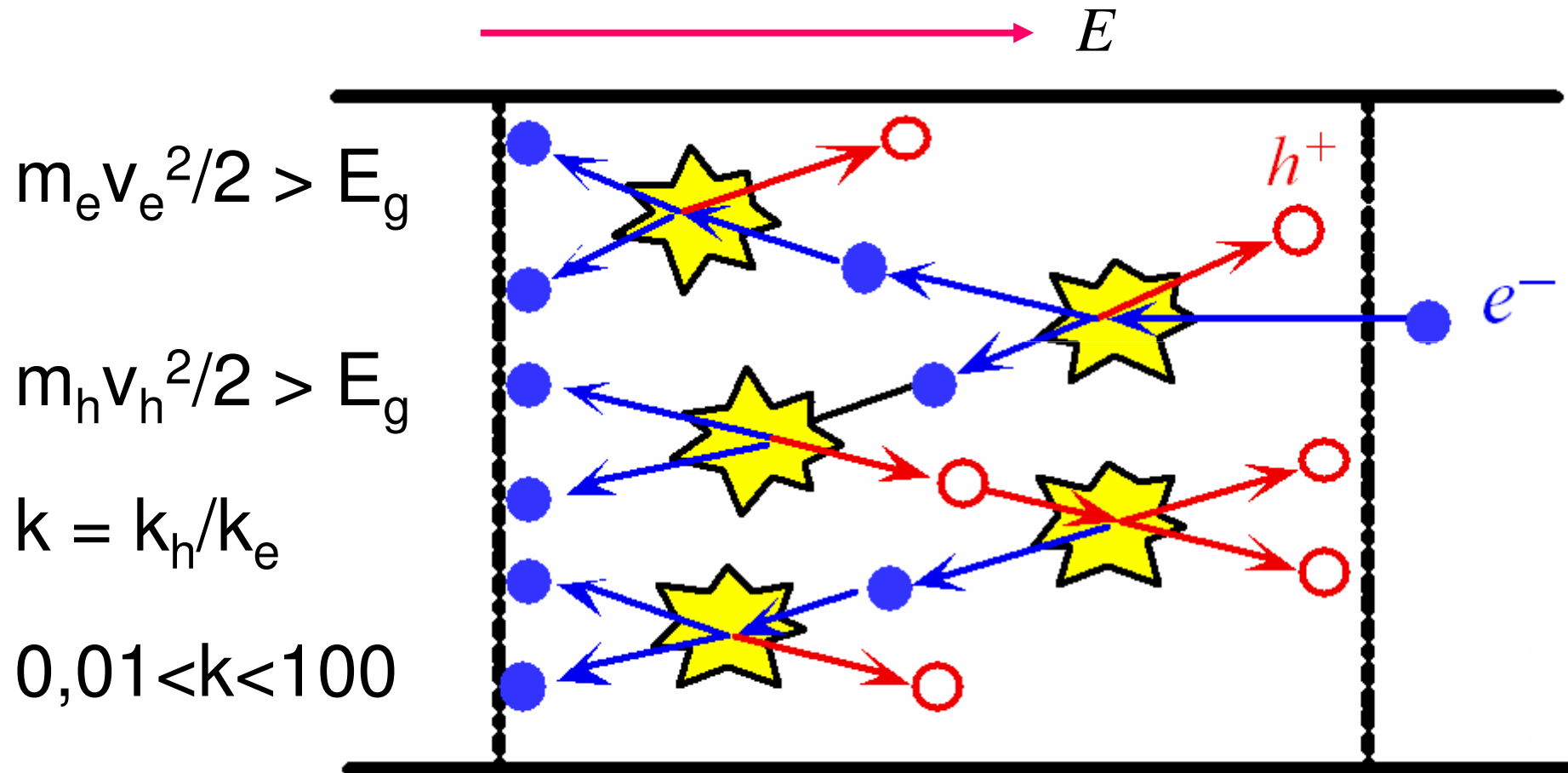
faktor multiplikacije
 $M = 10 - 50$

• Šum:

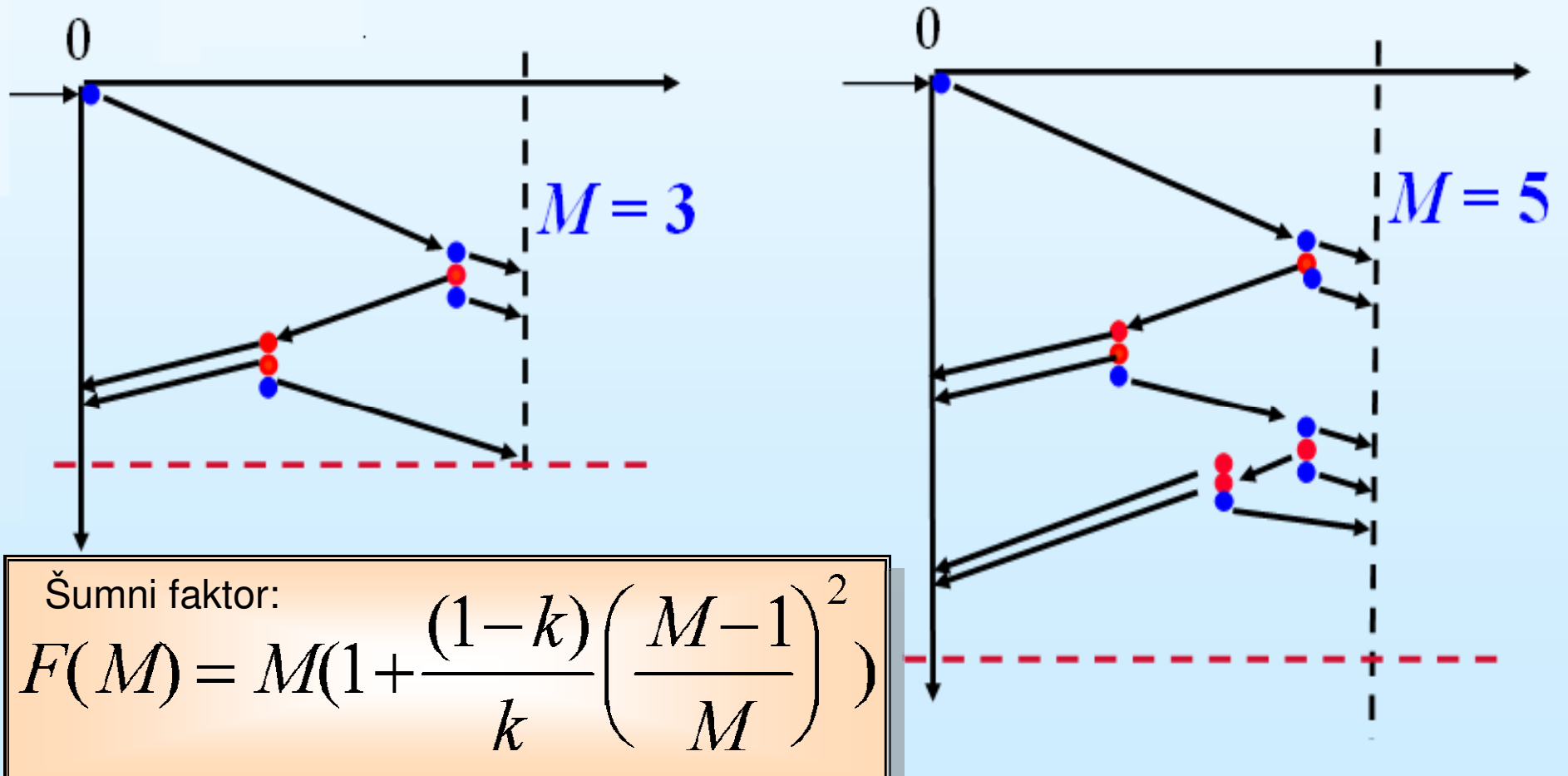
$$\overline{i^2}_{APD} = 2e\rho P M^2 F_M \Delta f$$

