

Tampereen teknillinen yliopisto
ELE-5050 Elektroniset piirialkiot

Nimi: _____

Opiskelijanumero: _____

Teht.	1 /5p	2 /7p	3 /6p	4 /6p	5 /6p	yht. max. 30p

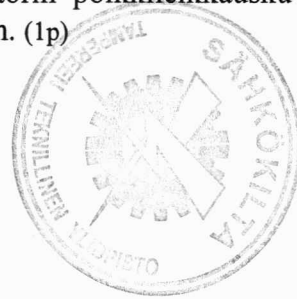
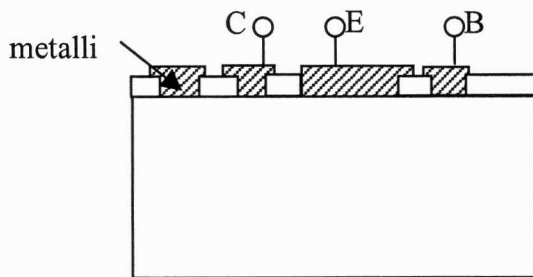
Tentissä ei saa käyttää kirjallista oheismateriaalia. Kaikki tarvittava materiaali löytyy tehtäväpapeista. Laskimen käyttö sallittua.

Vastaa tehtäviin 2a) ja b) tähän tehtäväpaperiin. Muut vastaukset konseptille.

1. a) Piitä seostetaan huoneenlämmössä ($T = 300\text{K}$). Seostuksen määrä on $N_d = 10^{13}\text{ cm}^{-3}$. Mitkä varauksenkuljettajat toimivat seostetussa puolijohteessa enemmistövarauksenkuljettajina? Laske seostetussa puolijohteessa olevien enemmistö- että vähemmistövarauksenkuljettajien määrät. Piirrä energiatasodiagrammi, missä näkyy energia-aukko, intrinsiikkinen Fermi-taso, Fermi-taso ja johtavuus- ja valenssivyöt. Piirrä kuvaaja arvioiden, tarkkoja arvoja ei tarvitse määrittää. (3p)

b) Edellisen kohdan seostettu pii ($N_d = 10^{13}\text{ cm}^{-3}$) viedään kammioon, jossa lämpötila on $T = 650\text{K}$. Pii intrinsiikkinen varauksenkuljettajitiheys on $6 \cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, kun $T = 650\text{K}$. Laske seostetussa puolijohteessa olevien varauksenkuljettajien määrät tässä lämpötilassa ($T = 650\text{K}$). (2p)

2. a) Piirrä alla olevaan kuvaan NPN bipolaaritransistorin poikkileikkauskuva. Piirrä kanta-, kollektori- ja emitterialueet puolijohdesubstraattiin. (1p)



b) Haluat valmistaa kuvassa esitetyn piipohjaisen NPN -BJT:n. Suunnittele transistoriasi mahdollisimman hyvä. Käytettävänäsi on seuraavat seostukset:

$$N_d = 10^{16}\text{ cm}^{-3}, 10^{18}\text{ cm}^{-3}, 10^{20}\text{ cm}^{-3} \quad N_a = 10^{16}\text{ cm}^{-3}, 10^{18}\text{ cm}^{-3}, 10^{20}\text{ cm}^{-3}$$

Tiedetään, että vähemmistövarauksenkuljettajien diffuusiopituus L kannalla on $4\mu\text{m}$. Alueiden kanta-, kollektori- ja emitterialueiden leveydet voivat olla $1\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ tai $20\mu\text{m}$.

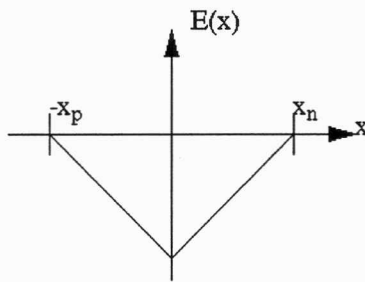
	Kanta	Emitteri	Kollektori
Seostus [cm^{-3}]			
Alueen leveys [μm]			

