S-69.2101 Puolijohdeteknologian perusteet **TENTTI** **5.6.2006**

1. Selitä lyhyesti seuraavat käsitteet (1p/kohta):
   a) FCC-hila
   b) N-tyypin puolijohde
   c) MOSFET:n kynnysjännite
   d) Puolijohteen työfunktio
   e) MBE-menetelmä
   f) Tunneloituminen

2. Kirjoita esseemuodossa ja käytä tarvittaessa myös kuvia
   a) Hall-ilmiö (Selitä ilmiö, kerro samalla mittausjärjestelyistä ja miksi Hall-mittausta käytetään yleisesti puolijohteille) (3p)
   b) Oksidointi (Kerro eri oksidointimenetelmien toimintaperiaatteet: oksidointi uunissa ja oksidointi CVD menetelmällä. Vertaile myös menetelmiä toisiinsa) (3p)

3. Wolframia on höyrystetty n-tyypin piin päälle. Wolframin työfunktio on 4.54 eV. Puolijohteen seostus on 10^{16} cm^{-3} (T=300K)
   a) Laske Schottky-vallin ja liitospotentiaalin suuruus (3 p)
   b) Piirrä energiavyödiagrammi, kun bias-jännite on 0,2 V. Merkitse kuvaan Fermi-energian, Schottky-vallin, liitospotentiaalin ja bias-jännitteen TARKAT paikat (3p)

4. a) Selosta mitä tapahtuu ja syntyy kun p-tyypin ja n-tyypin puolijohdepalat yhdistetään?
   b) Piirrä pn-liitoksen energiavyödiagrammi, varausjakauma ja sähkökenttä termodynaamisessa tasapainossa (T=300K) (3p)

5. Hahmottele Si-SiO_2 MOS-systeemin kapasitanssi jännitteen funktiona, kun oksidin paksuus x_{ox}=30 nm, substraatin seostus $N_a = 5 \cdot 10^{15}$ cm^{-3} ja pinta-ala $A = 10^{-8}$ m^2. Mikä on kapasitanssin maksimi- ja minimiarvo? (T=300 K). (6p)

Vakioita:	$q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C	$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K	$m_o = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg	$c = 2.998 \cdot 10^{8}$ m/s
	$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js	$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	$\varepsilon_o = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m	
Piille (T=300 K) :		$N_C = 2.8 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}	$N_V = 1.04 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}	$n_i = 1.45 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}
		$E_g = 1.12$ eV	$\varepsilon_r = 11.7$	$qX = 4.05$ eV
		$\mu_n = 1417$ $cm^2/(Vs)$	$\mu_p = 471$ $cm^2/(Vs)$	
Piidioksidille (T=300K):		$\varepsilon_r = 3.9$	$qX = 1$ eV	

Klassinen johde, kvanttimekaniikka ja aineenrakenne

$J = \sigma E$

$\sigma = \frac{q^2\tau}{m} n.$

$\rho = \frac{1}{\sigma}$

$|v_D| = \mu E$

$\mu = \frac{q\tau}{m}$

$v_D(t) = -\frac{qE\tau}{m}(1 - e^{-t/\tau})$

$\vec{F} = -q\vec{v} \times \vec{B}.$

$R_H = -\frac{1}{qn}.$

$U_H = \frac{1}{qn}\frac{IB}{W}$

$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2u}{dx^2} + V(x)u = \mathcal{E}u$

$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + V(x)\psi = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}$

$\Delta p \Delta x = 2\pi\hbar$

$2d \sin\theta = n\lambda$

$\vec{R} = n_1\vec{a_1} + n_2\vec{a_2} + n_3\vec{a_3},$

$l = v_{Th}\tau$,jossa $v_{Th} \sim \sqrt{k_B T/m^*}$

Metallin vapaaelektronimalli ja energiavyöt

$\mathcal{E}(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$

$k = (2m\mathcal{E}/\hbar^2)^{1/2}$

$g(\mathcal{E}) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{\mathcal{E}}\cdot$