faktor dodatnega šuma
 $F_M = M^x$

Udarna ionizacija



Primer fotomultiplikacije



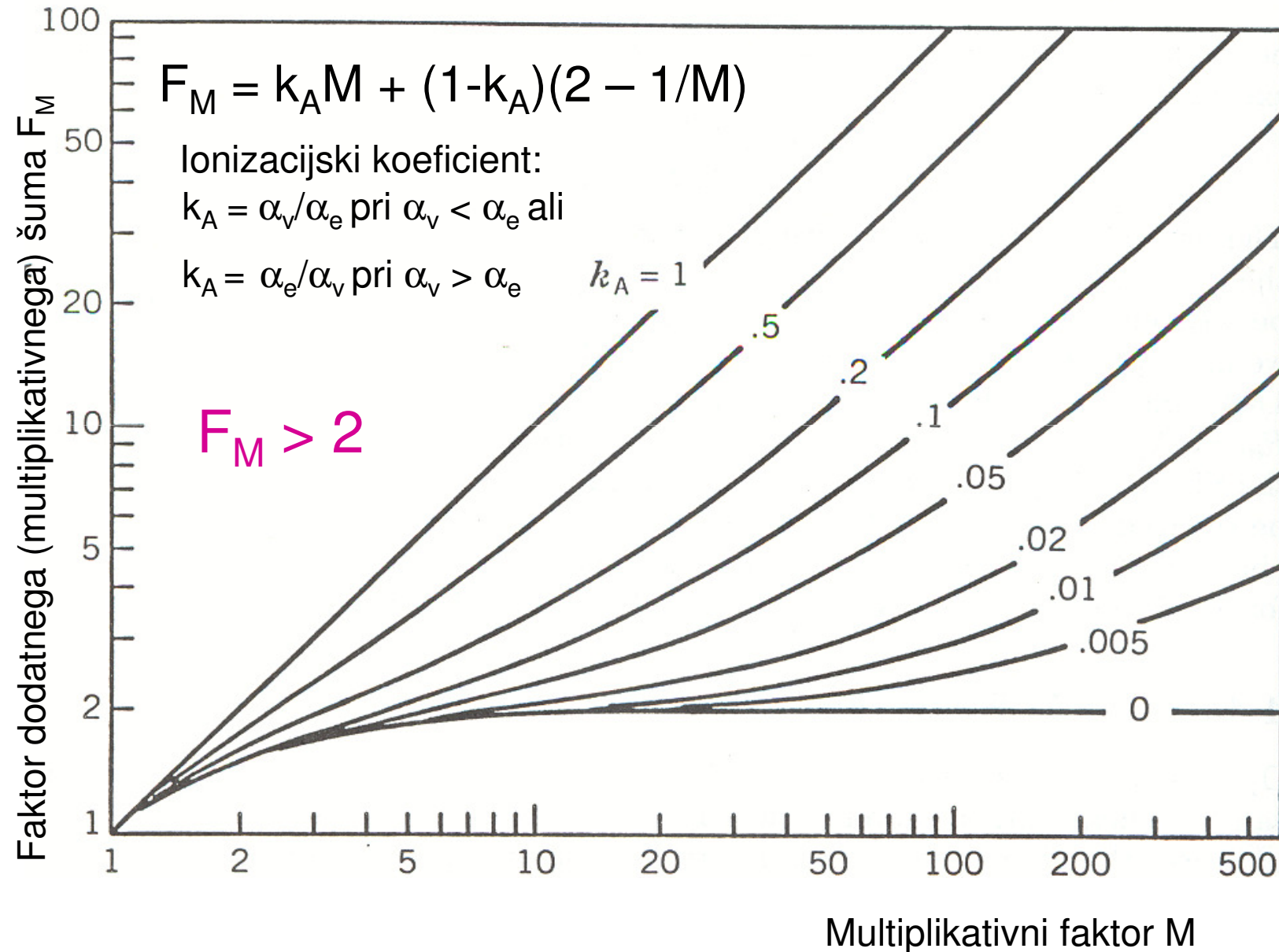
$k = \alpha/\beta$, α ... verjetnost ionizacije z vrzelmi pri $\alpha < \beta$
 β ... verjetnost ionizacije z elektroni

Kvantni šum APD

$$\langle i_Q^2 \rangle = 2qI_p BM^2 F(M)$$

Pri veliki vrednosti faktorja multiplikacije so drugi šumi potlačeni.

Faktor dodatnega šuma diode APD

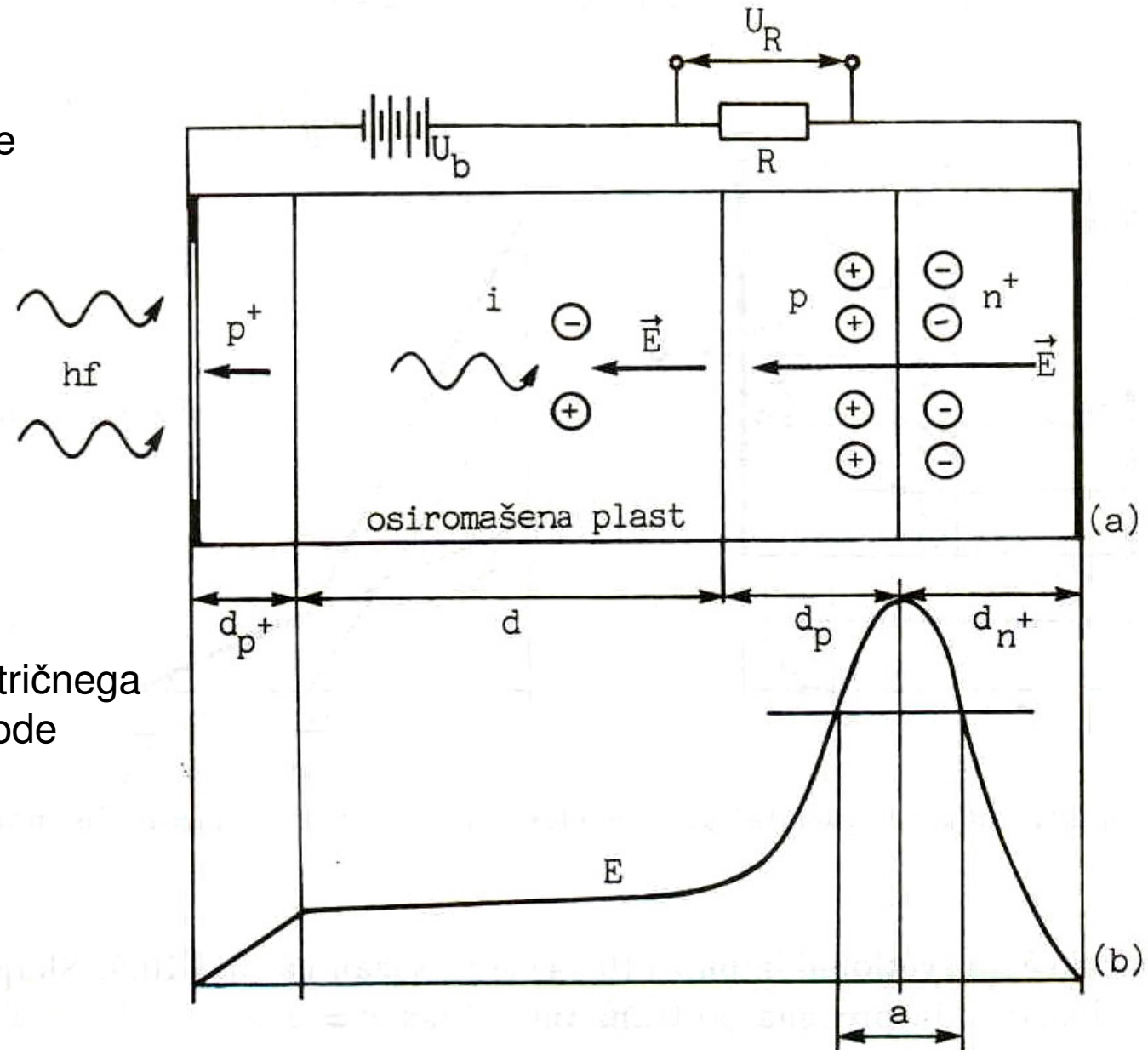


Struktura plazovne diode (APD)