Täytä yllä olevaan taulukkoon kuvassa esitetyn NPN-transistorin tiedot. (2p)

c) Esiintyykö punch through -ilmiö suunnittelemassasi piistä valmistetussa BJT:ssä, kun BJT:n molemmat liitokset on estobiasoitu 5V:n jännitteellä? Käytä laskuissa b) kohdassa valitsemasi arvoja ja oletta liitoksen sisäinen potentiaali hyvin pieneksi. (2p)

d) Kerro miten virrankuljetus tapahtuu NPN -bipolaaritransistorissa aktiivisella alueella (normaalissa toimintatilassa, kun pätee $I_c = \beta I_b$). (2p)

3. Alla oleva kuvaaja esittää piistä valmistetun pn-liitoksen sähkökenttää. P- ja n-puolien tyhjennysalueiden leveydet ovat $|x_p| = |x_n|$. Lisäksi tiedetään, että p-puolen seostus on 10^{16} cm^{-3} .



a) Laske liitoksen built-in potentiaali. (2p)

b) Miten liitokseen syntyy built-in field (sähkökenttä)? (2p)

c) Kerro miten virta kulkee biasoimattomassa pn-liitoksessa. (2p)

4. a) Laske tyhjennysalueettoman n-kanavaisen JFET:n virta, kun JFET:stä tiedetään seuraavat ominaisuudet: kanavan pituus, leveys ja korkeus ovat $20\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ ja $1\mu\text{m}$, n-tyypin seostus on 10^{16} cm^{-3} , p-tyypin seostus on 10^{19} cm^{-3} , liikkuvuudet elektroneille ja aukoille ovat $1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ja $800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. JFET on valmistettu piille. Kanavan yli on pinch-off jännite $V_p = 7.6\text{V}$.

Piirrä kuva JFET:n kanavasta ja kanavan tyhjennysalueista, kun $V_{DS} = 9\text{V} > V_p = 7.6\text{V}$ ja $V_G = 0\text{V}$. Missä toimintatilassa JFET on? (3p)

b) Miten avaustyyppiseen n-kanavaiseen MOSFET:iin syntyy kanava? Missä pintapotentiaalın määräämässä tilassa MOS-rakenne on, kun kanava muodostuu? (3p)

5. a) Metalli-puolijohdeliitos voi olla tasasuuntaava tai ohminen. Kerro miten liitosten toiminta ja rakenne eroavat. Piirrä kummankin liitoksen I/V -kuvaajat. (3p)

b) Valitse alla luetteluista komponenteista yksi (1) ja selitä sen toiminta, käyttötarkoitus, rakenne pääpiirteissään. (3p)

- IMPATT
- PIN-diodi
- LED

Huom. Useampaan kuin yhteen vastaaminen ei tuo lisää pisteitä.



Fysiikan vakioita ja yksiköitä

Avogadron vakio	N_A	$6,022 \times 10^{23} \text{ 1/ mol}$
Boltzmannin vakio	k	$1,380 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
alkeisvaraus elektronin lepomassa eli	q tai e	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
vapaan elektronin massa	m tai m_e	$9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5,486 \times 10^{-4} \text{ u}$
tyhjiön permittivisyys	ϵ_0	$8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
tyhjiön permeabiliteetti	μ_0	$1,257 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$
Planckin vakio	h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ Js} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eVs}$
terminen jännite 300K:ssä	Φ_T	0,0259V
valon nopeus tyhjiössä	c_0	$2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$
elektronivoltti	eV	$1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
ångström	Å	$10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$



