

VPRAŠANJA IN ODGOVORI NA SMOLETOVA VPRAŠANJA:

1.skop:

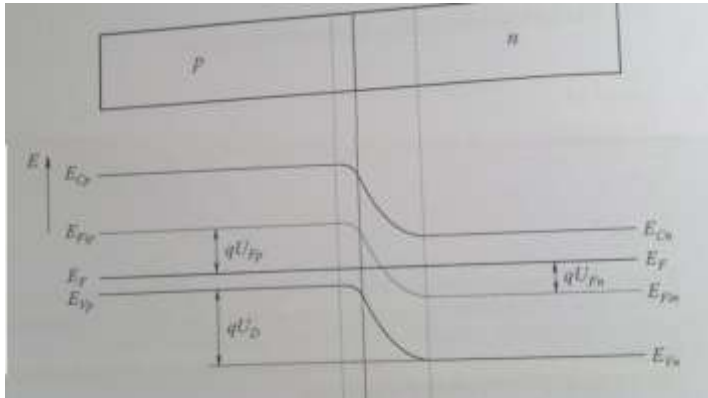
(Evini) odgovori na vprašanja:

1. pn spoj v termičnem ravnovesju (energijski nivoji, difuzijska napetost)

→ Potencialna razlika ali difuzijska napetost  $U_D$ , je napetost, ki se izpostavi in vzdržuje prek osiromašenega območja (ko ni priključene nobene zunanje napetosti), in preprečuje

difuzijo.  $U_D = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$

→



2. Stikalni časi bipolarnega tranzistorja

→ Hitre spremembe krmilnih signalov  
→ pojavljajo se zakasnitve, pri transportu nabojev med krmilnimi in izhodnimi signali

→ Nazivi zakasnitvenih časov:

→  $t_d$  ... čas zakasnitve vzpona

→  $t_r$  ... čas vzpona

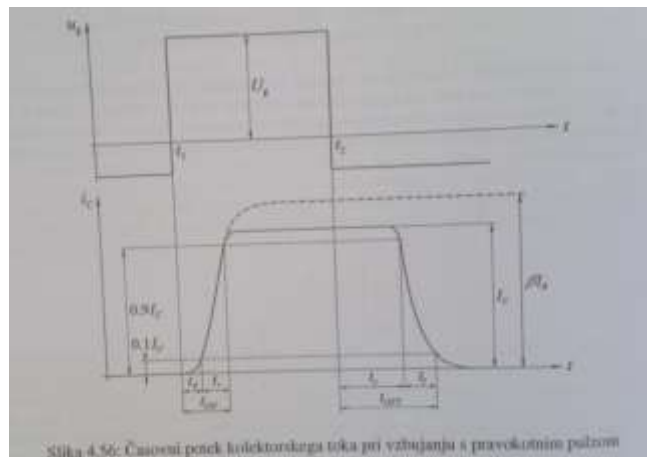
→  $t_s$  ... čas zaradi nakopičenega naboja

→  $t_f$  ... čas upadanja

→  $t_{ON} = t_d + t_r$  ... čas vklopa

→  $t_{OFF} = t_s + t_f$  ... čas izklopa

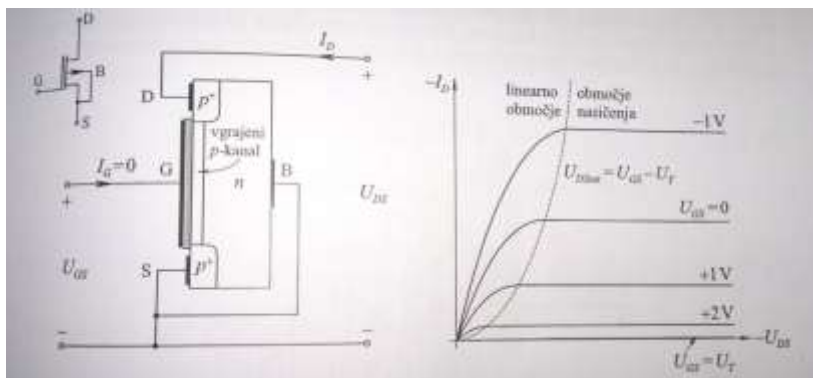
→  $t_{dp} = \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{2}$  ... zakasnitev širjenja ali zakasnitev pulza



