

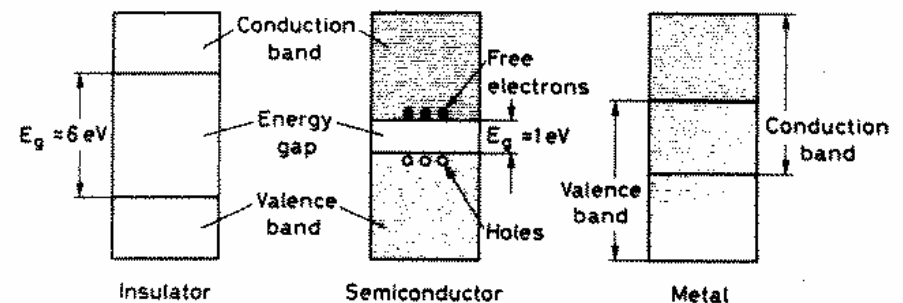
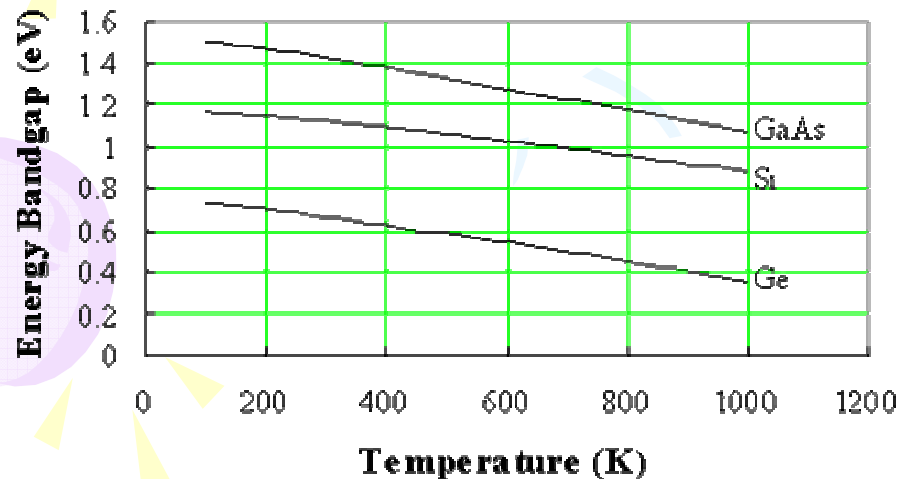


# ČETVRTO PREDAVANJE

## **PN SPOJ** **DIODE**

# POLUPROVODNICI

- SPECIFICNA ELEKTRICNA OTPORNOST ( $\rho$ ): OD  $10^{-4} \Omega\text{m}$  DO  $10^{10} \Omega\text{m}$
- ENERGIJSKI PROCEP IZMEĐU VALENTNE I PROVODNE ZONE JE MANJI REDA VELIČINE 1 eV ; ZBOG TOGA NA SOBNOJ TEMPERATURI IZVESTAN BROJ ELEKTRONA PRELAZI U PROVODNU ZONU
- NAJNACAJNIJI: Si, Ge, Ga As

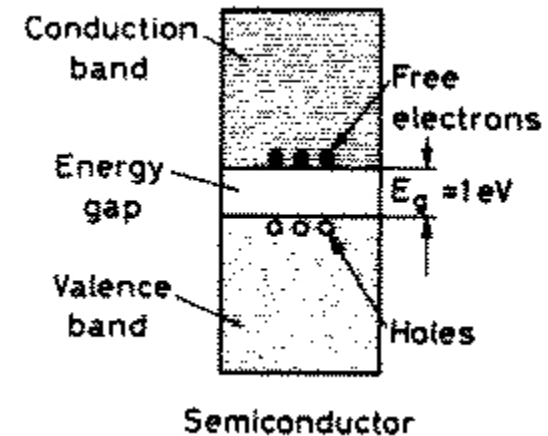
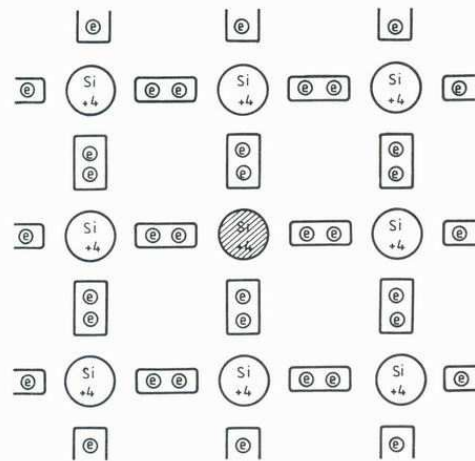


# OSNOVNE OSOBINE Ge, Si, GaAs

- **Ge** – VELIKA OSETLJIVOST NA TEMPERATURU, SLOZENI TEHNOLOSKI POSTUPCI DOBIJANJA
- **Si** – ZA SADA BROJ JEDAN U SAVREMENOJ POLUPROVODNICKOJ TEHNOLOGIJI; IMA GA U VELIKIM KOLICINAMA U ZEMLJINOJ KORI, IMA ZNATNO VECI  $E_g$  OD Ge PA JE MNJA SOPSTVENA KONCENTRACIJA I MANJE ZAGREVANJE; **MAKSIMALNA RADNA TEMPERATURA JE OKO 200°C**; BOLJA TOPLOTNA PROVODNOST OD Ge
- **GaAs** – MATERIJAL U EKSPANZIJI; VECA POKRETLJIVOST ELEKTRONA – VECA BRZINA RADA ELEMENTA, MAKSIMALNA RADNA TEMPERATURA 300°C

# CIST PLUPROVODNIK

- PRIRODNI CIST POLUPROVODNIK- BEZ HEMIJSKIH PRIMESA, IMA STRUKTURU U VIDU KRISTALNE REŠETKE U ČIJIM SE ČVOROVIMA NALAZE ATOMI KOJI SU MEĐUSOBNO POVEZANI VALENTNIM VEZAMA