Ge, Si ja GaAs:n ominaisuudet 300K:ssä

Ominaisuus	Ge	Si	GaAs	SiO ₂
atomia tai molekyyliä /cm ³	$4,42 \times 10^{22}$	$5,0 \times 10^{22}$	$4,42 \times 10^{22}$	$2,3 \times 10^{22}$
tiheys, g/cm ³	5,32	2,33	5,32	2,27
läpilyöntikenttä, V/cm	$\sim 10^5$	$\sim 3 \times 10^5$	$\sim 4 \times 10^5$	$\sim 10^7$
dielektrinen vakio, ϵ_r	16	11,8	13,1	3,9
efektiivinen tilatiheys johtavuusvyö N_C , cm ⁻³ valenssivyö N_V , cm ⁻³	$1,04 \times 10^{19}$ $6,1 \times 10^{18}$	$2,8 \times 10^{19}$ $1,04 \times 10^{19}$	$4,7 \times 10^{17}$ $7,0 \times 10^{18}$	
elektroni affiniteetti X , V	4,0	4,05	4,07	0,9
energia-aukko, eV	0,68	1,12	1,43	9
intrinsiivinen varaus- konsentraatio n_i , cm ⁻³	$2,4 \times 10^{13}$	$1,5 \times 10^{10}$	$1,8 \times 10^6$	
efektiivinen massa: elektronit aukot	$m_e = 0,22m$ $m_e^* = 0,12m$ $m_h = 0,31m$ $m_h^* = 0,23m$	$m_e = 0,33m$ $m_e^* = 0,26m$ $m_h = 0,5m$ $m_h^* = 0,16m$	$m_e = 0,063m$ $m_h = 0,5m$	
intrinsiivinen liikkuvuus elektronit, cm ² /Vs aukot, cm ² /Vs	3900 1900	1500 450	8600 400	
lämpölaajenemisvakio, °C ⁻¹	$5,8 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-6}$	$6,8 \times 10^{-6}$	5×10^{-7}
Lämpöjohtavuus, W/cm°C	0.6	1,5	0,46	0.01

Merkinnöistä

Yang: K_s = Streetman/taulukko: ϵ_r

liitoksen sisäinen potentiaali: Yang: V_{bi} = Streetman: V_o

Lähteet: Yang: Microelectronic Devices, Streetman: Solid State Electron Devices ja MAOL-taulukot

1. Varauksenkuljettajien määrä tp. tilassa

$$np = n_i^2$$

2. Varauksenkuljettajien määrä Fermi-tason fkt.

$$n = N_c e^{-(E_c - E_f)/kT} = n_i e^{(E_f - E_i)/kT}$$

$$p = N_v e^{-(E_f - E_v)/kT} = n_i e^{(E_i - E_f)/kT}$$

3. Varauksenkuljettajien liikkuvuus ja diffuusiivuuks

$$v_n = -\mu_n E \quad v_p = \mu_p E$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad D_n = \frac{kT}{q} \mu_n$$

4. Puolijohteen johtavuus ja resistiivisyys

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

5. Virrantiheys puolijohteessa

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx}$$

6. Jatkuvuusyhtälöt

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_p}{\partial x} + (G_p - R_p)$$

7. Poissonin yhtälö

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} ((n - p) + (N_a - N_d))$$

8. Liitoksen sisäinen potentiaali

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

9. Tyhjennysalueen leveys

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) V_{bi}}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_b} (V_{bi} - V)}$$

10. Tyhjennysalueen piensignaalikapasitanssi

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} A$$

11. Vähemmistövarauksenkuljettajien tiheydet tyhjennysalueen reunoilla

$$n_p = n_{p0} e^{\frac{qV}{kT}} \quad p_n = p_{n0} e^{\frac{qV}{kT}}$$

12. Ideaalisen pn-diodin virtayhtälö

$$J = J_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad J_s = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}$$

13. Liitosdiodin diffuusiokapasitanssi

$$C_d = \frac{Aq^2 L_p p_{n0}}{kT} e^{\frac{qV}{kT}}$$

14. Bipolaaritransistorin virtavahvistus

$$\alpha = \gamma \beta_T \quad \beta = \frac{\alpha}{\alpha - 1}$$

15. Ebers-Moll suursignaalin malli

$$I_E = a_{11} (e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1) - a_{12} (e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1)$$

$$I_C = a_{21} (e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1) - a_{22} (e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1)$$

16. Bipolaaritransistorin piensignaalin mallin komponenttiarvot

$$r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} \quad r_0 = \frac{V_A}{I_C} \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad \omega_T = \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu}$$

17. Schottky-diodin virtayhtälö

$$J = J_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad J_s = A^* T^2 e^{\frac{-q\phi_{Bn}}{kT}}$$

18. Liitosfetin virtayhtälö

$$I_D = \frac{1}{L} \int_{W_1}^{W_2} 2q\mu_n N_D Z(a - W) \frac{qN_D W dW}{\epsilon_s}$$

$$= \frac{Z\mu_n q^2 N_D^2}{\epsilon_s L} \left[a(W_2^2 - W_1^2) - \frac{2}{3}(W_2^3 - W_1^3) \right]$$

$$= I_p \left[\frac{V_D}{V_p} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_D + V_G + V_{bi}}{V_p} \right)^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{V_G + V_{bi}}{V_p} \right)^3 \right]$$

