

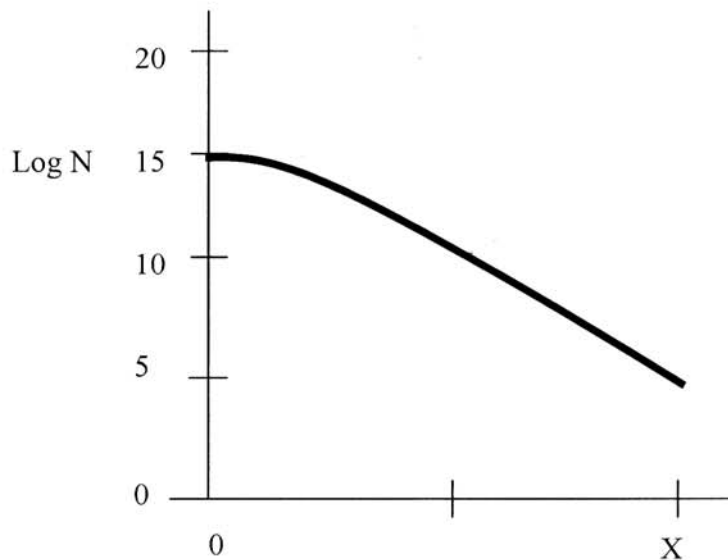
Vraagstuk 1: halfgeleiderfysica

Om de energiehuishouding van ladingdragers in (halfgeleider)materialen te beschrijven wordt het energiebandenschema gebruikt. Belangrijke energieparameters zijn E_V , E_C en E_F .

- a) Omschrijf elk van de bovengenoemde energieniveaus. Waar is E_F in het bandenschema gesitueerd voor intrinsiek silicium? Hoe zou je E_F willen definiëren en waarom moet bij een materiaal in evenwicht E_F een rechte lijn zijn (overal op het zelfde energieniveau liggen)?
- b) Met welke element kunnen we het silicium doteren opdat bij kamertemperatuur geldt:

$$E_C - E_F = 0,8 (E_C - E_V) ?$$

- c) Bereken de betreffende dotering met behulp van de gegevens op het blad met constanten en vergelijkingen en het gegeven: $E_C - E_V = 1,1 \text{ eV}$.
- d) In een blokje silicium (kamertemperatuur, $E_g = 1.1 \text{ eV}$ en $n_i^2 = 10^{20} \text{ cm}^{-6}$) is een doteringsprofiel van **Borium** atomen aangebracht volgens onderstaande figuur:



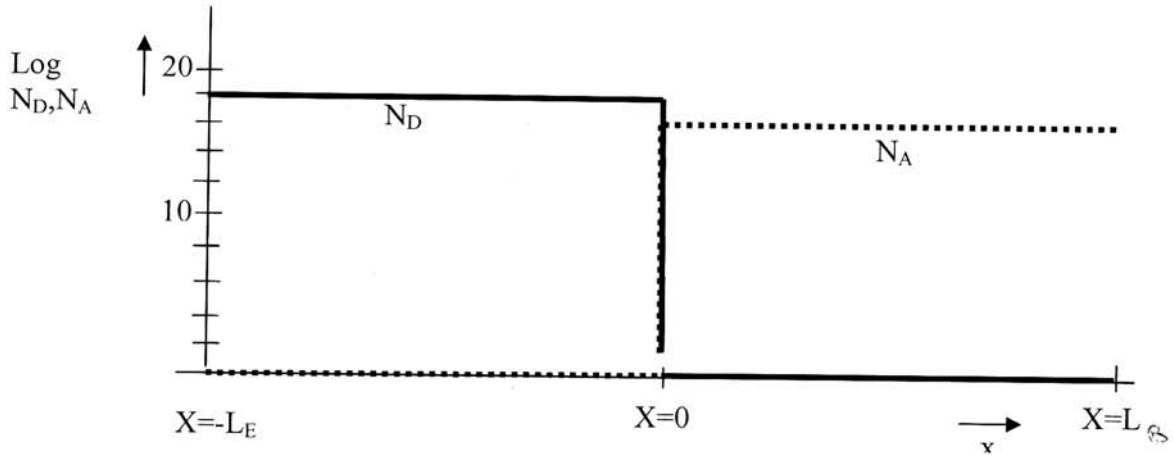
Schets in één figuur de elektronen- en gatenconcentratie als functie van x en verklaar de grafiek.