- NA SOBNOJ TEMP NEKI ELEKTRONI PRELAZE U PROVODNU ZONU, NASTAJU PAROVI ELEKTRONI SUPLJINE

KONCENTRACIJE  $n_i$ ,  $p_i$

USPOSTAVLJA SE DINAMICKA RAVNOTEZA

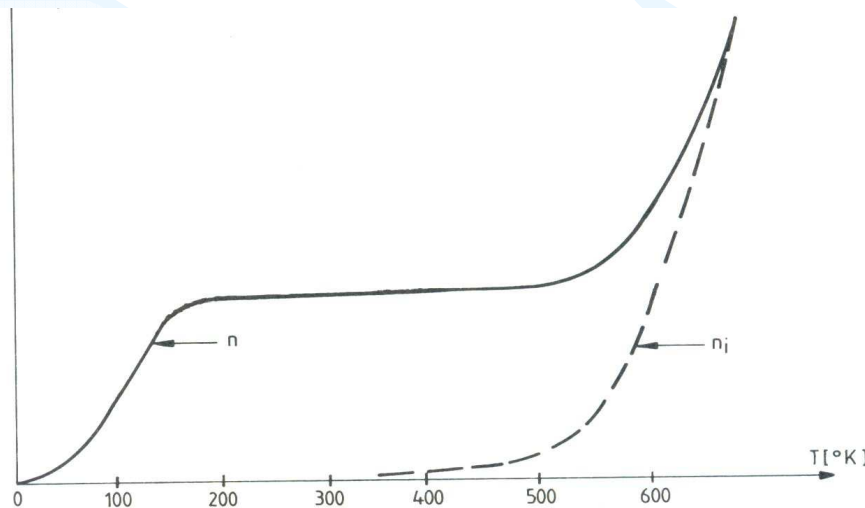
# POLUPROVODNIK SA PRIMESAMA

- VROJ ATOMA PRIMESE JE MNOGO MANJI NEGO BROJ ATOMA POLUPROVODNIKA
- VALENCA MATERIJALA PRIMESE TREBA DA BUDE ZA JEDAN MANJA ILI VEĆA OD VALENCE POLUPROVODNIKA
- AKCEPTORSKE PRIMESE (B,In,Ga):KONCENTRACIJA Na
- DONORSKE PRIMESE (P,As): KONCENTRACIJA Nd
- IZBOROM VRSTE PRIMESE I NJENE
- KONCENTRACIJE MOGU SE NAPRAVITI POLUPROVODNICI **P** I **N** TIP

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

# KONCENTRACIJA SLOBODNIH NOSILACA

- CIST POLUPROVODNIK:  $n_i = p_i$
- SOPSTVENA KONCENTRACIJA:  $n_i^2 = p_i^2 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_{g0}}{kT}}$
- U POLUPROVODNICIMA SA PRIMESAMA:  $n \cdot p = n_i^2$
- ELEKTRICNA NEUTRALNOST:  $N_d + p = N_a + n$



Sl.1.4. Zavisnost koncentracije slobodnih elektrona u poluprovodniku N tipa od temperature.

$$A = 1.26 \cdot 10^{33} \text{ atoma}^2 / (^\circ\text{C}^3 \text{m}^6)$$

$E_g$  – energetski procep na temp apsolutne nule

$k$  – Bolcmanova konstanta

$$k = 1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

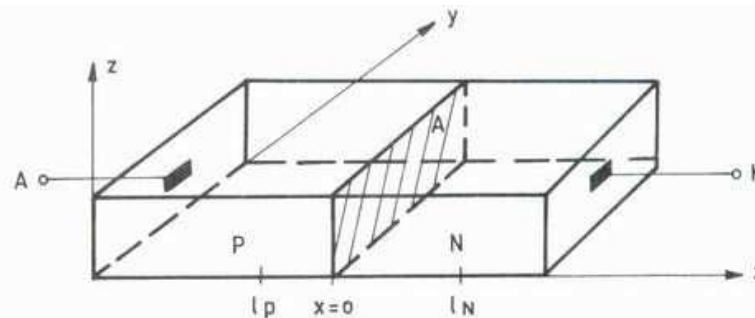
sopstvena konc Si na sobnoj T

$$1.45 \cdot 10^{10} \text{ atoma/cm}^3$$

# PROVODJENJE STRUJE U PLUPROVODNIKU

- STRUJA USLED ELEKTRICNOG POLJA
- $J = \sigma K = (q\mu_n n + q\mu_p p)K$
- POMERANJE KROZ VALENTNE ZONE TEŽE TO JE I POKRETLJIVOST ŠUPLJINA MANJA
- STRUJA USLED DIFUZIJE
- $J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$  D - DIFUZIONA KONSTANTA
- UKUPNA GUSTINA STRUJE ELEKTRONA
- $J_n = q\mu_n nK + qD_n \frac{dn}{dx}$
- UKUPNA GUSTINA STRUJE ŠUPLJINA
- $J_p = q\mu_p pK - qD_p \frac{dp}{dx}$

# PN SPOJ



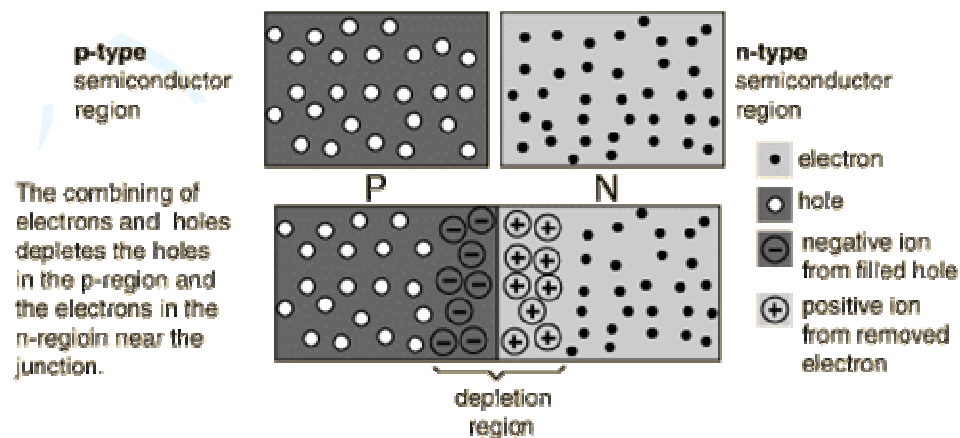
Sl. 2.1. Geometrijska struktura PN spoja sa naznačenim spoljnim izvodima (A i K).

- PN SPOJ SE PRIKLJUČUJE U ELEKTRICNO KOLO PREKO SPOLJNIH IZVODA: POTREBNO JE DA OTPORNOST SPOJA METAL POLUPROVODNIK BUDE MALA I NEYAVISNA OD SMERA STRUJE, TAKODJE KONTAKTNI POTENCIJAL TREBA DA IMA KONSTANTNU VREDNOST- **OMSKI KONTAKT**



# PN SPOJ BEZ POLARIZACIJE

- POSTO NA P STRANI IMA MNOGO VIŠE ŠUPLJINA NEGO NA N STRANI DOLAZI DO DIFUZIJE
- NA N STRANI DSPELA ŠUPLJINA JE OKRUŽENA SA MNOGO ELEKTRONA – REKOMBINACIJA
- KAO PSLEDICA DIFUZIJE I REKOMBINACIJE- OBLAST PROSTORNOG TOVARA
- OBLAST PROSTORNOG TOVARA ELEKTRIČNIM POLJEM TEŽI DA ZAUSTAVI DIFUZIJU