Slika 4.56: Časovni potek kolektorskega toka pri vzbujanju s pravokotnim pulzom

3. Prerez MOS Tranzistorja z vgrajenim p-kanalom.(Izhodna karakteristika)

→



4. pnpn dioda

→ Shockleyeva dioda

dioda

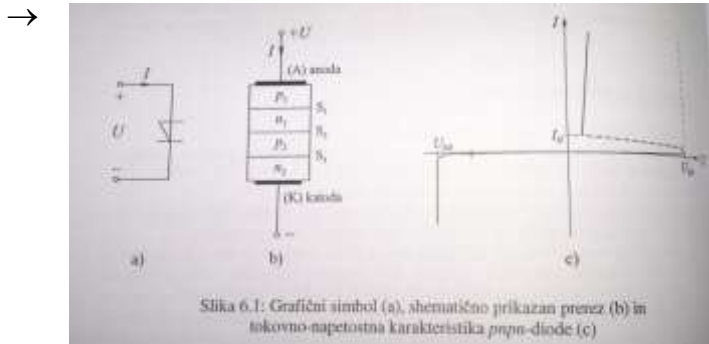
→ Dvopolni

nelinearni element s štirimi polprevodniškimi plastmi (3je pn-spoji, dva zunanja priključka)

anoda in katoda)

→ Prevajanje v eni smeri

→ Zunanja priključitev: anoda na pozitivni polariteti proti katodi.  $S_1$  in  $S_3$  na njiju je prevodna, na  $S_2$  pa zaporna napetost.



Slika 6.1: Grafični simbol (a), shematsko prikazan prerez (b) in tokovno-napetostna karakteristika pnpn-diode (c)

2. skop:

(Evini) odgovori na vprašanja:

**1. Spojna kapacitivnost diode**

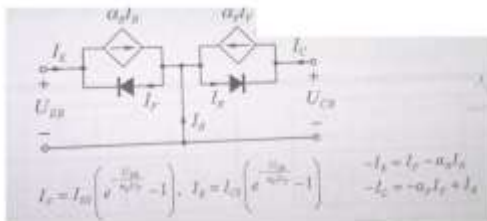
→ Pri povečanju zaporne napetosti za  $\Delta U_R$  se poveča naboj na vsaki strani prehodnega območja za  $\Delta Q$

→ Sprememba naboja zaradi spremembe napetosti pa je kapacitivnost:  $C_T = \frac{\Delta U_R}{\Delta Q}$

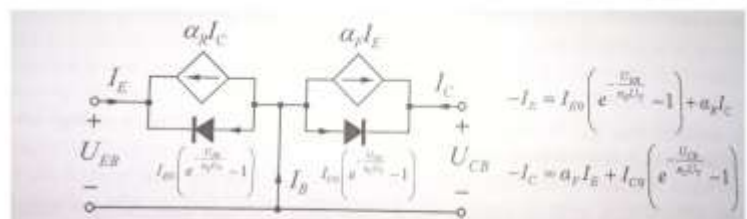
$$\rightarrow C_T = \varepsilon \frac{A}{D} = A \sqrt{\frac{q\varepsilon N_A N_D}{2(N_A + N_D)(U_D + U_R)}} = A \sqrt{\frac{q\varepsilon N_A N_D}{2(N_A + N_D)U_D}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{U_R}{U_D}}} = \frac{C_{T0}}{\sqrt{1 + \frac{U_R}{U_D}}}$$

**2. Ebers Mollov model bipolarnega tranzistorja**

→ Obravnava vezja, ki vsebuje tranzistorje je prikladnejša, če na mestu tranzistorja uporabimo ustrezen model. Za statično analizo in časovno analizo za počasne spremembe signalov se uporabljajo nelinearni Ebers-Molovi modeli, ki izhajajo neposredno iz fizikalnih enačb za emitorski in kolektorski tok.