- e) Verklaar of in dit blokje diffusiekrachten en/of driftkrachten aanwezig zijn en hoe die op de ladingdragers werken. Verklaar dit aan de hand van grafieken van ruimteladingsdichtheid en elektrisch veld en interne potentiaal als functie van de plaats. Hoe groot is (ruwe berekening) het potentiaalverschil tussen $x=0$ en $x=X$?

Waardering: a) 20 b) 10 c) 20 d) 20 e) 30 punten

Vraagstuk 2: pn-overgang

- a) Gegeven is een lange diode ($L_E \gg L_n$ en $L_B \gg L_p$), met het volgende doperingsprofiel:



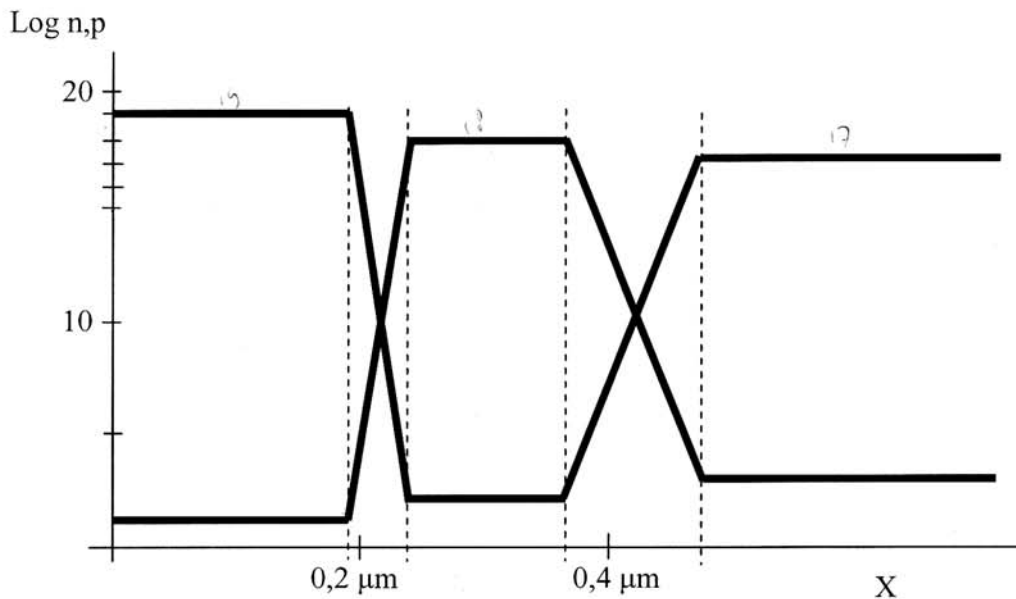
Teken zo nauwkeurig mogelijk de curves voor de elektronen- en gatenconcentraties, bij evenwicht en een voorwaartsspanning van 0,7 Volt. Verklaar ook de curves.

- b) Verklaar waarom de totale junctiestroom bij $V=0,7$ V kan worden berekend uit twee diffusiestromen aan de beide randen van de depletielaag. Bepaal de verhouding tussen de gaten- en elektronenstroomdichtheid. Bepaal de grootte van de elektronen- en gatenstroomdichtheid op $x=-L_E$ en op $x=L_B$ en verklaar je antwoord.
- c) Wanneer we willen streven naar een even grote elektronen- en gatenstroomdichtheid, welk gebied moeten we dan dunner maken, het p-gebied of het n-gebied? Geef aan wat de verhouding tussen de lengte van dat gebied en de diffusieweglengte ongeveer zou moeten zijn.
- d) Bereken de grootte van de depletie- en diffusiecapaciteit bij $V=0,7$ V. Welke opgeslagen ladingsdichtheid is het grootst, die van de elektronen of gaten?
- e) Leg kwalitatief uit wat gebeurt wanneer een voorwaartsspanning van 20 V op deze diode wordt aangelegd.