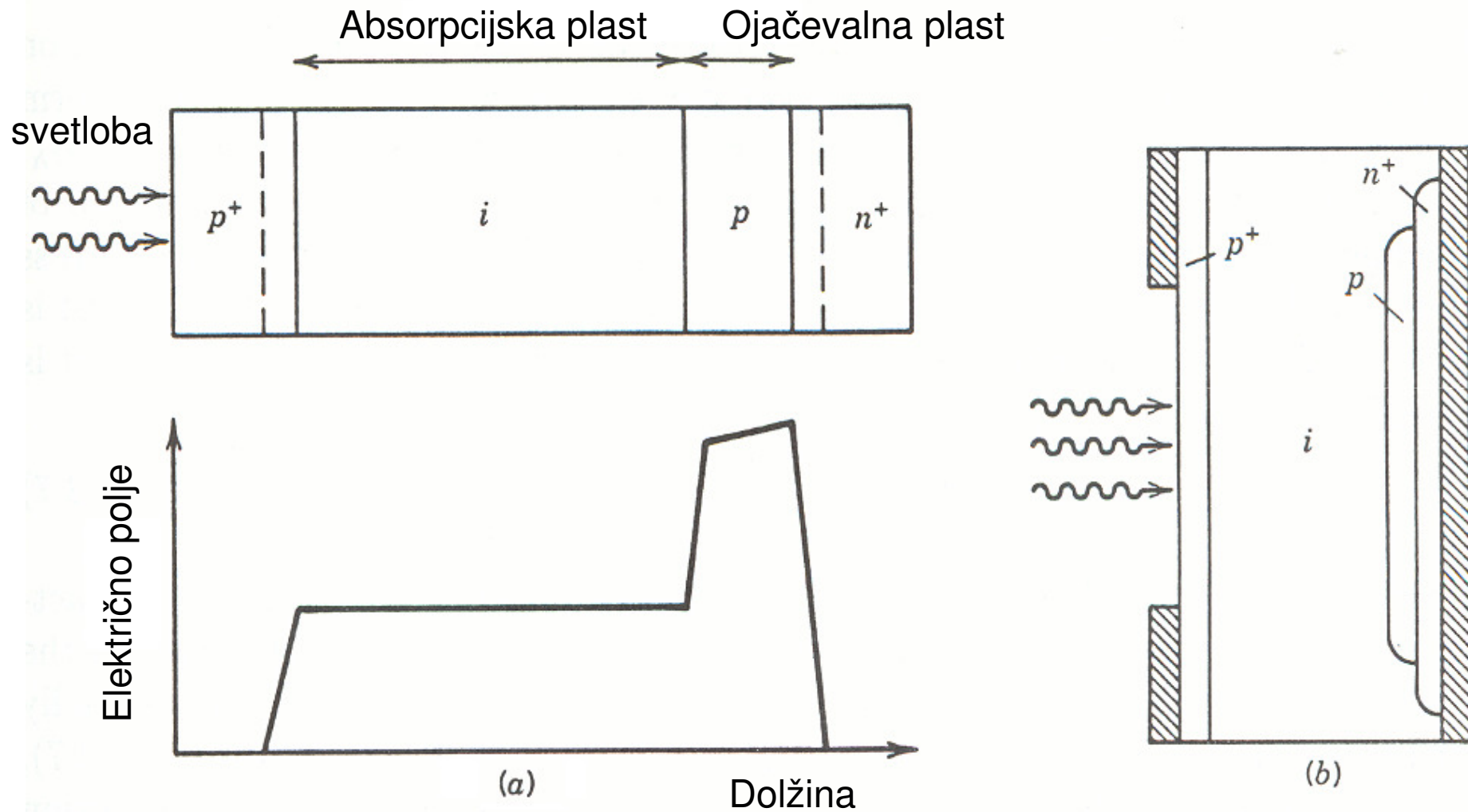
Zunanje vzbujanje

Fotonski tok
Električno polje

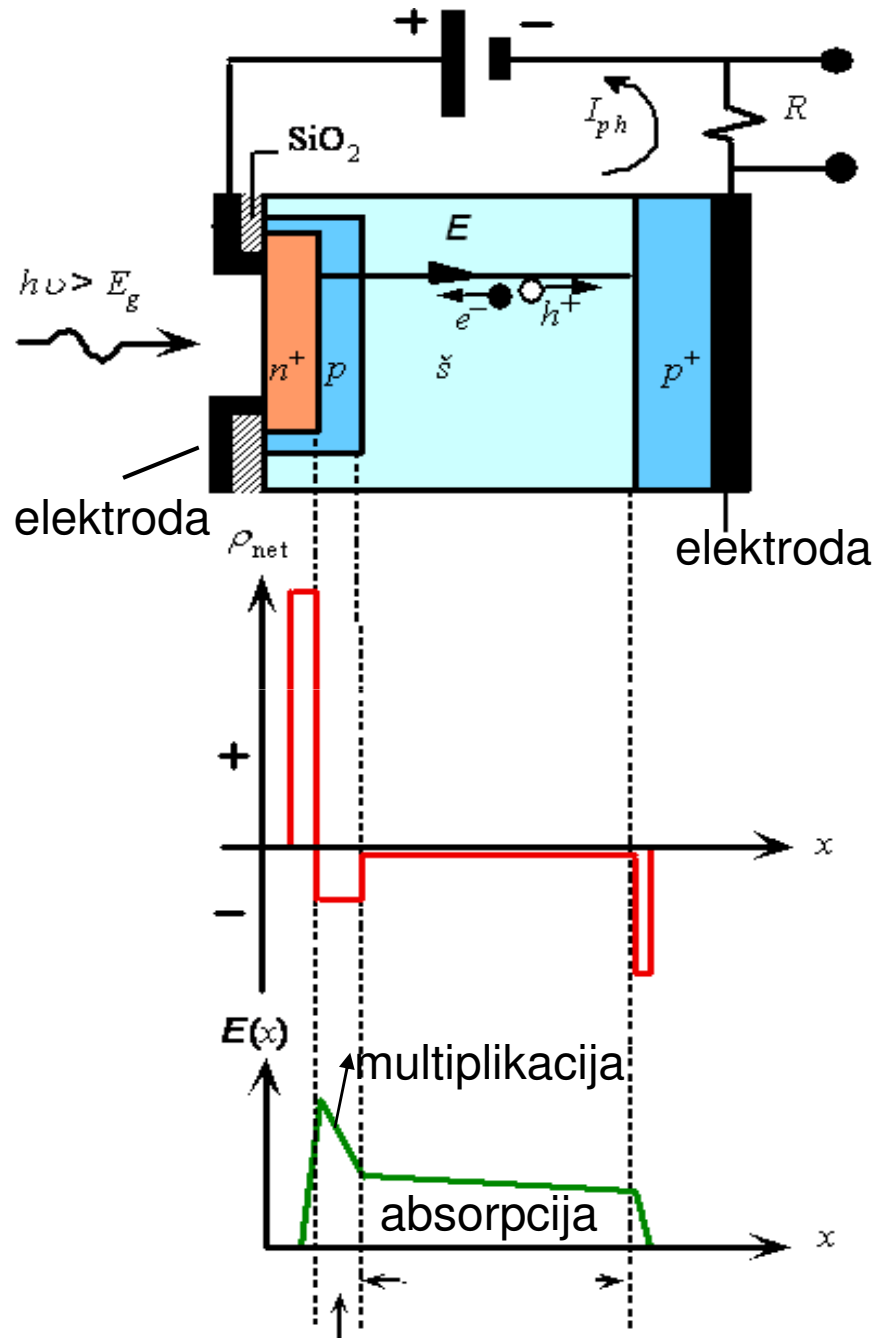
Porazdelitev električnega
polja v plasteh diode