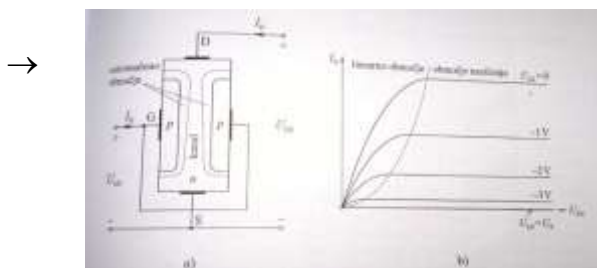
Slika 5.1: I. Ebers-Mollov model tranzistorja.



Slika 5.3: II. Ebers-Mollov model tranzistorja.

**3. Spojni FET z n-kanalom**

→ bistvo delovanja: z zunanjo napetostjo  $U_{GS}$  na vratih spreminjamo velikost zaporne napetosti na obeh pn- spojih



Enačbe:

Tok  $I_D$  v nasičenju:  $I_D = I_{DS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$

Napetost, pri kateri se kanal zadrzne  $U_P$ :

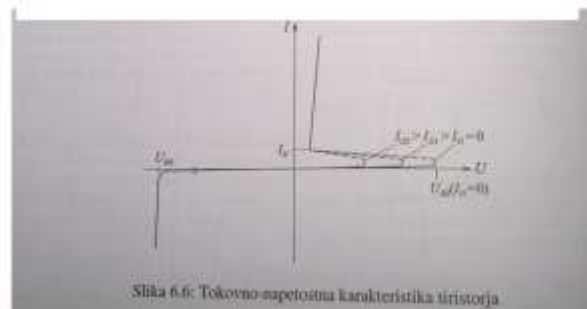
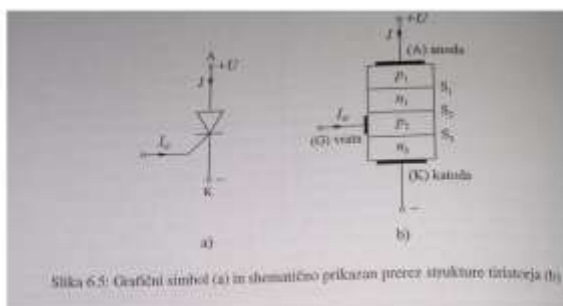
$$U_P = U_D - \frac{qN_D D^2}{8\varepsilon}$$

Napetost nasičenja:  $U_{DSSat} = U_{GS} - U_P$

→ Dovolj visoka zaporna krmilna napetost (pn-spoja se dotakneta skupaj) → toka ni več → neskončna upornost (vodoravna premica v diagramu) → pravimo: pri dovolj veliki zaporni krmilni napetosti ( $U_{GS} = U_P$ ) se kanal zadrzne ali preščipne → toka ne teče več

#### 4. Tiristor

- Je tripolni polprevodniški element s sponkami anoda (A), katoda (K), in krmilna elektroda (G)-vrata
- če je napetost med anodo in katodo višja od vžigalne napetosti  $U_{B0}(I_g = 0)$  preide tiristor v območje prevajanja
- torej: tiristor je element, ki ga lahko iz stanja zapore v stanje prevajanja preklopi signal krmilne elektrode



3. sklop:

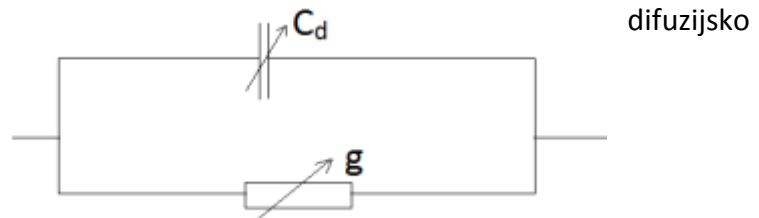
(Evini) odgovori na vprašanja:

#### 1. Difuzijska kapacitivnost pn-spoja (diode)

- Pri enosmerni prevodni napetosti na diodi, so nosilci emitirani prek osiromašenega območja, nato pa difundirajo proč od np-spoja in izginjajo z rekombinacijami.
- V okolici delovne točke, pri prevodni napetosti, čutijo majhni nizkofrekvenčni signali diferencialno upornost in kapacitivnost.

