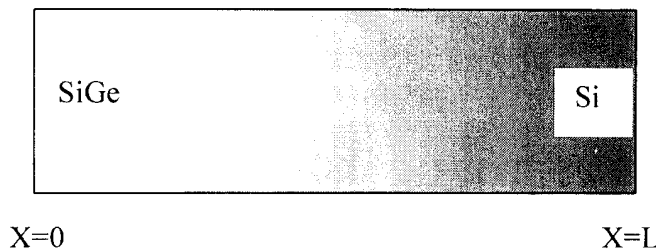


### 1. Vraagstuk Halfgeleiderfysica

Twee bekende halfgeleiders die in de siliciumtechnologie gebruikt worden zijn silicium (bandgap 1,1 eV,  $n_i^2=2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$  bij kamer T) en germanium (bandgap 0,7 eV,  $n_i^2=2 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-6}$  bij kamer T). (Heel) vroeger was germanium basismateriaal, nu is dat silicium. In zeer moderne (bipolaire) technologieën wordt soms weer een legering van silicium en germanium gebruikt voor de basis van een bipolaire transistor. We bestuderen een dergelijke legering.

We hebben een blokje halfgeleider gegroeid dat op  $x=L$  geheel bestaat uit silicium en op  $x=0$  uit 50% silicium en 50% germanium met daartussen een geleidelijke overgang van Si naar SiGe. Beide kristallen ‘mengen’ goed en je kunt de resulterende *bandgap* gewoon uitrekenen naar verhouding van de aanwezigheid van Si en Ge (is dus 0,9 eV op  $x=0$ ).



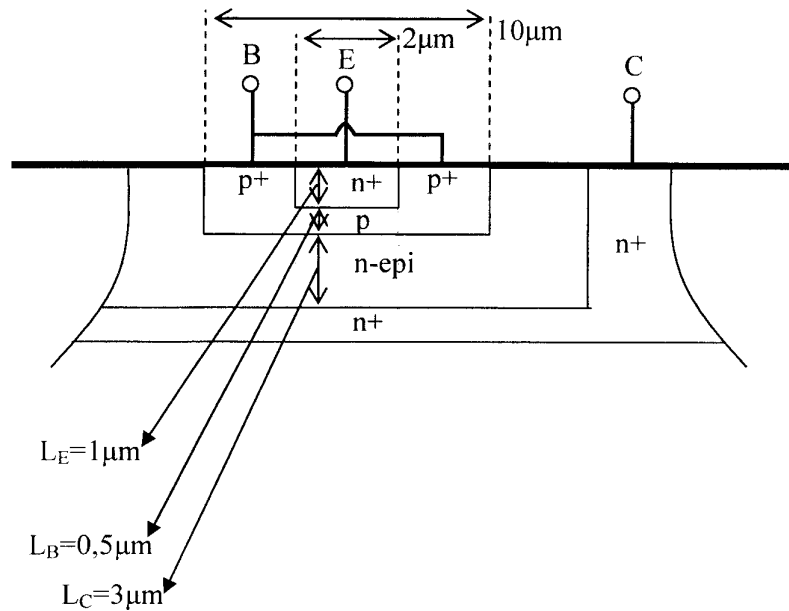
- Schets een grafiek van het bandenplaatje en daaronder een grafiek van de ladingsdragersconcentraties (het blokje is nog niet gedoteerd). Geef wel (ronde) waarden aan op de y-as voor relatieve positie van Fermi-niveau t.o.v. de bandranden en waarden voor concentraties.
- Er wordt een homogene dotering aangebracht van  $10^{18}$  acceptoren  $\text{cm}^{-3}$ . Schets opnieuw beide grafieken en bereken de waarden van de relatieve positie van  $E_F$  aan beide uiteinden en waarden van de concentraties aan die uiteinden.
- Waarom zal er een ingebouwd veld zijn? Schets de vorm als functie van de plaats. Verwacht je dat er ruimtelading aanwezig is? Schets ook (kwalitatief) eventuele ruimtelading als functie van de plaats in een grafiek.
- Bereken het potentiaalverschil tussen  $x=0$  en  $x=L$ .
- Op  $x=0$  worden met een continue stroom elektronen geïnjecteerd (bv. door een voorwaarts gebiasde n-emitter). Beschrijf wat er met deze elektronen gebeurt en schets de elektronenconcentratie als functie van de plaats.
- Wanneer  $L$  veel kleiner is dan de diffusieweglengte van elektronen (zoals in de basis van een npn transistor), wat is dan het effect van deze legeringsgradatie op de collectorstroom wanneer er inderdaad een n-emitter links aanwezig is (en n-collector rechts)? En op de basisstroom?