Struktura plazovne diode APD



Dioda APD



Struktura plasti

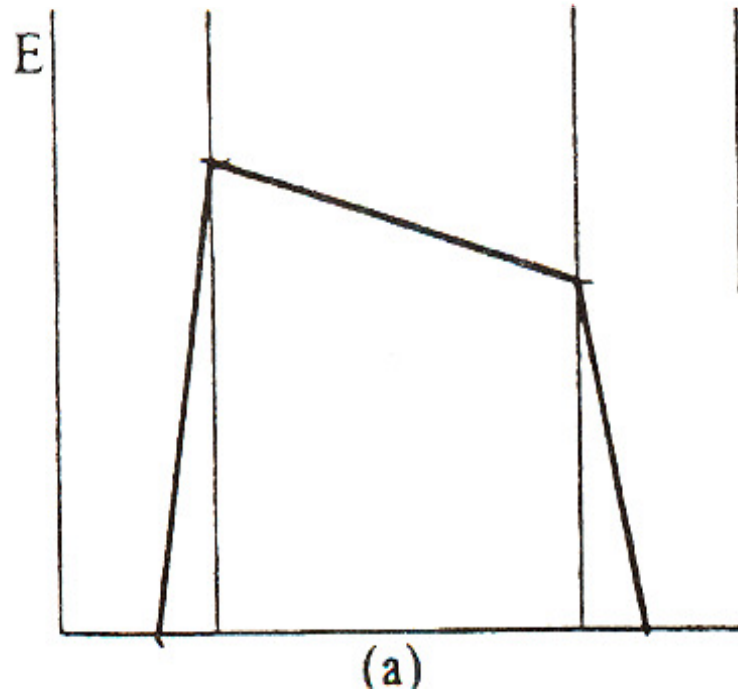
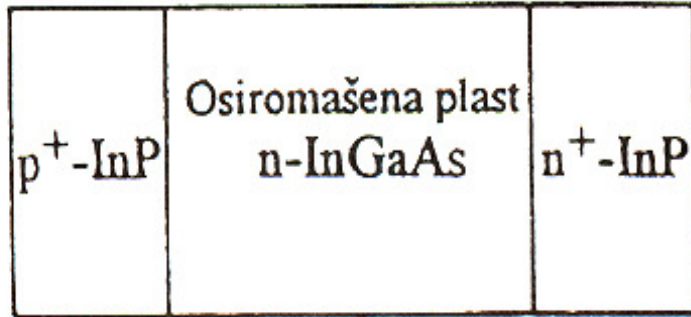
Porazdelitev elektrine:

- n^+ močna pozitivna
- p negativna
- š majhna negativna
- p^+ močna negativna

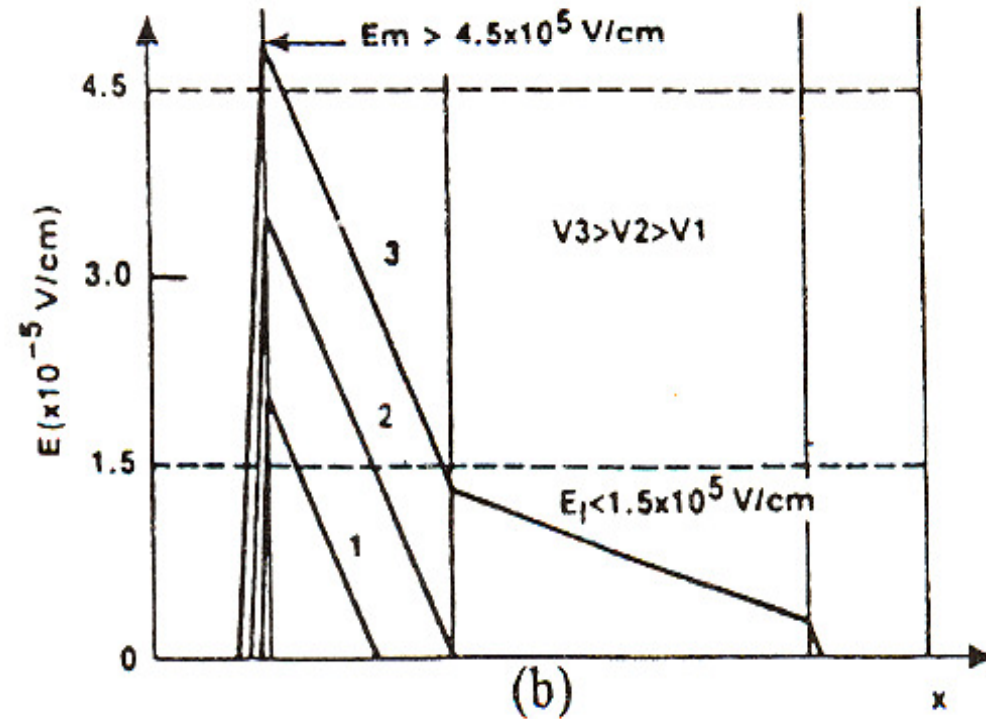
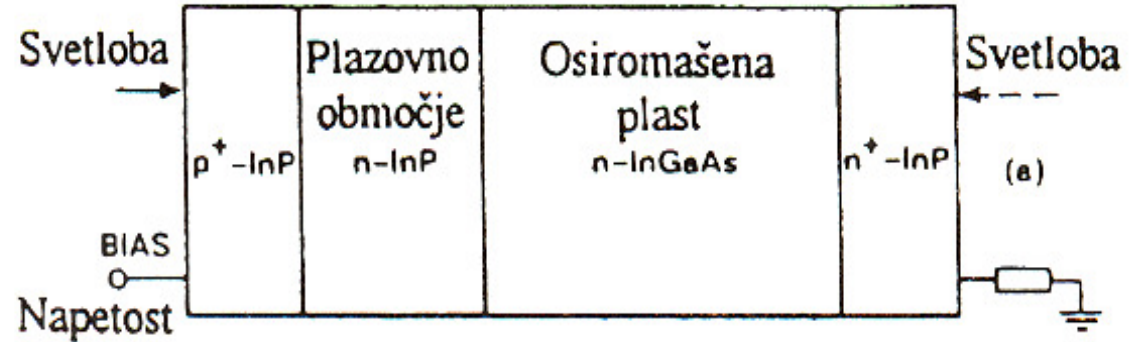
Porazdelitev polja