- IZ VEZE POTENCIJALA I RASPODELE GUSTINE NAELEKTRISANJA MOŽE SE IZRAČUNATI ELEKTRIČNO POLJE U pn SPOJU I POTENCIJAL

- NA OSNOVU ELEKTRIČNE NEUTRALNOSTI

$$|AqN_Dl_N| = |AqN_Al_P|$$

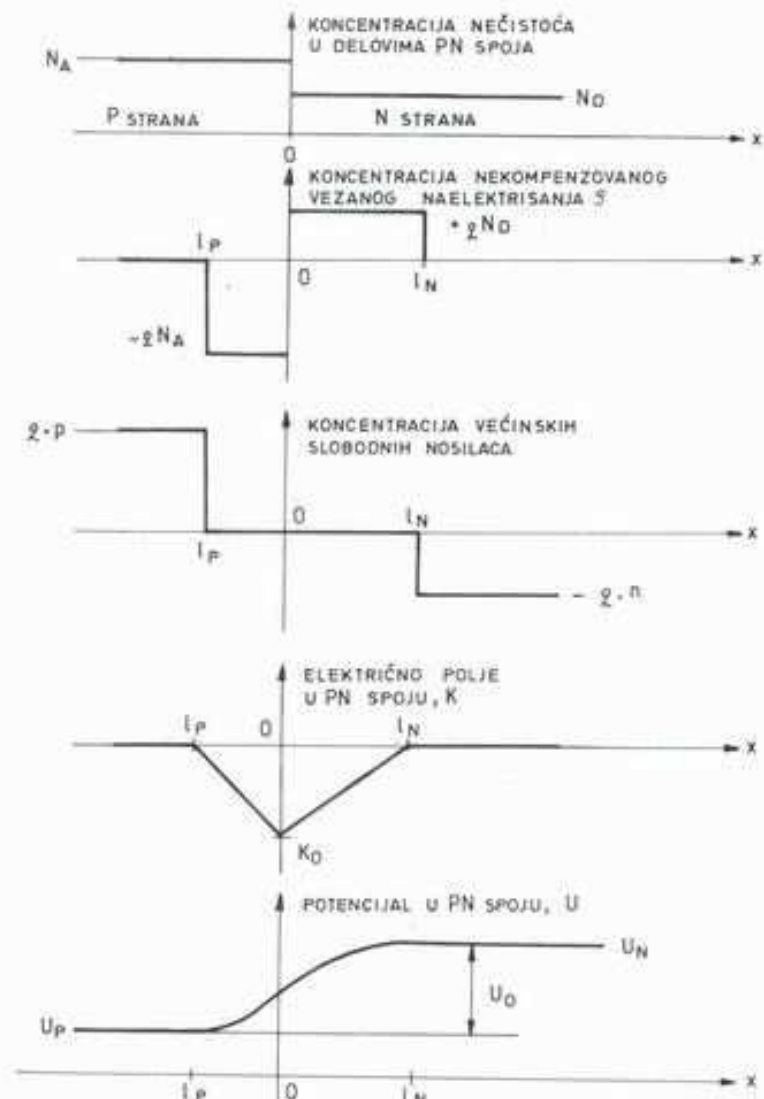
$$N_Dl_N = N_Al_P$$

POTENCIJALNA BARIJERA:

$$U_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n_{po}}$$

AKO JE  $p_{p0} \approx N_A, n_{n0} = N_D$

$$U_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$



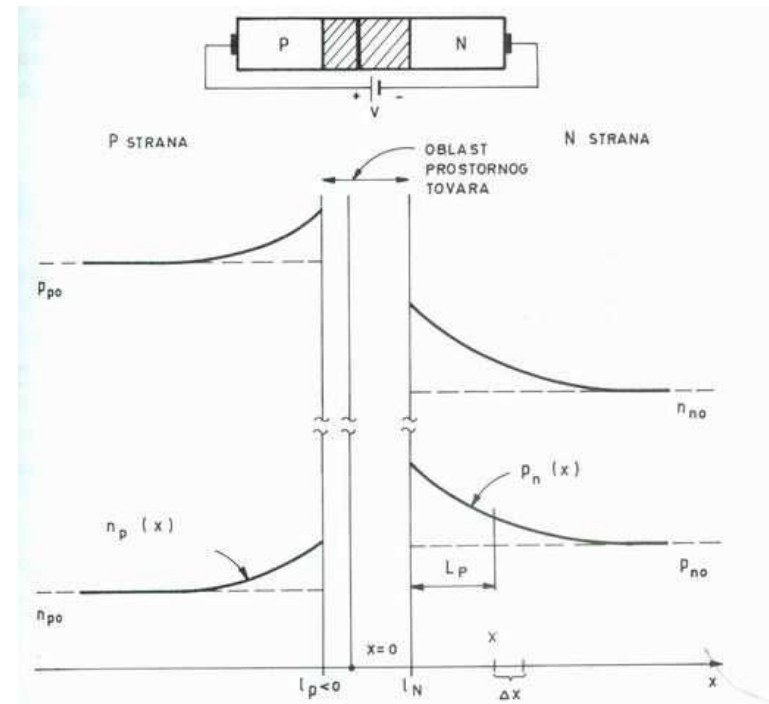
# DIREKTNO POLARISANI PN SPOJ

- SPOLJNI NAPON SE DOVODI U OPOZICIJU SA POTENCIJALNOM BARIJEROM – VEĆINSKI NOSIOCI MOGU DA SE KREĆU KROZ PN SPOJ
- ZBOG DIREKTNE POLARIZACIJE MENJA SE KONCENTRACIJA NOSILACA

$$p_n(l_N) = p_{no} e^{\frac{V}{V_T}}$$

$$n(l_P) = n_{p0} e^{\frac{V}{V_T}}$$

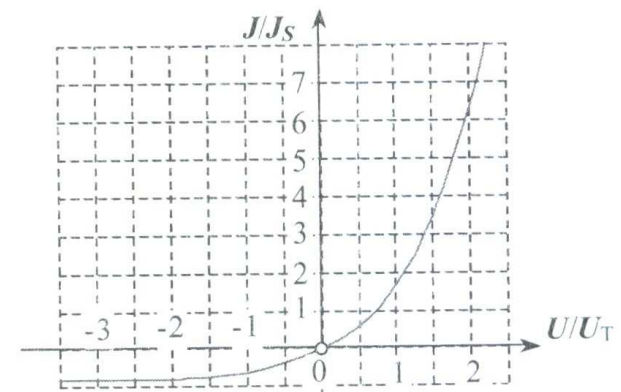
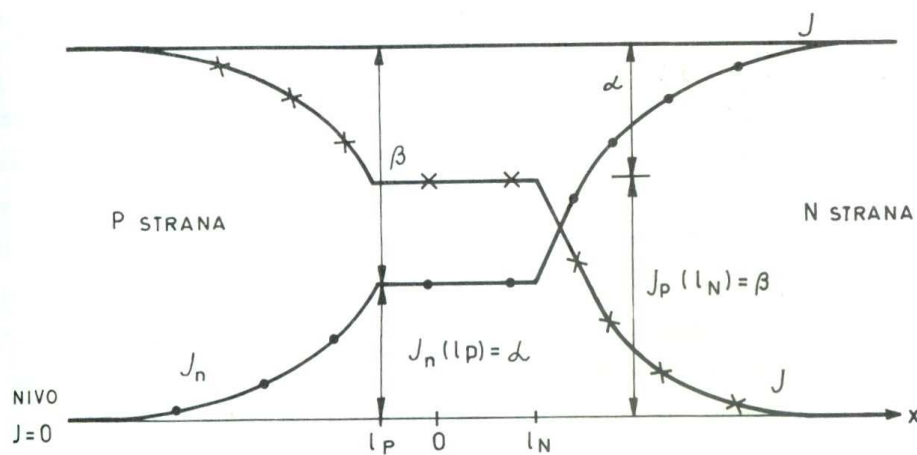
$$V_T = \frac{kT}{q}$$