Waardering: a) 20 b) 20 c) 20 d) 20 e) 20 punten

Vraagstuk 3: bipolaire transistor

Van een npn type bipolaire transistor is het volgende elektronen en gaten concentratieprofiel gegeven (evenwicht, kamertemperatuur):



- Teken van deze transistor het bandenplaatje in evenwicht op dezelfde schaal.
- Teken het concentratieprofiel opnieuw, nu onder de conditie dat $V_{BE}=0,7 \text{ V}$ en $V_{BC}=0 \text{ V}$. Bereken de concentratie van minderheden op de randen van de depletiegebieden. Bereken ook de relatieve positie van de randen van de depletiegebieden in de basis, ten opzichte van de E-B en B-C juncties. Bereken de collectorstroomdichtheid .
- V_{BC} wordt nu -3 V . Bereken opnieuw de collectorstroomdichtheid en verklaar het eventuele verschil met het resultaat van b).
- Geef het klein-sigitaal, hoogfrequent vervangingsschema van een npn transistor (actieve mode) en verklaar de herkomst van de componenten.

Waardering: a) 10 b) 40 c) 20 d) 30 punten

Vraagstuk 4: MOS transistor

- a) Van een pMOS transistor worden, onafhankelijk van elkaar de parameters op de rijen van onderstaande matrix veranderd zoals aangegeven. Geef aan hoe (en òf) de device eigenschappen, aangegeven in de kolommen, daardoor zullen veranderen en verklaar alle antwoorden.

	V_{T0}	V_T	γ (bulk factor)	C_{GS} (gegeven bias, lineaire gebied)	g_m (gegeven bias)
t_{ox} groter					
$N_{A, bulk}$ kleiner					
L kleiner					
Temperatuur hoger					

Alle symbolen hebben hun gebruikelijke betekenis.

- b) Wat wordt bedoeld met de 'sub-threshold slope' van een MOS transistor? Waarom is het van belang om deze sub-threshold slope zo groot mogelijk te hebben? (Denk hierbij aan schakelingen met zeer veel transistoren.)

Waardering: a) 80

b) 20 punten

Tentamen Halfgeleiderdevices (121706)

Datum: 26 januari 2005

Tijd: 9.00-12.30 uur voor volledig tentamen*)

Dit tentamen omvat 4 onderdelen:

Halfgeleiderfysica	vraagstuk 1
Pn-overgang	vraagstuk 2
Bipolaire transistor	vraagstuk 3
MOS transistor	vraagstuk 4

Voor vraagstuk 2 wordt een vrijstelling gegeven indien voor de pn toets (WASP) een voldoende gehaald is in het studiejaar 2004/2005. Het eindcijfer wordt uitsluitend bepaald uit de score op dit schriftelijk tentamen.

U wordt verzocht op uw tentamenformulier en tentamenbriefje de vakcode 121706, Halfgeleider Devices aan te geven.

*) Beschikbare tijd voor het tentamen:

Indien 3 vraagstukken worden gedaan:	3 uur	tot	11.30 uur
Indien 4 vraagstukken worden gedaan:	3,5 uur	tot	12.00 uur

Bijgeleverd: formule- en constantenblad.

Succes met het tentamen!

Constants and equation sheet Semiconductor Devices en Semiconductor Physics

(Versie 15-08-2003)

Electron charge:	$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Thermal voltage equivalent (room temperature):	$V_{th} = kT/q = 0,025 \text{ V}$
Dielectric constant silicon:	$\epsilon_{si} = 10^{-12} \text{ F/cm}$
Dielectric constant silicon dioxide:	$\epsilon_{ox} = 3.5 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$
Intrinsic concentration:	$n_i^2 = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$
Electron diffusion constant (if not given):	$D_n = 30 \text{ cm}^2/\text{s}$
Hole diffusion constant (if not given):	$D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$
Electron mobility (if not given)	$\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Hole mobility (if not given)	$\mu_h = 350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Diffusion length of carriers (if not given)	$L_n = L_p = 30 \text{ }\mu\text{m}$

1. Semiconductor Physics (spatially in one dimension)

Fermi-Dirac function

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

$$g(E) \sim 10^{47} \sqrt{E}$$

Carrier concentrations

$$n = N_C e^{\frac{E_F - E_C}{kT}} = n_i e^{\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}}$$

$$p = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}}$$

General formalism

$$n(x) = n_i e^{\frac{\Psi(x)}{V_{th}}}$$

$$p(x) = n_i e^{-\frac{\Psi(x)}{V_{th}}}$$

$$\Psi(x) = (E_F - E_{Fi}) / q$$

Current equation

$$j_n = qn\mu_n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$j_p = qp\mu_p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Einstein relation

$$D = V_{th} \mu$$

$$V_{th} = \frac{kT}{q}$$

Excess recombination velocity (electrons)

$$R = \tilde{n} N_t c_n = \tilde{n} N_t v_{th} \sigma_t = \frac{\tilde{n}}{\tau_n}$$