Razvoj diode APD v SAM-APD

APD

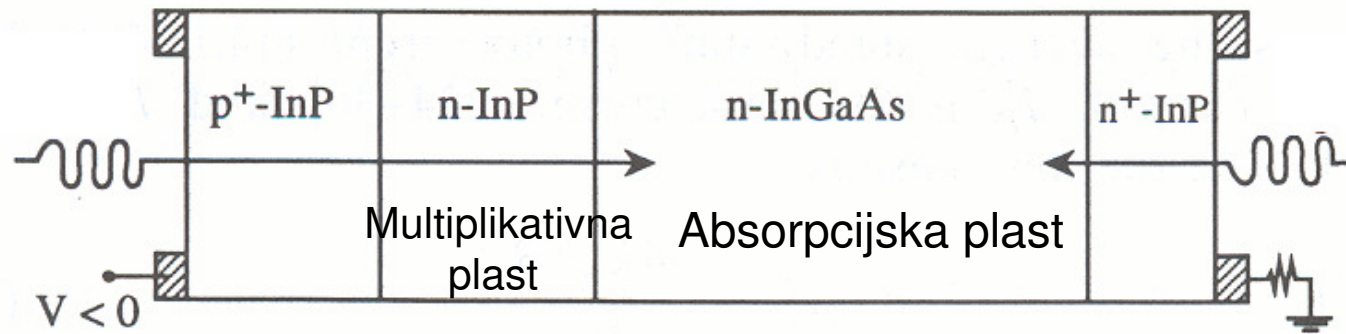


SAM-APD



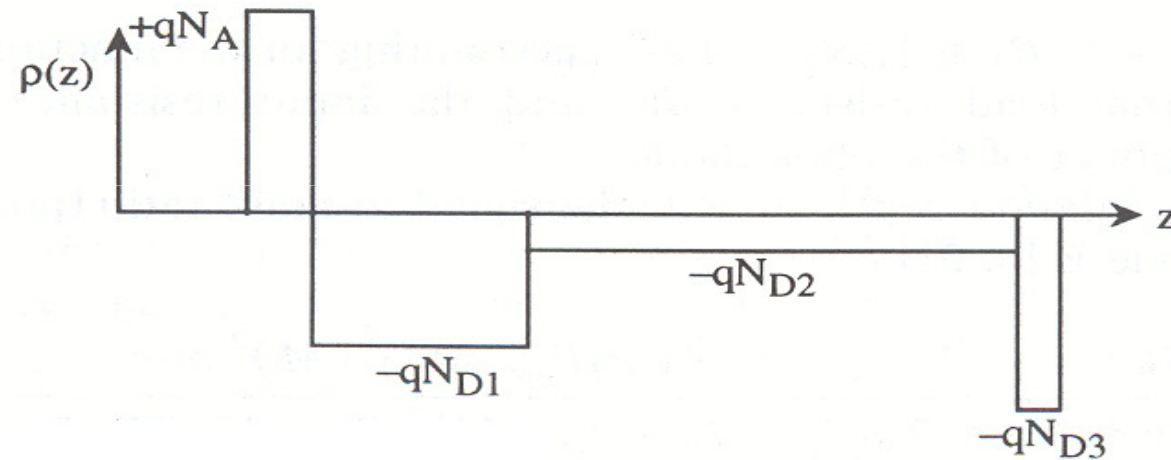
Struktura diode SAM-APD

Ločitev
absorpcije in
multiplikacije

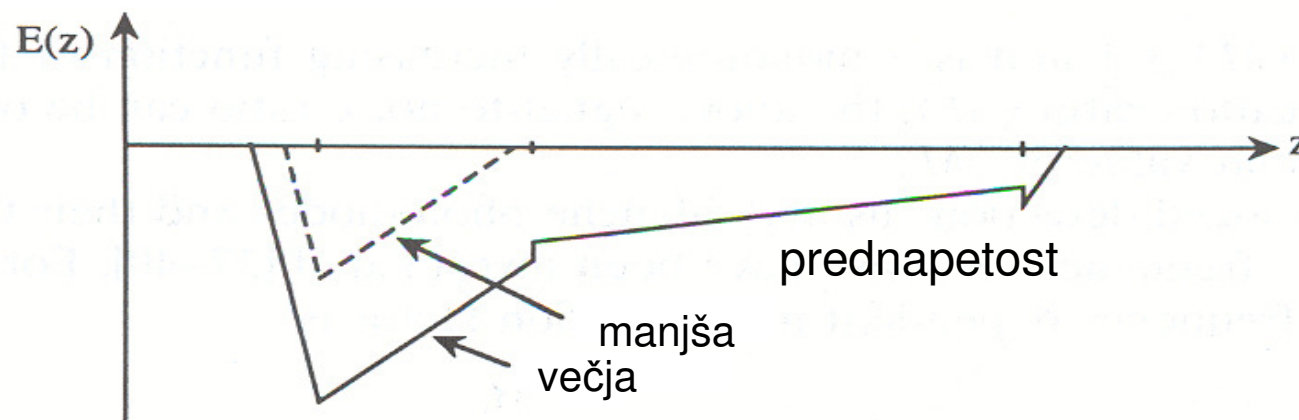


Vpadna
svetloba

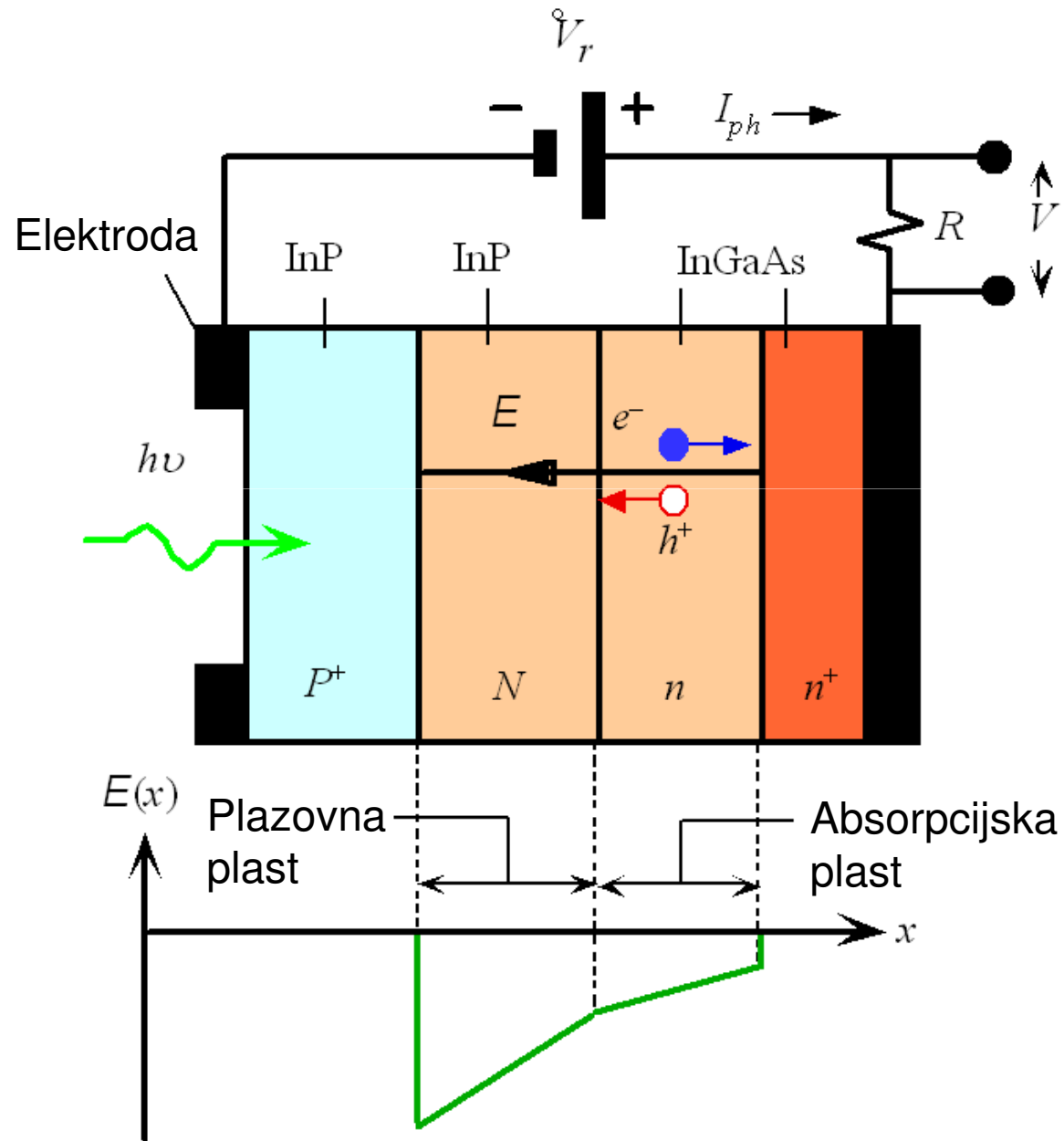