,missä $I_p = \frac{Z\mu_n q^2 N_D^2 a^3}{\epsilon_s L}$ ja $V_p = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_s}$

19. MOSFET:n virtayhtälöt

$$I_D = \mu C_0 \left(\frac{W}{L} \right) \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_0 \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T)^2$$

20. MOSFET:n kynnyksjännite

$$V_T \approx V_{FB} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\phi_F)}}{C_0} + 2\phi_F$$

$$= \left(\phi_{ms} - \frac{Q}{C_0} \right) + \frac{\sqrt{4\epsilon_s q N_A \phi_F}}{C_0} + 2\phi_F$$

$$Q = Q_f + Q_m + Q_{ot}$$

Tampereen teknillinen yliopisto
ELE-5050 Elektroniset piirialkiot



Nimi: _____

Opiskelijanumero: _____

Tentissä ei saa käyttää kirjallista oheismateriaalia. Kaikki tarvittava materiaali löytyy tehtäväpapereista. Laskimen käyttö on sallittua.

Vastaa tehtävään 1 ja valitse tehtävistä 2-6 neljä tehtävää, joihin vastaat. (Mikäli vastaat kaikkiin tehtäviin, arvostellaan vain tehtävät 1-5.)

Tehtävä 1. Selitä lyhyesti seuraavat käsitteet. (10p)

- | | |
|-------------------------------|--|
| a) Intrinsiikkinen puolijohde | f) JFET:n saturaatioalue |
| b) Fermitaso | g) Metallin ja puolijohteen työfunktio |
| c) Built-in potentiaali | h) Degeneraatio |
| d) Emitterin siirtotehokkuus | i) Millerin kapasitanssi |
| e) Ohminen kontakti | j) Stimuloitu emissio |

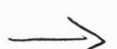
Valitse seuraavista tehtävistä neljä, ja vastaa niihin!

Tehtävä 2. Puolijohdemateriaalit (10p)

- Osoita, että massavaikutuksen laki pätee sekä intrinsiikkisille että ekstrinsiikkisille puolijohdeille.
- Piipala seostetaan $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ booriatomeilla. Laske elektronikonsentraatio, kun $T = 300 \text{ K}$. Määritä fermitason paikka, ja piirrä kuva energiavöistä, jossa on määritettyinä tasojen E_v , E_c , E_f ja E_i väliset etäisyydet elektronivolteina.
- Mitkä ovat kaksi varauksenkuljettajien syntytapaa?

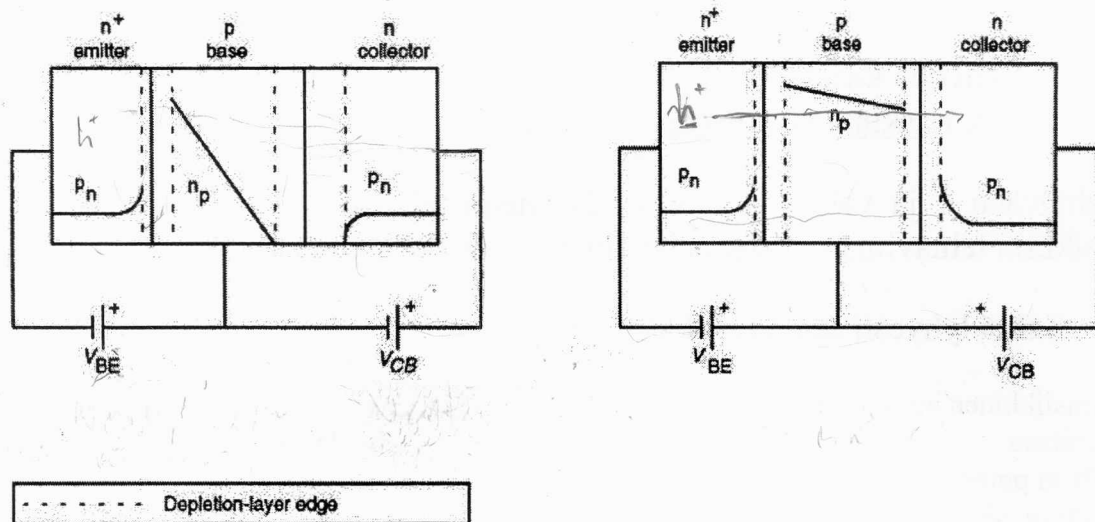
Tehtävä 3. PN-liitos (10p)