Continuity equation (electrons)

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dj}{dx} - U = D_n \frac{d^2 \tilde{n}}{dx^2} - \frac{\tilde{n}}{\tau_n}$$

Excess carrier diffusion
(electrons)

$$\tilde{n}(x) = \tilde{n}_0 e^{-\frac{x}{L_n}}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

2. PN junctions

Built in potential

$$\phi_{bi} = \frac{1}{q} (E_F(n) - E_F(p)) = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = V_{th} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

Poisson's equation

$$-\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = \frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

Width of a depletion
layer

$$W = (x_{dn} + x_{dp}) = \left(\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (\phi_{bi} - V_D) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Junction current
(Shockley equation) long
diode

$$I_{total} = A(j_n + j_p) = Aq n_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \frac{D_n}{L_n} + \frac{1}{N_D} \frac{D_p}{L_p} \right) \left(e^{\frac{V_A}{V_{th}}} - 1 \right)$$

Gummel number

$$G = \int_0^L \frac{N(x)}{D(x)} dx ; \text{ for homogeneously doped n-region:}$$

$$G = \frac{N_D L}{D_p}$$

Diffusion capacitance

$$C_{diff} = \frac{1}{V_{th}} (\tau_n j_n + \tau_p j_p) \approx \frac{\tau}{V_{th}} j$$

3. Bipolar transistors

Base current density

$$j_{Base} = \frac{q n_i^2}{G_E} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}} - 1 \right)$$

Collector current density

$$j_{Collector} = \frac{q n_i^2}{G_B} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}} - 1 \right)$$

Definitions

$$I_E = -(I_B + I_C)$$

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\alpha_F = \gamma_F = \frac{I_C}{I_E} = \frac{\beta_F}{\beta_F + 1}$$

Ebers-Moll model

$$I_C = IS \left(e^{\frac{V_{BE}}{NFV_{th}}} - e^{\frac{V_{BC}}{NRV_{th}}} \right)$$

$$I_B = \frac{IS}{BF} \left(e^{\frac{V_{BE}}{NFV_{th}}} - 1 \right) + \frac{IS}{BR} \left(e^{\frac{V_{BC}}{NRV_{th}}} - 1 \right)$$

Small signal model

$$i_B = g_\pi v_{BE} + g_\mu v_{BC}$$

$$i_C = g_m v_{BE} + g_0 v_{BC}$$

4. MOS transistor

Charge storage

$$Q_n = -C_{ox}(V_{GB} - V_T)$$

Threshold voltage

$$V_T = V_{FB} + (2\phi_B + V_{SB}) + \frac{(2\epsilon_s q N_A (2\phi_B + V_{SB}))^0}{C_{ox}}$$

Drain current (strong inversion)

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[\left(V_{GB} - 2\phi_B - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} - \frac{2\gamma}{3} \left\{ (V_{GB} + 2\phi_B + V_{DS})^{1.5} - (V_{SB} + 2\phi_B)^{1.5} \right\} \right]$$

Drain current (weak inversion)

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n \int_0^L V_{th} \frac{dQ_n}{dx} dx = \mu_n V_{th} \frac{W}{L} Q_n = \mu_n V_{th}^2 \frac{W}{L} C_{dep} e^{\frac{V_{GB} - \alpha\phi_B}{mV_{th}}}$$

Level 3 model (square law model)

$$I_D = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots V_{GS} < V_T \\ \frac{KP}{2} \frac{W}{L_{eff}} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + LAMBDA \cdot V_{DS}) & \dots \dots \dots 0 < V_{GS} - V_T \leq V_{DS} \\ \frac{KP}{2} \frac{W}{L_{eff}} V_{DS} (2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}) (1 + LAMBDA \cdot V_{DS}) & \dots \dots \dots 0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T \end{cases}$$

Capacitances in MOS

$$C_{GB} = C'_{GB} L_{eff}$$

$$C_{GS} = C_{ox} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{GS} - V_{DS} - V_T}{2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}} \right)^2 \right\} + C'_{GS} W$$

$$C_{GD} = C_{ox} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{GS} - V_T}{2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}} \right)^2 \right\} + C'_{GD} W$$

Small signal model

$$i_D = g_m v_{GS} + g_{ds} v_{DS} + g_{mbs} v_{BS}$$