Porazdelitev
elektrine



Porazdelitev
električnega
polja

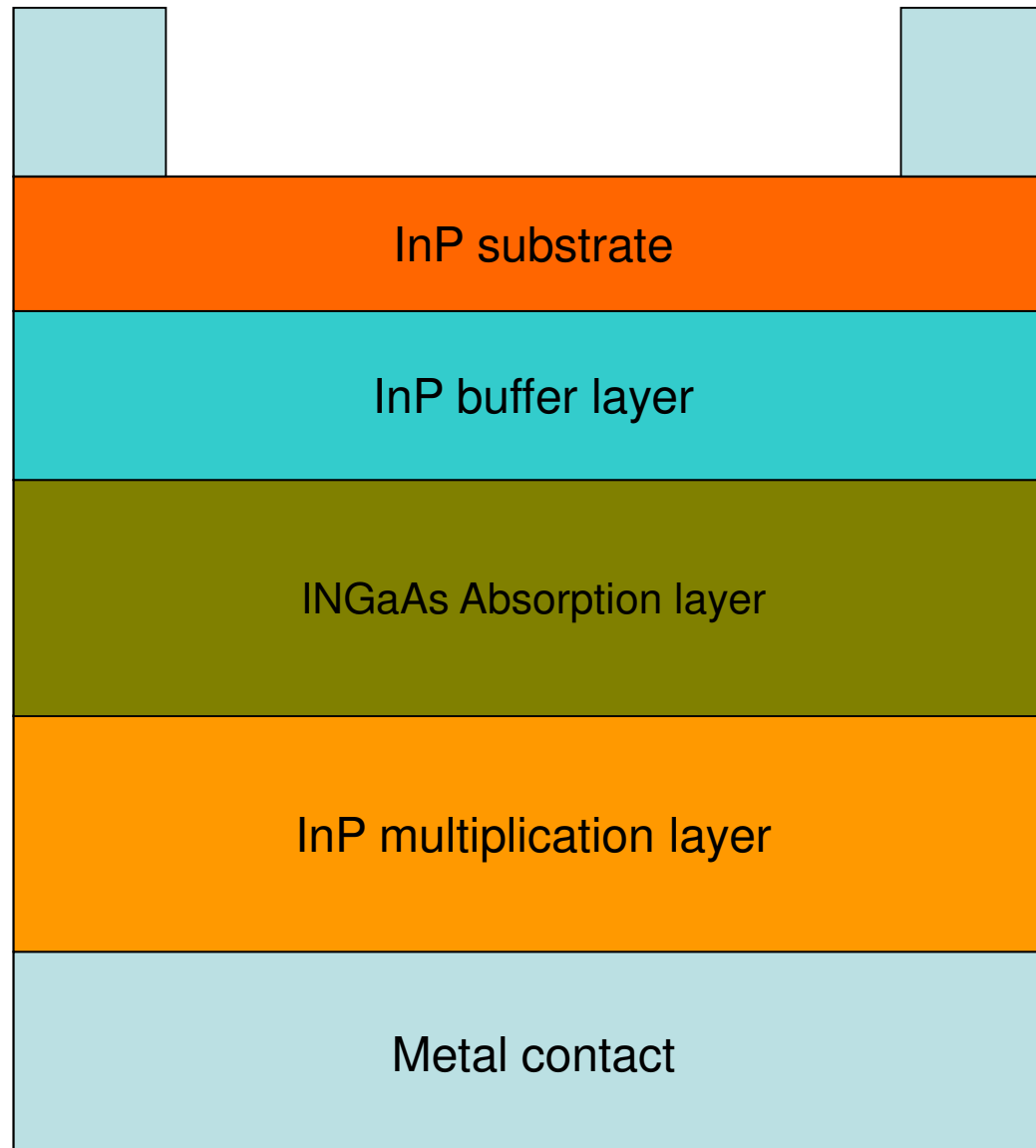


Struktura diode SAM-APD



Struktura diode SAM - APD

51



Dioda Si APD - signal in šumi

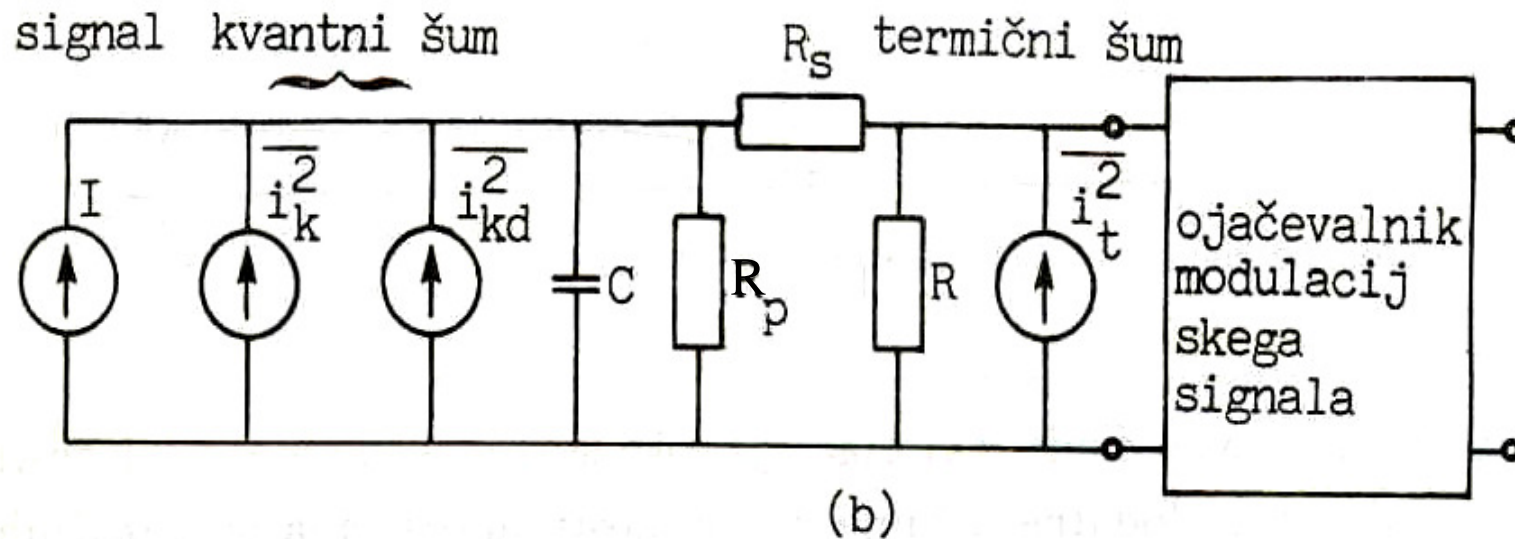
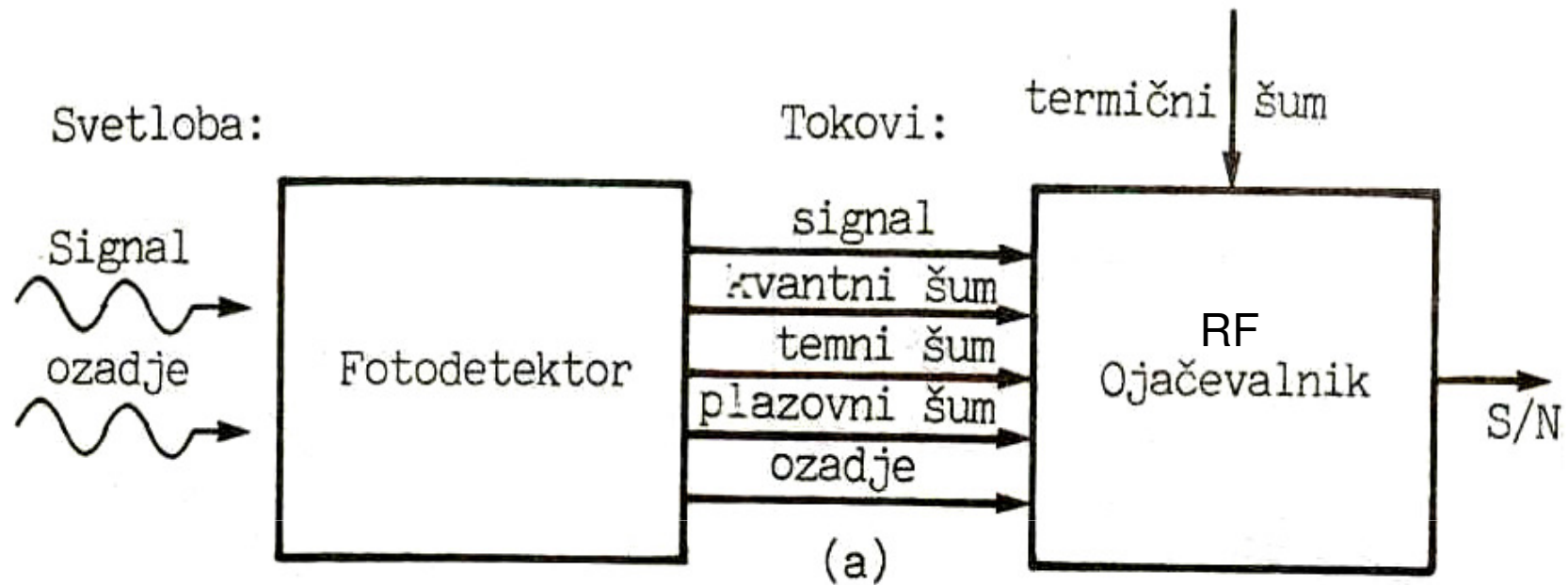
52