- $J = J_p + J_n$

$$J = q \underbrace{\left[ \frac{D_p}{L_p} p_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right]}_{J_s} \left[ e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right] = J_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad I = I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

- $J_s$  – GUSTINA INVERZNE STRUJE ZASICENJA
- $L$  – DIFUZIONA DUŽINA



Karakteristika PN-spoja

# INVERZNO POLARISANI PN SPOJ

- POTENCIJALNA BARIJERA SE POVEČAVA; OBLAST PROSTORNOG TOVARA SE ŠIRI
- I DALJE VAZI JEDNACINA

- $$J = J_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) , \quad I = I_s (e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$$

- U SLUČAJU JAKE INVERZNE POLARIZACIJE  $V \gg V_T$  STRUJA JE NEZAVISNA OD NAPONA I JEDNAKA  $J_s$  (DOK NE DOĐE DO PROBOJA)

# KAPACITIVNOST PN SPOJA

- KAPACITIVNOST PROSTORNOG TOVARA  $C_T$  (INVERZNO POLARISAN PN SPOJ)

$$C_T = \frac{C_{T0}}{\sqrt{1 + \frac{V}{U_0}}}$$

$C_{T0}$  - KAPACITIVNOST PRI  
NULTOM NAPONU  
POLARIZACIJE

$V$  – PRIMENJENI NAPON  
INVERZNE POLARIZACIJE

- DIFUZIONA KAPACITIVNOST ( $C_D$ ) DIREKTNO POLARISAN PN SPOJ

$$C_D = \frac{I}{V_T} \tau_n \quad N_D \gg N_A$$

$$C_D = \frac{I}{V_T} \tau_p \quad N_A \gg N_D$$

# NAPONSKI PROBOJ PN SPOJA

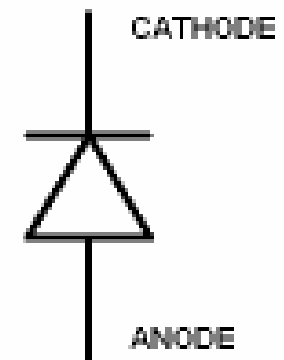
- **LAVINSKI PROBOJ** – USLED VELIKE JAČINE ELEKTRIČNOG POLJA

$$I_{SB} = MI_S \quad M = \frac{1}{1 - \left( \frac{V}{BV} \right)^n}$$

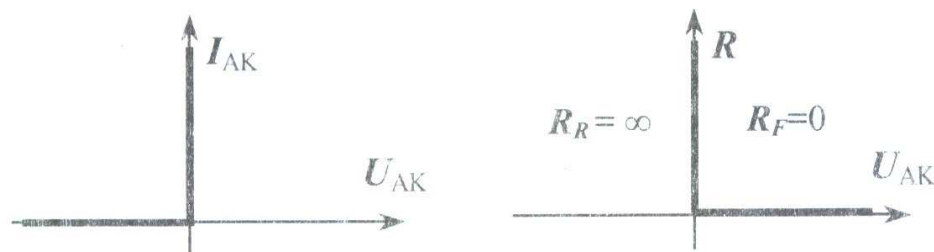
- BV-break down voltage, n od 2 do 10
- PN SPOJ SA VEĆOM KONCENTRACIJOM NEČISTOĆA IMA NIŽI PROBOJNI NAPON
- LAVINSKI PROBOJ IMA POZITIVNI TEMPERATURNI KOEFICIJENT
- **CENEROV PROBOJ** – USLED VELIKE KONCENTRACIJE PRIMESA
- CENEROV PROBOJ IMA NEGATIVNI TEMPERATURNI KOEFICIJENT