$$\rightarrow C_d(N_A \gg N_D) = \frac{g\tau_p}{2}$$

$$\rightarrow C_d(N_D \gg N_A) = \frac{g\tau_n}{2}$$



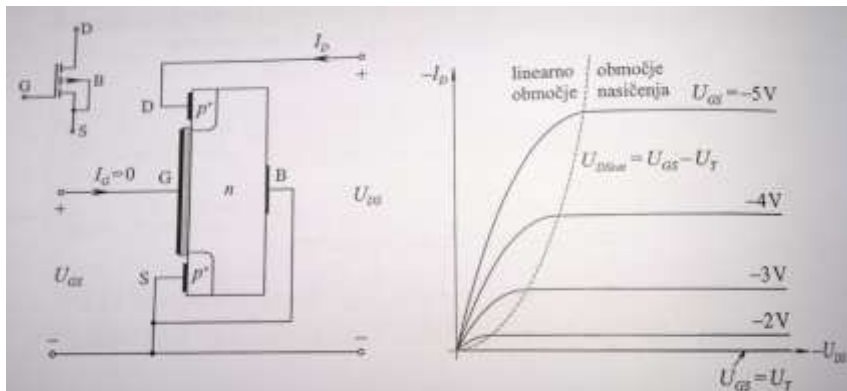
#### 2. Prebojne napetosti bipolarnega tranzistorja

→ Prebojne napetosti tranzistorja so tiste napetosti na sponkah tranzistorja, pri katerih bi toki skozi tranzistor, če bi ne bi bili omejeni z zunanji elementi vezja, narasli prek mej, ki jih še dopušča maksimalna dopustna moč segrevanja tranzistorja.

- En možni preboj tranzistorja se pojavi, če postane zaporna napetost na kolektorskem spoju tako velika, da se prehodno območje tega spoja razširi prek cele baze in se stakne s prehodnim območjem emitorskega spoja.
- Pojav plazovne ionizacije: Pri večini tranzistorjev so maksimalne dopustne napetosti na pn-spojih omejene s pojavom plazovne ionizacije v kolektorskem spoju tranzistorja. Kolektorski tok tranzistorja v orientaciji s skupno bazo strmo narašča, ko se kolektorska napetost približa  $U_{CB0}$ , ki se imenuje prebojna napetost kolektorsko-baznega pn-spoja.

### 3. MOS tranzistor z induciranim p-kanalom

→



→ Tranzistor z p-kanalom: za prevajanje med izvorom in ponorom je potrebna proga z pomičnimi vrzelmi

→ Enačbe: Tok v območju pod nasičenjem:

$$I_D = \frac{C_0 W \mu_p}{L} \left[ (U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right]$$

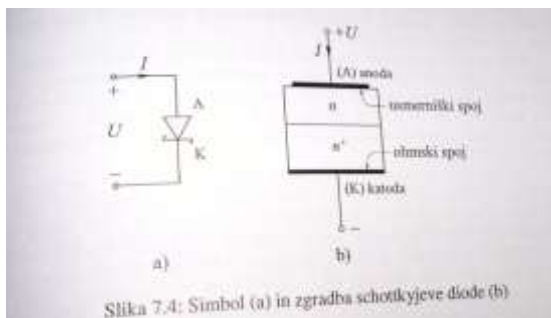
Območje nasičenja

$$I_{DS} = \frac{C_0 W \mu_p}{2L} U_T^2 \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_T} \right)^2$$

### 4. Kovina-polprevodnik (Shottky dioda)

→ Je usmerniški spoj kovine s polprevodnikom

→ Tvorita jo spoj med kovino in polprevodnikom tipa n, saj sta materiala na različnih energijskih nivojih. Zaradi potovanja elektronov, se med njima se ustvari potencialni prag. Najpomembnejša lastnost te diode je velika hitrost delovanja.