vhodna moč	moč signala	kvantni šum fototoka	kvantni šum temnega toka	termični šum	S/N	kvantna meja S/N_k enačba (11.6)
P/dBm	$S/\mu W$	$N_f/\mu W$	$N_D/\mu W$	$N_t/\mu W$		
-10	$9 \cdot 10^2$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$6,25 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^5$
-20	9	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^4$
-30	$9 \cdot 10^{-2}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^3$
-40	$9 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$3,52 \cdot 10^1$	$3,1 \cdot 10^2$
-50	$9 \cdot 10^{-6}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$7,14 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^1$
-60	$9 \cdot 10^{-8}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$	3,1
-70	$9 \cdot 10^{-10}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$

$$\frac{S}{N} = \frac{\left(M \eta \frac{eP}{hf}\right)^2 R}{M^2 F(M) 2e \left(\eta \frac{eP}{hf} + I_D\right) BR + 4kT_e B},$$

$\rho = 0,5 \text{ A/W}$
 $I_d = 10 \text{ nA}$
 $M = 60$
 $F(M) = 5$
 $R = 100 \text{ } \Omega$
 $T_e = 300 \text{ K}$
 $B = 10 \text{ MHz}$

Signal, šumi in nadomestna vezava



Dioda APD – šumi in razmerje S/N

Tok signala sorazmeren: $\langle M \rangle$:

$$i_p^2 = \frac{1}{2} \left(\eta P_{opt} \frac{q}{\hbar \omega} \right)^2 \langle M \rangle^2$$

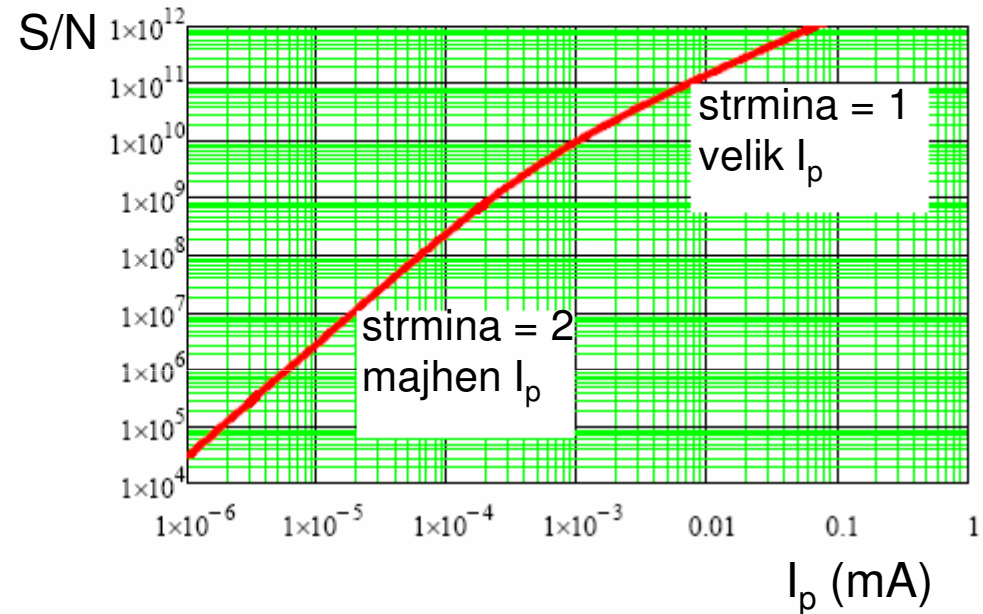
Kvantni šum: $\langle M^2 \rangle$:

$$\langle i_s^2 \rangle = 2e(I_p + I_B + I_D) F \langle M \rangle^2 dv$$

Termični šum:

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4k_B T \Delta v}{R}$$

$$SNR = \frac{\frac{1}{2} \left(\eta P_{opt} \frac{q}{\hbar \omega} \right)^2 \langle M \rangle^2}{2e(I_p + I_B + I_D) F \langle M \rangle^2 dv + \frac{4k_B T \Delta v}{R}}$$



Upoštevani šumi:

- kvantni šum signala
- kvantni šum temnega toka
- kvantni šum toka ozadja
- termični šum

Razmerje S/N

Dioda APD:

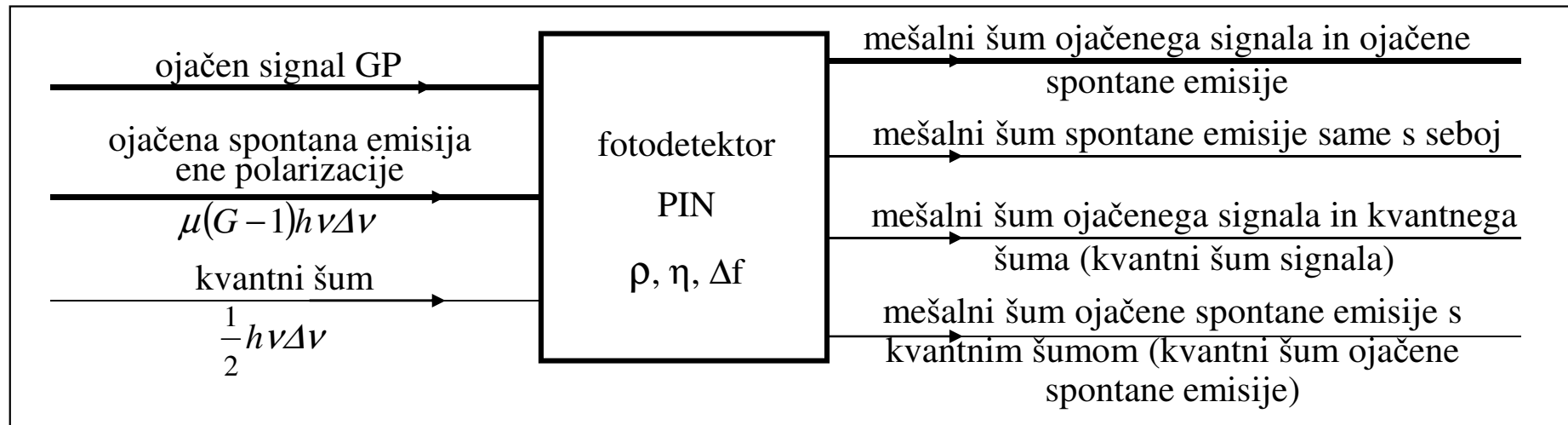
$$\text{APD: } SNR = \frac{\frac{1}{2} \left(\eta P_{opt} \frac{q}{\hbar \omega} \right)^2 \langle M \rangle^2}{2e(I_p + I_B + I_D) F \langle M \rangle^2 dv + \frac{4k_B T \Delta v}{R}}$$

Dioda PIN:

$$\text{p-i-n: } \langle M \rangle = 1, F = 1$$

$$SNR = \frac{\frac{1}{2} \left(\eta P_{opt} \frac{q}{\hbar \omega} \right)^2}{2e(I_p + I_B + I_D) dv + \frac{4k_B T \Delta v}{R}}$$

Mešalni šumi fotodetektorja (nad.)