## 2. Vraagstuk PN-overgang

- a) Leg in eigen woorden kort uit waarom een diode in de ene richting veel beter geleidt dan in de andere.
- b) Teken het energie banddiagram van een homogeen gedoteerde  $n+p$  junctie die in evenwicht is. Teken daaronder het corresponderende plaatje van elektronen- en gatenladingsdragersconcentraties (in één plaatje, logaritmische as) en daaronder het plaatje van de ruimteladingsdichtheid (neem hier bij voorkeur een lineaire verticale as). Geef een korte uitleg van de grafieken.
- c) De diode van a) wordt in voorwaarts geschakeld. Neem aan dat de lengte van de neutrale gebieden lang is t.o.v. de diffusieweglengtes voor elektronen en gaten. Schets opnieuw het energie-banddiagram, de ladingsdragersconcentraties en ruimtelading. Verklaar de verschillen met de eerdere figuren.
- d) Maak een grafiek van ladingsdragersconcentraties van de diode uit a) en b) wanneer deze in sperrichting is geschakeld en verklaar de grafiek.
- e) Van de diode in a) en b) wordt nu de lengte van de neutrale gebieden aan beide kanten korter gemaakt dan de diffusieweglengtes. Teken opnieuw de grafiek van ladingsdragersconcentratie. (Op de contacten kan evenwicht worden verondersteld.) Verklaar de vorm van de grafiek.
- f) U moet een keuze maken voor een diode in een toepassing waar snel geschakeld moet worden. Kiest u een lange of korte diode? Verklaar uw antwoord.

## 3. Vraagstuk bipolaire transistor

Gegeven is een bipolaire transistor zoals in onderstaand zijaanzicht in silicium gerealiseerd.



De dotering in de emitter is  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , in de intrinsieke basis  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  en de intrinsieke collector  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Alle doteringen zijn homogeen.

- Bereken  $\beta_F$  en  $\beta_R$  wanneer de basis- en emittergebieden (qua oppervlak) vierkant zijn.
- Waarom is de dotering onder de basiscontacten hoger gemaakt dan in de intrinsieke basis?
- Bereken de breedte van de depletielaag van de EB-junctie bij 0,6 V voorwaartsspanning. Bij welke  $V_{CB}$  verwacht je punch-through in deze transistor (verdwijnen van de neutrale basis en dus ongecontroleerde toename collectorstroom)?
- Geef het klein-sigitaal vervangsschema van deze transistor bij  $V_{BE}=0,6 \text{ V}$  en  $V_{CB}=3 \text{ V}$  en bereken de belangrijkste componenten.

#### 4. Vraagstuk MOS transistor

- a) Een jonge telg uit je familie heeft het VWO-examen (Natuur en Techniek) met glans gehaald. Leg voor deze “doelgroep” het werkingsprincipe van de transistor uit in lektaal. Gebruik hiervoor minder dan ½ A4 en beperk je tot de essentie.

In een MOS-fabriek worden transistoren getest voor ze verkocht worden. Bij de test worden de volgende eigenschappen van de transistor gemeten:

- 1) de drempelspanning  $V_{T0}$  bij lage  $V_{DS}$ ;
- 2) de drainstroom  $I_D$  bij  $V_{GB} = V_{DS} = 10$  V;
- 3) de “subthreshold slope”  $m$ .

Dit alles bij  $V_{BS}=0$  V.

- b) Geef met voorbeelden aan hoe deze drie parameters bepaald kunnen worden, gegeven voldoende stroom- en spanningsbronnen en voldoende stroom- en spanningsmeters.

De fabriek levert standaard een NMOS transistor met de volgende specificaties:  $W = 10$   $\mu\text{m}$ ;  $L = 1$   $\mu\text{m}$ ; oxidedikte  $t_{ox} = 100$  nm;  $V_{T0} = 2$  V;  $N_A = 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ . Een werknemer in de clean room maakt een fout tijdens het groeien van het gate-oxide. Daardoor is het gate-oxide slechts 50 nm geworden.

- c) Schat wat de normale waarden voor bovengenoemde drainstroom en subthreshold slope zijn (bij een oxidedikte van 100 nm). Doe hierbij redelijke aannames voor eventuele parameters die niet gegeven zijn.
- d) Omdat het gate-oxide te dun is geworden, zullen alle drie parameters (drempelspanning, drainstroom en subthreshold slope) afwijkende waarden vertonen. Leg kwalitatief uit hoe de waarden veranderen (liefst vanuit een fysisch begrip).
- e) Verandert ook de mobiliteit in de MOS transistor? (Motiveer je antwoord aan de hand van *Matthiessen's rule*.)
- f) Schets het kleinsignaal-model van de MOST. Wat is (kwalitatief) het gevolg van de fabricagefout voor de waarde van de componenten in dit vervangingschema? Hoe zou de afsnijfrequentie veranderen?
- g) (Bonusvraag) Doe een gemotiveerde uitspraak over de levensduur (of betrouwbaarheid) bij gelijke gebruiksomstandigheden van deze MOS transistor, vergeleken met de gewone MOS transistor met 100 nm gate-oxide.

**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)

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

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

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