# DIODE

- SIGNALNE DIODE
- ISPRAVLJACKE DIODE
- DIODE ZA STABILIZACIJU NAPONA
- FOTOEMITUJUĆE DIODE
- FOTOOSETLJIVE DIODE



## IDEALNA DIODA

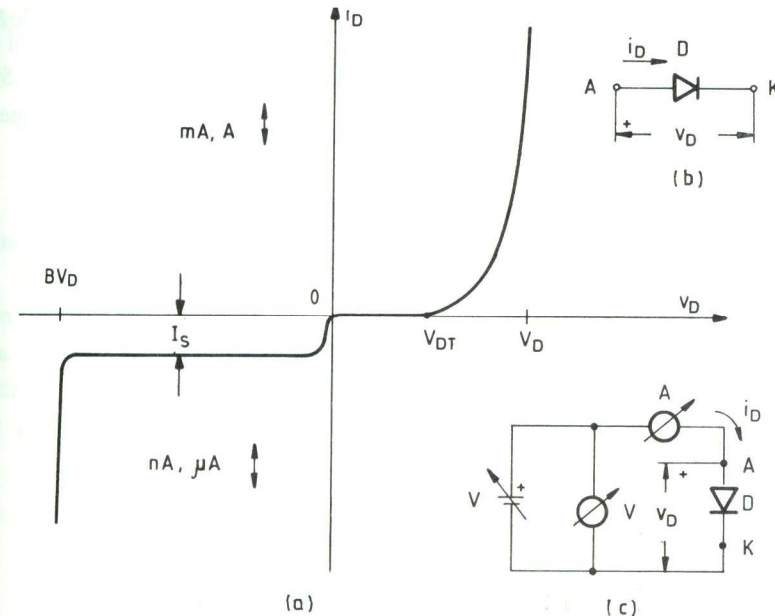




# POLUPROVODNICKA DIODA

- PN SPOJ
- JEDNACINA ZA STRUJU

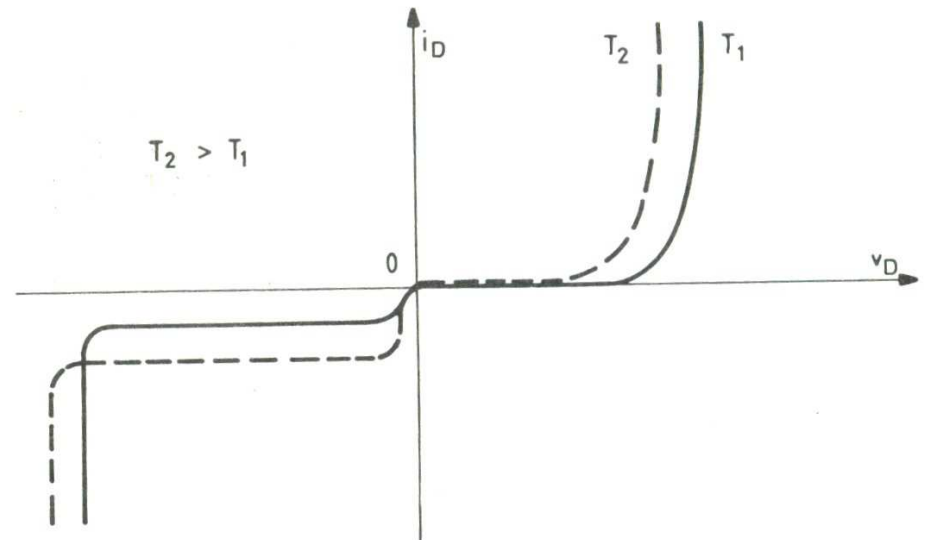
$$i_D = I_S \left( e^{\eta \frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$



- NAPON PROVODNE DIODE  $V_D$  ODGOVARA NAPONU IZMEDJU ANODE I KATODE KADA DIODA PROVODI STRUJU VECEG INTENZITETA (ZA Si DIODE 0.6 V ZA Ge 0.2 V)
- $I_S \sim \mu\text{A}$  za Ge i  $\sim \text{nA}$  za Si za signalne diode
- Kod snažnih ispravljačkih dioda  $I_S$  može biti i 100mA

# PROMENA PARAMETARA SA TEMPERATUROM

- $I_S$ ,  $V_D$ , BV ZAVISE OD TEMPERATURE
- SMANJENJE  $V_D$  SA PORASTOM TEMPERATU
- POVEĆANJE  $I_S$  I BV SA PORASTOM TEMPERATURE (dominantan lavinski efekat)



# RAD DIODE PRI JEDNOSMERNOJ POBUDI RAD DIODE PRI JEDNOSMERNOJ POBUDI

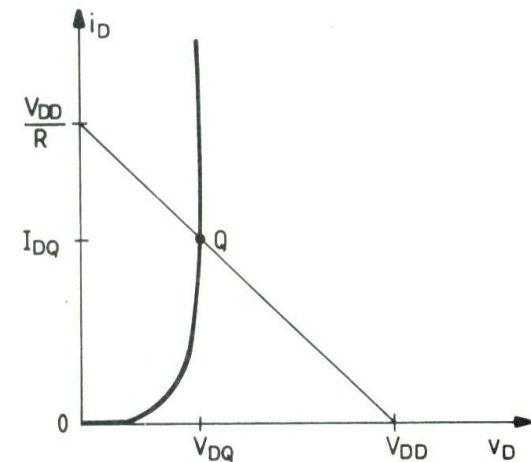
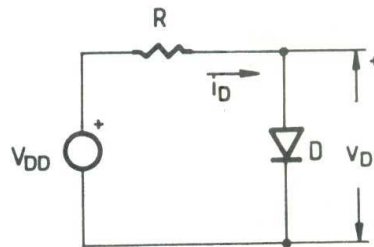
- ZA KOLO NA SLICI
- STATIČKA  
KARAKTERISTKA DIODE

$$i_D = I_S \left( e^{\eta \frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

- RADNA PRAVA

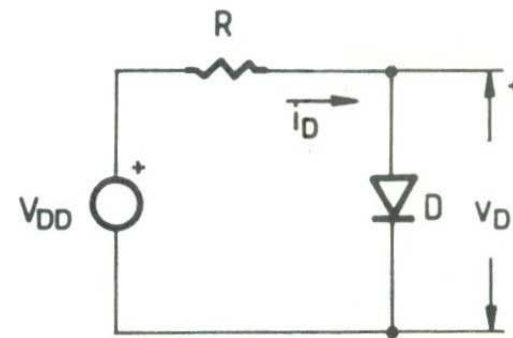
$$v_D = V_{DD} - R i_D$$

- Q – RADNA TAČKA



# RAD DIODE PRI JEDNOSMERNOJ POBUDI

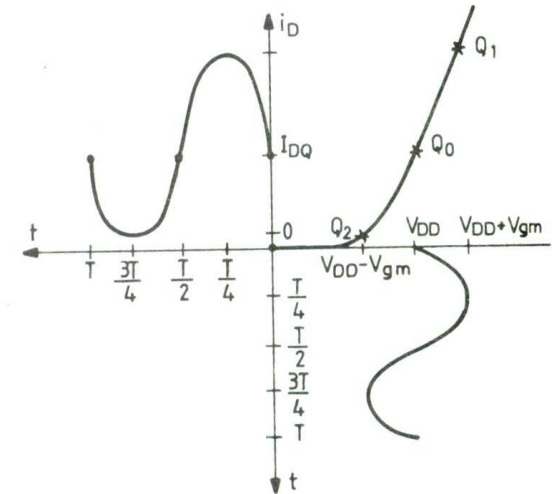
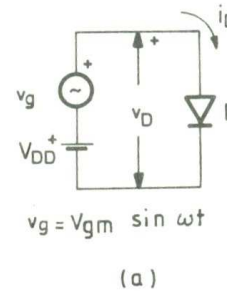
- PRI DOVOLJNO IZRAŽENOJ DIREKTNOJ POLARIZACIJI MOŽEMO SMAATRATI DA JE  $V_D = 0.6V$
- ONDA JE STRUJA DIODE
- $I_{DQ} = (V_{DD} - 0.6V) / R$



# RAD DIODE PRI POBUDI JEDNOSMERNIM I NAIZMENIČNIM SIGNALOM

- UKUPAN ODZIV SE DOBIJA PRINCIPOM SUPERPOZICIJE:

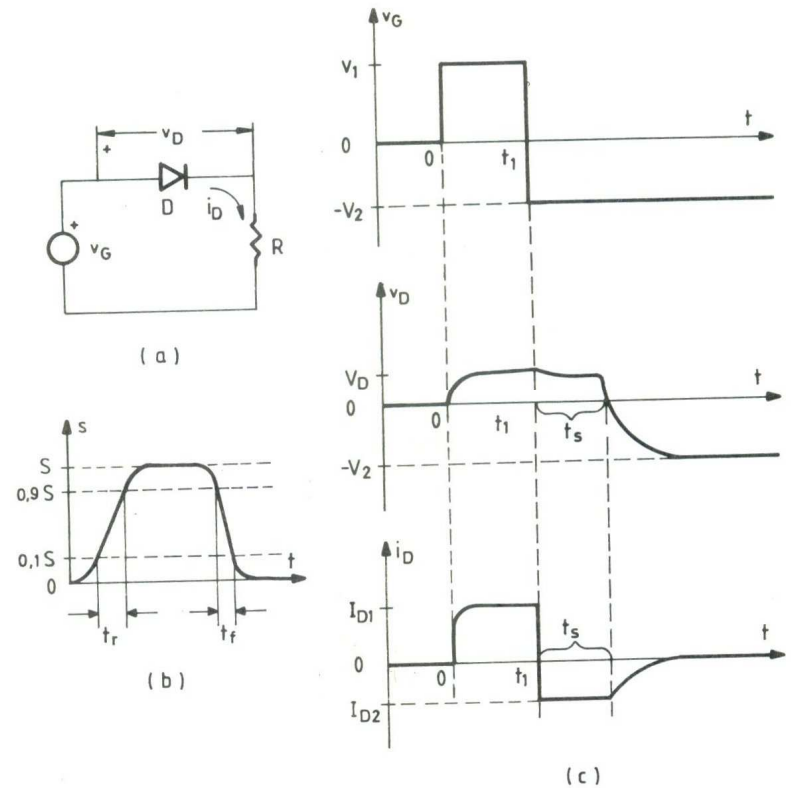
UKINU SE NAIZMENIČNE POBUDE I IZRAČUNA SE JEDNOSMERNI ODZIV  
ZATIM SE UKINU JEDNOSMERNE I AKTIVIRAJU PROMENLJIVE POBUDE  
SVAKA DIODA SE ZAMENI DINAMIČKOM  
OTPORNOŠĆU I IZRAČUNA RASPODELA PROMENLJIVIH KOMPONENATA SIGNALA



$$i_D = I_{DQ} + \left( \frac{di_D}{dv_D} \bigg|_{v_D=V_{DD}} \right) v_g = I_{DQ} + i_d$$
$$r_d = \frac{1}{\frac{di_D}{dv_D} \bigg|_{Q_0}} = \frac{V_T}{I_{DQ}}$$

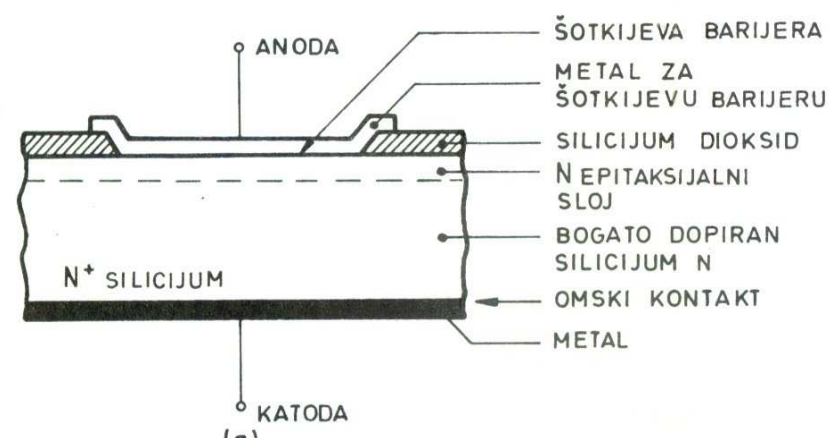
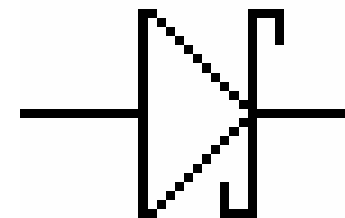
# PREKIDAČKI REŽIM RADA DIODE

- $t_r$  - VREME USPOSTAVLJANJA  
(rise time) zavisi od  $C_D$
- $t_f$  - VREME OPADANJA  
(fall time) (zavisi od  
vremena rasterećenja  $t_s$ , i  
od kapacitivnosti  $C_T$ )
- $t_u$  - VREME UKLJUČENJA
- $t_i$  - VREME ISKLJUČENJA



# ŠOTKIJEVA DIODA

- SPOJ METAL – POLUPROVODNIK OSEDUJE USMERAČKO DEJSTVO I NAZIVA SE ŠOTKIJEVA BARIJERA
- ŠOTKIJEVA DIODASE KARAKTERIŠE **MALIM PADOM NAPONA PROVODNE DIODE (0.2-0.3 V)** I NEŠTO VEĆOM INVERZNOM STRUJOM
- NEMA EFEKTA NAGOMILAVANJA PA JE  $t_s=0$ . VREME UKLJUČENJA MALO JER JE  $C_D$  MALO. **ŠOTKIJEVA DIODA JE NEŠTO BRŽA OD PN DIODA**

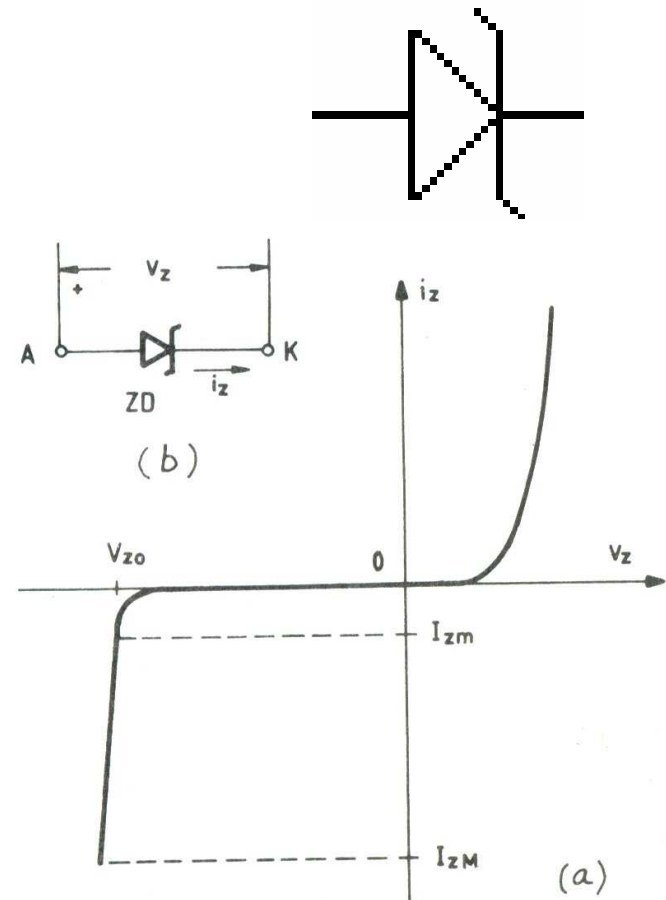


# ZENEROVA DIODA

- ZENEROVA DIODA SE FORMIRA KAO JAKO DOPIRAN PN SPOJ
- DOBIJA SE MALI PROBOJNI NAPON, MALA INVERZNA STRUJA I POVEĆANA KAPACITIVNOST  $C_T$
- RADNA TAČKA SE POSTAVLJA U OBLAST PROBOJA:

$$V_Z = V_{Z0} + r_Z (I_Z - I_{Zm})$$

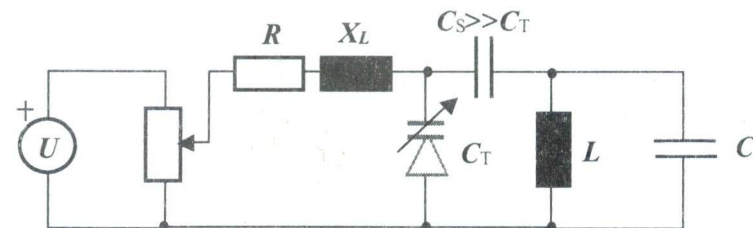
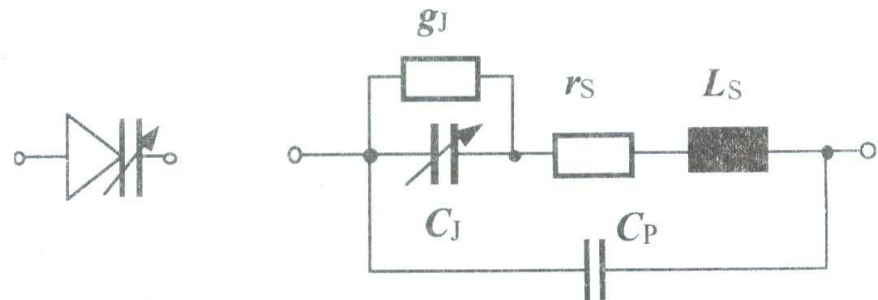
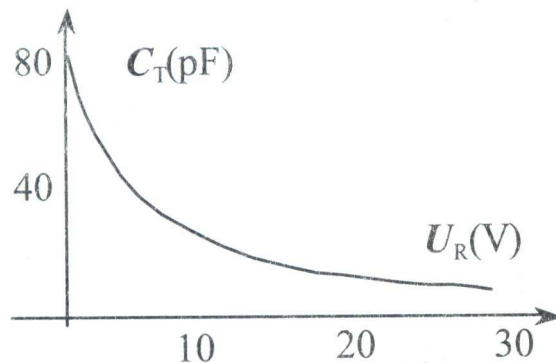
**ZENEROVA DIODA SE PRIMENJUJE KAO NAPONSKA REFERENCA (ZA IZRADU REFERENTNIH IZVORA NAPONA) PA JE BITNO DA DINAMIČKA OTPORNOST  $r_Z$  BUDE ŠTO MANJA**





# VARIKAP DIODA

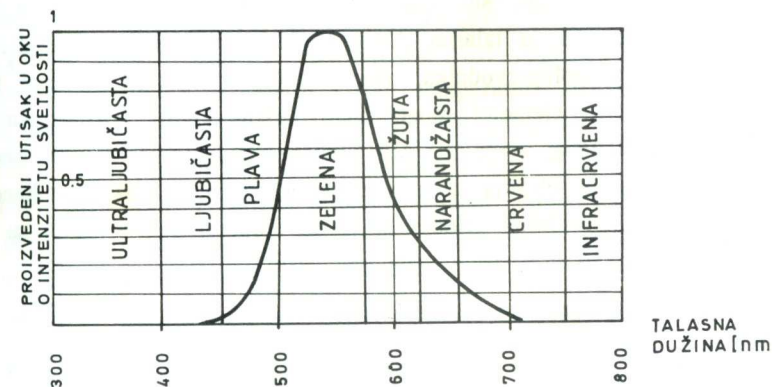
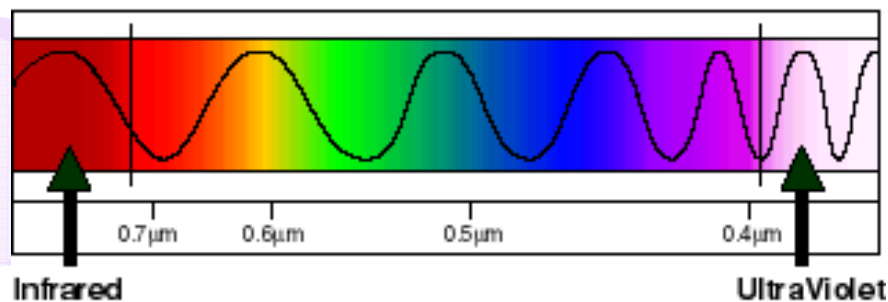
- KAPACITIVNOST INVERZNO POLARISANOG SPOJA ZAVISI OD NAPONA NA SPOJU
- OVA OSOBINA SE KORISTI ZA IZRADU DIODA SA PROMENLJIVOM KAPACITIVNOŠĆU
- DIODA KAO KONDENZATOR SA KONTROLISANOM KAPACITIVNOŠĆU KORISTI SE U FREKVENCIJSKI SELEKTIVNIM KOLIMA KOJA RADE NA VRLO VISOKIM UČESTANOSTIMA



# OPTOELEKTRONSKE POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

- PRETVARAJU SVETLOSNU ENERGIJU U ELEKTRIČNU ILI OBRNUTO
- SVETLOST: ELEKTROMAGNETNO ZRAČENJE KOJE IMA TALSNO-KORPUSKULARNU PRIRODU
- OPSEG TALASNIH DUŽINA: 10nm – UTLRALJUBIČASTI DEO DO  $10^6$ nm (VIDLJIVA SVETLOST OD 380 nm – 750 nm)

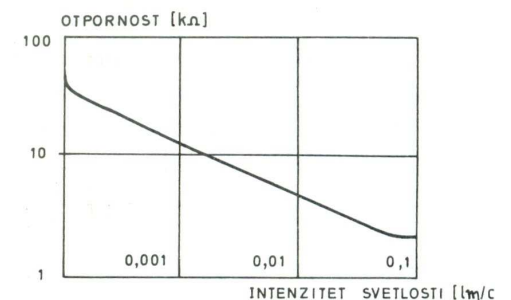
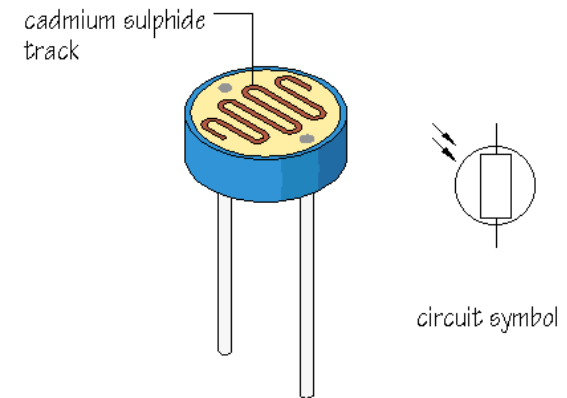
Visible Light Region  
of the Electromagnetic Spectrum