- Mešalni šum ojačenega signala ni ojačena spontana emisija

$$\overline{i_{sig-sp}^2} = 4\rho^2 PG(G-1)\mu h\nu_0 \Delta f = 4e\eta I(G-1)\mu \Delta f$$

- Mešalni šum ojačene spontane emisije same s seboj

$$\overline{i_{sp-sp}^2} = 2\rho^2 \mu^2 (G-1)^2 (h\nu_0)^2 (2\Delta\nu - \Delta f) \Delta f \doteq 4e^2 \eta^2 \mu^2 (G-1)^2 \Delta\nu \Delta f$$

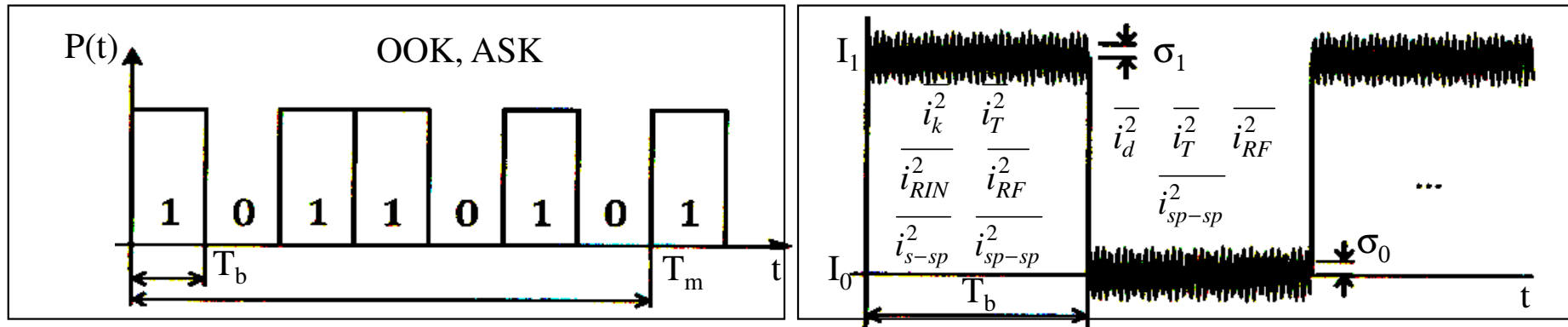
- Mešalni šum ojačenega signala in kvantnega šuma

$$\overline{i_{sig-kv}^2} = 2e\rho GP \Delta f \doteq 2eI \Delta f$$

- Mešalni šum (polarizirane) ojačene spontane emisije s kvantnim šumom

$$\overline{i_{sp-kv}^2} = 4e\eta\rho\mu(G-1)h\nu_0\Delta\nu\Delta f = 4e^2\eta^2\mu(G-1)\Delta\nu\Delta f \doteq 2eI_{ASE} \Delta f, \quad I_{ASE} = 2\mu(G-1)\Delta\nu$$

Optični in električni šumi



1. Šumi v času trajanja impulza (bitna perioda 1)

• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}
- intenzitetni šum P_{RIN}

• šumi v električnem delu zveze

- zrnati (kvantni in plazovni) šum $\overline{i_k^2}$
- mešalni šum signala in ASE $\overline{i_{ASE}^2}$
- mešalni šum spontane emisije $\overline{i_{sp-sp}^2}$
- toplotni šum $\overline{i_T^2}$
- relativni intenzitetni šum $\overline{i_{RIN}^2}$
- ojačevalni šum RF ojač. $\overline{i_{RF}^2}$

2. Šumi v odsotnosti impulza (bitna perioda 0) pri idealnem ugasnem razmerju

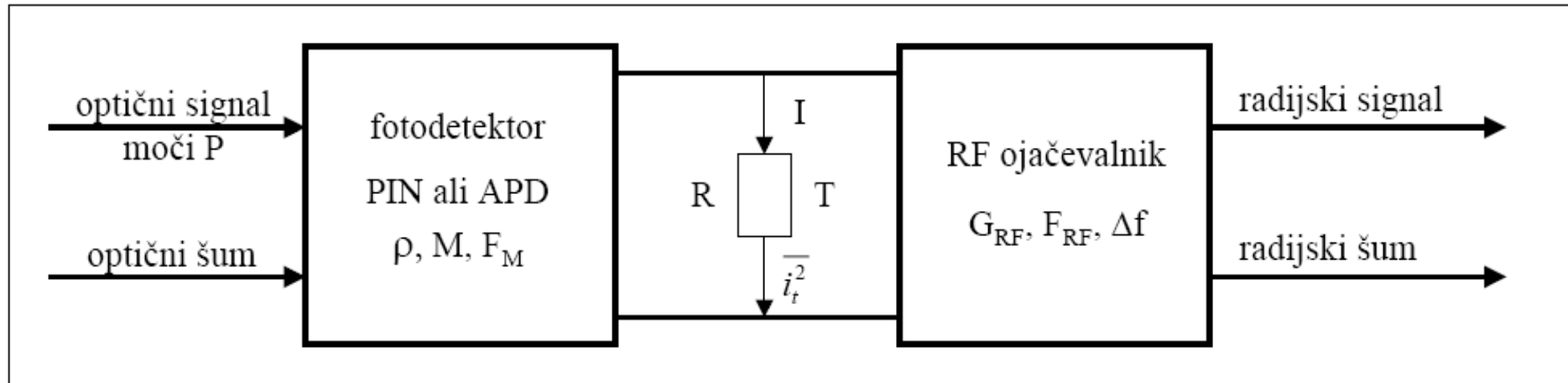
• šumi v optičnem delu zveze

- kvantni šum (vakuumsko polje) P_k
- šum ojačene spontane emisije P_{ASE}

• šumi v električnem delu zveze

- šum temnega toka $\overline{i_d^2}$
- mešalni šum spontane emisije $\overline{i_{sp-sp}^2}$
- toplotni šum $\overline{i_T^2}$
- ojačevalni šum RF ojač. $\overline{i_{RF}^2}$

Šumi fotodetektorja in RF ojačevalnika⁵⁸



- Šum na izhodu plazovne fotodiode APD - kvantni in dodatni šum (multiplikativni šum)

$$\overline{i_{APD}^2} = 2e\rho P\Delta f M^2 F_M \quad (\text{dioda PIN : } M = 1, F_M = 1), \quad \rho = \frac{\eta e}{h\nu} \text{ odzivnost}$$

- Toplotni šum delovnega upora fotodetektorja

$$\overline{i_t^2} = \frac{4k_B T \Delta f}{R} \quad R, \text{ upornost bremena}$$

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, Boltzmannova konstanta

- Toplotni šum delovnega upora fotodetektorja vključno s šumom RF ojačevalnika

$$\overline{i_t^2} = \frac{4k_B T F_{RF} \Delta f}{R} \quad F_{RF}, \text{ šumni faktor RF ojačevalnika}$$

KONEC