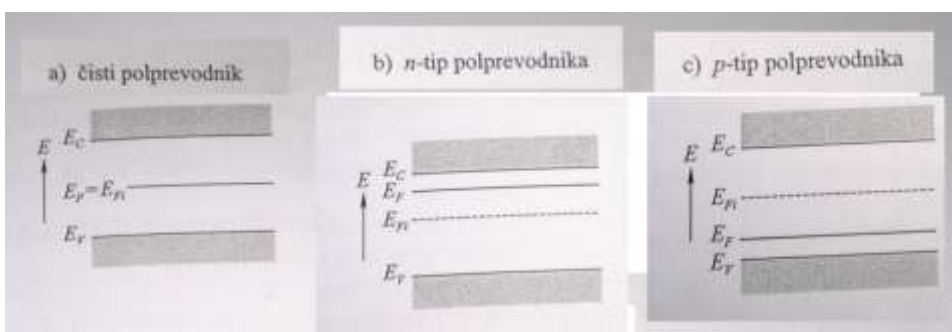


Slika 7.4: Simbol (a) in zgradba schottkyjeve diode (b)

4. sklop:

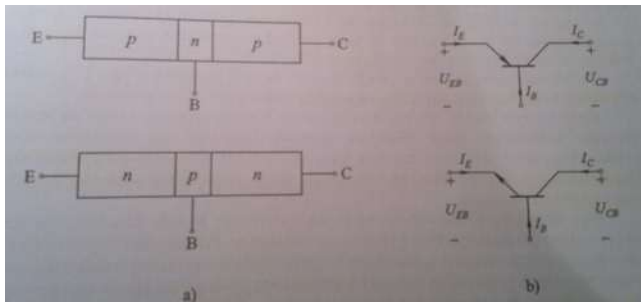
(Evini) odgovori na vprašanja:

#### 1. Energijski nivoji: Silicij (čist), dopiran (p in n)



2. Glej 2. sklop, 1 vprašanje.

**3. Prerez bipolarnega tranzistorja (tokovi, dogajanje, priključki)**



→ Bipolarni tranzistor: električni tok teče prek pn- spojev zaradi gibanja elektronov IN vrzeli

→ 3 zunanje sponke: emitor (E), baza (B), kolektor (C)

→ 2 pn-spoja: med emitorjem in bazo – emitorski spoj, med kolektorjem-bazo –

kolektorski spoj

→ Največkrat: emitorski spoj – prevodna napetost

$U_{EB}$ , kolektorski – zaporna napetost  $U_{CB}$

→ Emitor oddaja nosilce naboja v bazo

→ Kljub zaporni napetosti teče kolektorski tok, saj kolektor zbira nosilce, ki jih oddaja v emitor

4. Glej 3 sklop, 4 vprašanje

5. Glej 1 sklop, 1 vprašanje

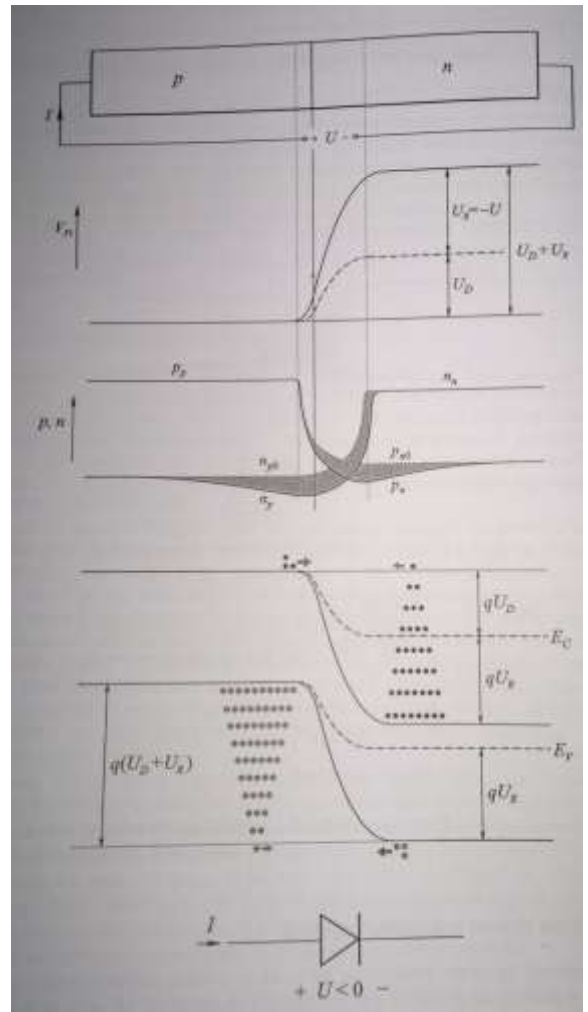
5.sklop:

(Evini) odgovori na vprašanja:

**1. energijski nivoji in koncentracije pri zaporni napetosti diode**

→ Če je napetost na diodo priključena tako, da je p-tip priključen na negativni pol in n-tip na pozitivni pol zunanjega vira napetosti ( $U < 0$ ), se napetost na osiromašeni plasti poveča

→ Zaporna napetost  $U_R = -U$  na pn-spoju povečuje višino potencialne oz. energijske bariere. (vrednost E narašča)

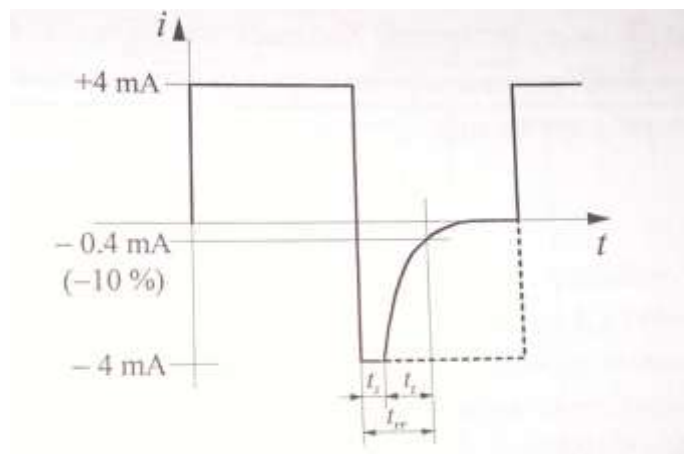


**2. Preklopni časi diode**

→ Dioda ni neskončno hiter element. Hitrost delovanja pri preklonih signala omejujejo končne gibljivosti nakopičenih nosilcev naboja (elektronov

in vrzeli) in potrebni časi za rekombinacije v danem polprevodniku.

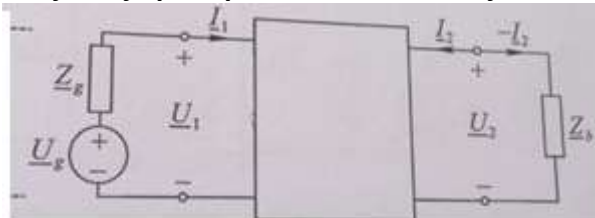
Pri hitrih preklonih signala, zlasti pri prehodih iz prevodne v zaporno polarizacijo, tako nastanejo določene zakasnitve. Te zakasnitve je potrebno upoštevati pri načrtovanju hitrejših diodnih vezij.



→ Preklopni časi:

- $t_s$  .... čas kopičenja naboja
- $t_t$  .... Prehodni čas
- $t_{rr}$ ... skupni zakasnilni čas

### 3. Ojačenja pri bipolarnem tranzistorju za majhne signale

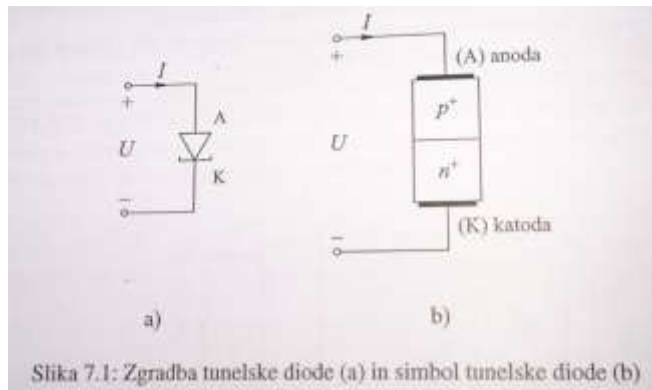


- Napetostno ojačenje:  $A_u = \frac{U_2}{U_1}$
- Tokovno ojačenje:  $A_i = -\frac{I_2}{I_1}$
- Ojačenje moči:  $A_p = -\frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = A_u A_i$
- Admitance so realne