# FOTOOTPORNICI

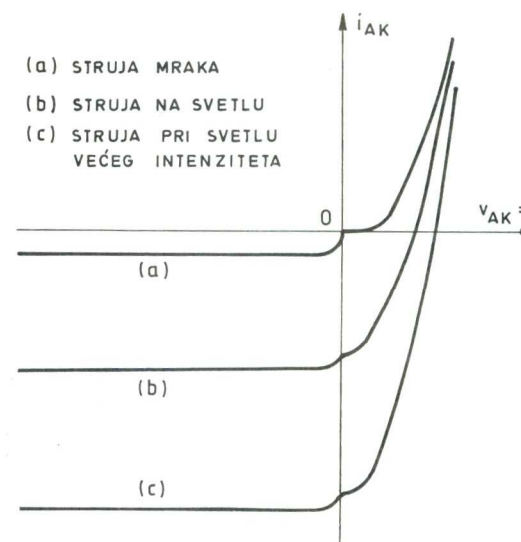
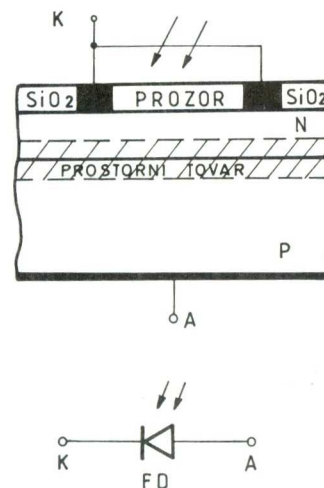
- APSORPCIJOM SVETLOSTI SE POVEĆAVA KONCENTRACIJA SLOBODNIH NOSILACA U POLUPROVODNIKU I MENJA ELEKTRIČNA PROVODNOST

OTPORNOST ZAVISI I OD TEMPERATURE JER NJEN PORAST PODŽE SOPSTVENU KONCENTRACIJU SLOBODNIH NOSILACA ŠTO TREBA UMANJITI DA BI SE POSTIGLA ZAVISNOST OTPORNOSTI SAMO OD SVETLOSTI



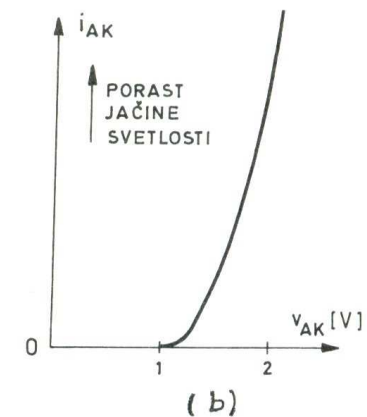
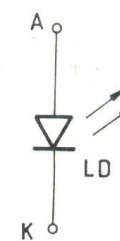
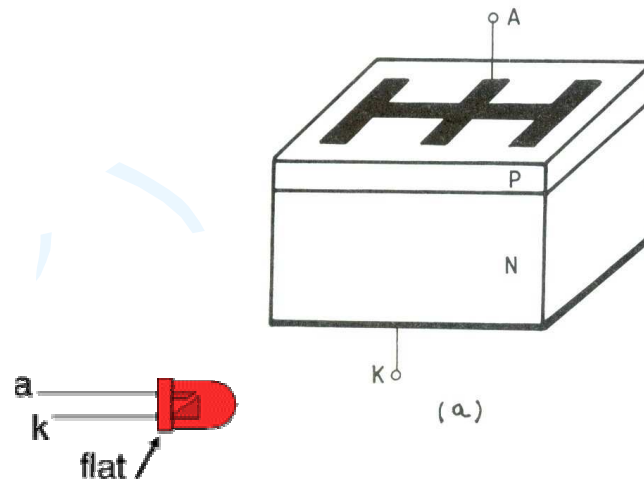
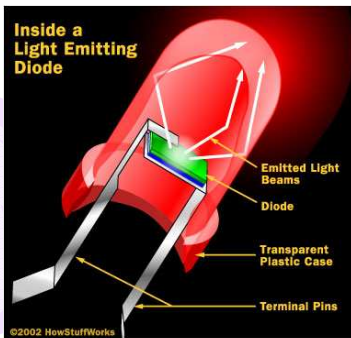
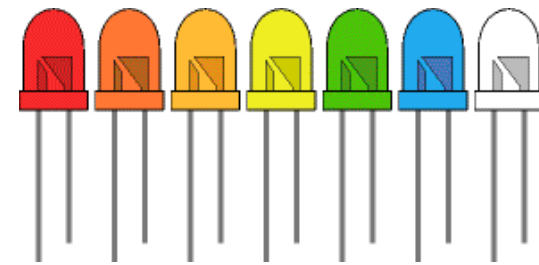
# FOTODIODE

- FOTONI KADA DOSPEJU U OBLAST PROSTORNOG TOVARA STVARAJU SLOBODNE NOSIOCE POD DEJSTVOM JAKOG POLJA: ŠUPLJINE IDU KA ANODI A ELEKTRONI KA KATODI
- STRUJA KOJA SE GENERIŠE JE MALA I NE DOLAZI DO IZRAŽAJA PRI DIREKTNOJ POLARIZACIJI
- FOTODIODE SE OBIČNO KONSTRUIŠU KAO PIN FOTODIODE (I – INTRINSIC)
- LAVINSKE FOTODIODE



# FOTOEMITUJUĆE DIODE

- KONSTRUISANE KAO PN SPOJ
- EMITUJU FOTONE KADA SE U DIODI IZVRŠI REKOMBINACIJA ELEKTRON ŠUPLJINA (SLOBODAN ELEKTRON PREĐE IZ PROVODNE U VALENTNU ZONU I EMITUJE SE ZRAČENJE)



# FOTOEMITUJUĆE DIODE (LED)

- TALASNA DUŽINA SVETLOSTI ZAVISI OD VELIČINE ENERGETSKOG PROCEPA  $W = h \frac{c}{\lambda}$   
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
- SVETLOSNE DIODE KOJE EMITUJU VIDLJIVU SVETLOST SE PRAVE OD MATERIJALA SA  $E_g$  1.7eV-3.5eV (NAJČEŠĆI MATERIJALI GaP-ZELENA BOJA, GaAsP-CRVENA BOJA, INFRACRVENI DEO SPEKTRA GaAs)
- ZBOG VEĆEG ENERGETSKOG PROCEPA U ODNOSU NA Si LED IMAJU NEŠTO VEĆI PAD NAPONA KOD DIREKTNE POLARIZACIJE (1.5V-2V)