- Tarkastellaan jyrkkää p^+n diodia. Kerro lyhyesti perustellen muuttuvatko seuraavat tekijät diodissa ulkoisen jännitteen vaikutuksesta.
 - Vähemmistövarauksenkuljettajien määrä tyhjennysalueen reunoilla
 - Tyhjennysalueen varaus
 - P-tyypin puolijohteen varaustiheys (varauksenkonsentraatio)
 - Diodin saturaatiovirta
- Yksipuoleisen GaAs pn-diodin douppaukset ovat $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ja $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, lämpötila $T = 300 \text{ K}$. Määritä built-in potentiaali ja tyhjennysalueen leveys. Diodi on termisessä tasapainotilassa. Piirrä energiavyödiagrammi, ja määritä tätä varten myös fermitasojen paikat.



Tehtävä 4. BJT (10p)

- a) Oheisessa kuvassa on kuvat vähemmistövarauksenkuljettajatiheyksistä kahdessa tyypillisessä BJT:n toimintatilassa. Mitkä nämä toimintatilat ovat? Perustele vastauksesi. Kerro transistorin toiminta näissä tiloissa.



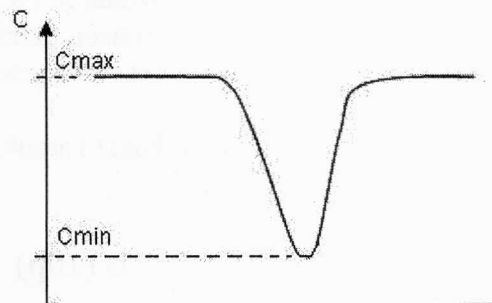
A

B

- b) Punch-through -ilmiö esiintyy pii-pohjaisella pnp-BJT:llä, kun $V_{BC} = 200\text{V}$ ja $V_{BE} = 0\text{V}$. Alueiden dopaukset ovat: $N_E = 10^{20}\text{ cm}^{-3}$, $N_B = 10^{17}\text{ cm}^{-3}$, $N_C = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$. Laske kannan leveys.

Tehtävä 5. MOSFET (10p)

- a) Piipohjaiselle p-tyypin substraatilla on MOS - rakenne. Oheisessa kuvassa on rakenteen C-V kuvaaja, jonka arvot ovat $C_{\text{max}} = 6.9 \times 10^{-10}\text{ F/cm}^2$ ja $C_{\text{min}} = 3 \times 10^{-10}\text{ F/cm}^2$. Laske hilaoksidin paksuus ja p-tyypin douppauskonsentraatio. Vahvan inversion raja on 0,66 V.



- b) i) Laske kynnysjännite p-tyypin piille rakennetulle ideaaliselle MOSFET:lle, jonka $N_A = 5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ja gaten oksidikerroksen paksuus on 100Å . $T = 300\text{ K}$.

ii) Edellisen kohdan MOSFET ei olekaan ideaalinen. Mitä täytyy huomioida nyt kynnysjännitettä laskettaessa? Oleta kuitenkin, että $V_{\text{Substraatti}} = 0\text{V}$. Laske kynnysjännite tämä seikka huomioiden, kun oksidin kokonaisvaraus $Q = 4 \times 10^{10}\text{ q C/cm}^2$. Gate on rakennettu n^+ -polypiistä.

Tehtävä 6. Eri diodit ja optiikka (10p)

- a) Valitse seuraavista yksi diodi, ja selitä sen toiminta:
 - i. IMPATT
 - ii. BARITT
 - iii. TED

- b) LED valmistetaan puolijohdemateriaalista, jonka suora energia-aukko on 2,5eV. Mitä aallonpituutta ko. LED emittoi? Voidaanko kyseisellä LEDillä ilmaista 0,9 μ m tai 0,1 μ m:n aallonpituuksia?

- c) Kerro laserin perusteet (toimintaperiaate, rakenne).