$f(\mathcal{E}) = \frac{1}{1+e^{(\mathcal{E}-\mathcal{E}_F)/k_BT}}$

$f(\mathcal{E}) = e^{-\mathcal{E}/k_BT}$

$\mathrm{E}_F = \frac{\hbar^2}{2m}(3\pi^2 n)^{2/3}.$

$k_F = (3\pi^2 n)^{1/3}.$

$\lambda_F = \frac{2\pi}{k_F} = 2\left(\frac{\pi}{3n}\right)^{1/3}.$

$\mathrm{v}_F = \frac{\hbar k_F}{m}.$

$\psi(x) = e^{ikx}R(x).$

$\psi(\vec{r}) = \psi_{n\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}u_{n\vec{k}}(\vec{r}).$

$\hbar\frac{d\vec{k}}{dt} = -q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}).$

$\vec{v} = \frac{1}{\hbar}\nabla_{\vec{k}}\mathcal{E}(\vec{k}).$

$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{\hbar^2}\nabla_{\vec{k}}\nabla_{\vec{k}}\mathcal{E}(\vec{k}) \cdot (-q)[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}].$

$\left(\frac{1}{m^*}\right) = \frac{1}{\hbar^2}\nabla_{\vec{k}}\nabla_{\vec{k}}\mathcal{E}(\vec{k})$

$\vec{I} = |q| \sum_{i \in \text{ tyhjt}} \vec{v}(\vec{k}_i) = |q| \sum_{i \in \text{ aukot}} \vec{v}_a(\vec{k}_{a,i}).$

Puolijohdefysiikka

$g_c(\mathcal{E}) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_e^*}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{\mathcal{E}-\mathcal{E}_c},$

$g_v(\mathcal{E}) = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_h^*}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{\mathcal{E}_v-\mathcal{E}},$

$n = N_c e^{-(\mathcal{E}_c-\mathcal{E}_F)/k_BT},$

$N_c = 2\left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}.$

$p = N_v e^{-(\mathcal{E}_F-\mathcal{E}_v)/k_BT},$

$N_v = 2\left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}.$

$np = N_c N_v e^{-\mathcal{E}_g/k_BT} = n_i^2.$

$n = N_d - N_a, p = \frac{n_i^2}{N_d-N_a}.$

$\mathcal{E}_{Fi} = \frac{1}{2}(\mathcal{E}_c+\mathcal{E}_v) - \frac{3}{4}k_BT\ln(m_e^*/m_h^*)$

$f(\mathcal{E}_d) = \frac{1}{1+e^{(\mathcal{E}_d-\mathcal{E}_F)/k_BT}}.$

$f(\mathcal{E}_a) = \frac{1}{1+e^{(\mathcal{E}_a-\mathcal{E}_F)/k_BT}}.$

$N_d^+ = (1-f(\mathcal{E}_d))\,N_d = \frac{N_d}{1+e^{(\mathcal{E}_F-\mathcal{E}_d)/k_BT}}.$

$N_a^- = f(\mathcal{E}_a)N_a = \frac{N_a}{1+e^{(\mathcal{E}_a-\mathcal{E}_F)/k_BT}}.$

$n + N_a^- = p + N_d^+.$

$\mu_I = \frac{q\tau}{m^*} \sim \frac{T^{3/2}}{\sqrt{m^*}N_I}.$

$\mu_{\text{fon}} = \frac{q\tau}{m^*} \sim (m^*)^{-5/2}T^{-3/2}.$

$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_{\text{fon}}}.$

$\mathrm{n}=\mathrm{n}_0 + \Delta n, p = p_0 + \Delta p.$

$\Delta p = \Delta n = \tau_p G_{\text{opt}}.$

$D_n = \frac{k_BT}{q}\mu_n.$

$\mathrm{v}_n = \frac{D_n}{L_n}.$

$L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$

$J_n = q\mu_n n\vec{E} + qD_n\nabla n,$

$J_p = q\mu_p p\vec{E} - qD_p\nabla p.$

Metallipuolijohde- ja pn-liitos

$q\Phi_i = q(\Phi_M - \Phi_S).$

$q\Phi_B = q(\Phi_M - X)$

$E_m = \frac{q}{\varepsilon_s}N_d x_d.$

$E_m = 2\Phi_i/x_d$

$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_d}(\Phi_i - V_a)}.$

$C = \frac{\varepsilon_s A}{x_d} = A\sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_d}{2(\Phi_i - V_a)}}.$

$J = \frac{1}{4}qv_T N_c e^{-q\Phi_B/k_BT}\left(e^{qV_a/k_BT}-1\right).$

$q\Phi_i = k_BT\ln\frac{N_dN_a}{n_i^2}.$

$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_a}+\frac{1}{N_d}\right)(\Phi_i - V_a)}.$