4. Glej 1. sklop 3 vprašanje, in 3. sklop 3. vprašanje.

### 5. tunelska dioda

- zelo visoki koncentraciji primesi v  $p^+n^+$  spoju
- pri tunelski diodi je pomemben tisti del diodnega toka, ki nastane zaradi tuneliranja elektronov skozi tanko osiromašeno območje  $p^+n^+$  spoja
- ker sta koncentraciji tako zelo veliki, je v n plasti Fermijev nivo nad prevodnim pasom, v p plasti pa pod valenčnih pasom
- nivoji pod Fermijevem nivojem so zasedeni, nad na nezasedeni → tuniranje skozi tanko osiromašeno plast ni možno
- tokovno-napetostna karakteristika ima obliko črke N



Slika 7.1: Zgradba tunelske diode (a) in simbol tunelske diode (b)

6. Sklop:

(Evini) odgovori na vprašanja:

### 1. Linearizacija četveropola (prevodnostni parametri, nap. ojačenje)

- Pri nelinearnem četveropolu pa je funkcija treh spremenljivk, ki predstavlja ukrivljeno ploskev v prostoru, v okolici mirovne delovne točke D nadomeščena z odsekom tangencialne ravnine, ki je v karakteristiki četveropola opisana z družino vzporednih in enako razmaknjenih odsekov premic

→  $i_1 = i_1(u_1, u_2)$  in  $i_2 = i_2(u_1, u_2)$

- Napetosti  $u_1$  in  $u_2$  sta sestavljeni iz enosmerne komponente ( $U_1$  oz.  $U_2$ ), določene z mirovno delovno točko  $D(U_1, U_2, I_1, I_2)$  ter iz majhne spremembe ( $\Delta U_1$  oz.  $\Delta U_2$ )

→  $u_1 = U_1 + \Delta U_1$  in  $u_2 = U_2 + \Delta U_2$

- Ko razvijemo v Taylorjevo vrsto dobimo za  $i_1 = i_1(u_1, u_2) = I_1 + \Delta I_1$  kar da za spremembo  $\Delta I_1$  :  $\Delta I_1 = \left. \frac{\partial i_1}{\partial u_1} \right|_D \Delta U_1 + \left. \frac{\partial i_1}{\partial u_2} \right|_D \Delta U_2$  in za  $\Delta I_2 = \left. \frac{\partial i_2}{\partial u_1} \right|_D \Delta U_1 + \left. \frac{\partial i_2}{\partial u_2} \right|_D \Delta U_2$

$$\begin{array}{cccc}
 \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\
 g_{11} & g_{12} & g_{21} & g_{22}
 \end{array}$$

- $g_{ij}$ ... diferencialni prevodnosti četveropolni parametri
- Pri visokih frekvencah:  $I_1 = y_{11} U_1 + y_{12} U_2$  in  $I_2 = y_{21} U_1 + y_{22} U_2$
- Diferencialni admitančni četveropolni parametri pri nizkih frekvencah realni  $y_{ij} = g_{ij}$ , pri visokih pa kompleksnih  $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$
- Diferencialni četveropolni parametri so odvisni od izbran mirovne delovne točke nelinearnega elementa in od frekvence signala.

## 2. temperaturna odvisnost pn diode

- Pn-spoj oddaja toploto svojemu ohišju, ta na naprej v okolico
- Termična upornost  $R_{thja} [^{\circ}CW^{-1}]$ :  $R_{thja} = R_{thjc}(\text{ohišje}) + R_{thca}(\text{okolica})$
- $P_{maks} = \frac{T_{jmaks} - T_a}{R_{thja}}$
- Iz izpeljanih enačb vidimo, da velja med  $P_{max}$  in  $P_a$  linearna zveza, in sicer, čim višja je temperatura okolice, tem nižja je maksimalna dopustna moč obremenitve diode. Z izpeljanimi enačbami lahko izračunamo tudi v obratni smeri, za dano moč lahko določimo potrebno površino hladilnega telesa.

## 3. visokofrekvenčne lastnosti MOS tranzistorja

- Frekvenčne zmogljivosti omejujejo parazitne kapacitivnosti, ki jih povzročajo kapacitivnosti krmilne elektrode z kanalom  $C_{gs}$ , kapacitivnosti zaradi prekrivanja krmilne elektrode s plastjo izvora in ponora  $C_{gd}$  ter spojne kapacitivnost pn-spojev  $C_{ds}$