$x_d = x_p + x_n.$

$N_a x_p = N_d x_n.$

$C(V_a) = \frac{dQ(V_a)}{dV_a} = \frac{A\varepsilon_s}{x_d(V_a)},$

$J_n = \mu_n n\frac{d\mathcal{E}_{Fn}}{dx},$

$J_p = \mu_p p\frac{d\mathcal{E}_{Fp}}{dx}.$

$L_p = \sqrt{D_p\tau_p}$

$J = qn_i^2\left(\frac{D_n}{N_aL_n}+\frac{D_p}{N_dL_p}\right)\left(e^{qV_a/k_BT}-1\right)$

$J = J_s\left(e^{qV_a/(nk_BT)}-1\right)$

Bipolaaritransistori

$$I_C = -qD_n \frac{dn}{dx} A = qD_n \frac{1}{x_B} \frac{n_i^2}{N_{aB}} \left(e^{qV_{BE}/k_BT} - e^{qV_{BC}/k_BT}\right) A$$

$$n(0) = \frac{n_i^2}{N_{aB}} e^{qV_{BE}/k_BT},$$

$$n(x_B) = \frac{n_i^2}{N_{aB}} e^{qV_{BC}/k_BT},$$

$$\alpha_T = \frac{I_n(x_B)}{I_n(0)}.$$

$$\alpha_T = 1 - \frac{I_r}{I_n(0)} = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{x_B}{L_n}\right)^2.$$

$$\gamma = \frac{1}{1+\frac{D_p}{D_n}\frac{x_B}{x_E}\frac{N_{aB}}{N_{dE}}}.$$

$$\alpha_F = \alpha_T \gamma$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F}.$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi}\frac{g_m}{(C_{JE}+C_{JC}+C_D)}$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\tau_B},$$

$$\tau_B = \frac{1}{2}\frac{x_B^2}{D_n}.$$

MOS-systeemit ja MOSFET

$$C'_{\mathrm{acc}} = C'_{\mathrm{ox}} = \frac{\varepsilon_{\mathrm{ox}}}{x_{\mathrm{ox}}}$$

$$C' = \frac{1}{\frac{1}{C'_{\mathrm{ox}}} + \frac{x_d}{\varepsilon_s}}.$$

$$n_s = \frac{n_i^2}{N_a} e^{q\Delta V/k_BT}.$$

$$q\Delta V = 2q\Phi_p = 2k_BT \ln \frac{N_a}{n_i}.$$

$$\Phi_0 = \Phi_S - \Phi_M.$$

$$V_{FB} = -\Phi_0$$

$$V_G = V_{FB} - (Q_n + Q_B)/C'_{\mathrm{ox}} + \Delta V$$

$$V_T = V_{FB} + \frac{1}{C'_{\mathrm{ox}}}\sqrt{4\varepsilon_s q N_a \Phi_p} + 2\Phi_p.$$

$$Q_n = -C'_{\mathrm{ox}}(V_G - V_T).$$

$$R = \frac{L}{\mu_n |Q_n| W}.$$

$$I_D = \frac{V_D}{R} = \frac{\mu_n W C'_{\mathrm{ox}}}{L}(V_G - V_T) V_D.$$

$$\mathrm{I}_D = \mu_n C'_{\mathrm{ox}} \frac{W}{L}\left(V_G - V_T - \frac{1}{2}V_D\right) V_D$$

$$I_{D\mathrm{sat}} = \frac{\mu_n W C'_{\mathrm{ox}}}{2L}(V_G - V_T)^2,$$

$$V_{D\mathrm{sat}} = V_G - V_T$$

Aurinkokenno

$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(1 + \frac{J_L}{J_s}\right)$

$J_L = q \int\limits_{\mathcal{E}_g}^{\infty} d\mathcal{E}\; \mathcal{F}_{ph}(\mathcal{E}) = q n_{ph}.$

$J_s = q(v_n N_d + v_p N_a) e^{-q\Phi_i / k_B T}.$

$V_m = V_{oc} - \frac{k_B T}{q} \ln\left(1 + \frac{q V_m}{k_B T}\right)$

$P_m = J_L (V_m - k_B T/q).$

$\mathrm{E}_m = q(V_m - k_B T/q).$