

Examen Halfgeleiderdevices (121706)

Datum: Woensdag, 01-11-2006

Tijd: 13.30-17.00 voor volledig tentamen*)

Plaats: SP3

Dit tentamen omvat 4 onderdelen:

Halfgeleider Fysica	Vraagstuk 1
PN-overgang	Vraagstuk 2
Bipolaire Transistor	Vraagstuk 3
MOS Transistor	Vraagstuk 4

Studenten die het vak halfgeleiderdevices *oude* stijl (121706, 2 sp) willen afronden doen alleen vraagstukken 2,3 en 4.

Studenten die het vak halfgeleiderdevices *nieuwe* stijl (121706, 4 ECTS) willen afronden doen alle vraagstukken.

U wordt verzocht op uw tentamenformulier en tentamenbriefje aan te geven voor welk vak u tentamen doet.

Beschikbare tijd voor het tentamen:

Indien 3 vraagstukken worden gedaan:	3 uur tot 16.30 uur*)
Indien 4 vraagstukken worden gedaan:	3.5 uur tot 17.00 uur

Bijgeleverd: Formule en constantenblad.

Succes met het tentamen !!!

Constants and equations Semiconductor Device Physics (Sept 2005)

Elementary charge:	$q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Thermal voltage equivalent (@ room temperature):	$u_T=kT/q=0.025 \text{ V}$
Dielectric constant (permittivity) Silicon:	$\epsilon_{Si}=10^{-12} \text{ F/cm}$
Dielectric constant (permittivity) Silicon dioxide:	$\epsilon_{ox}=3.5 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$
Intrinsic carrier concentration (if not given):	$n_i = \sqrt{2} \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
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):	$\mu_p=350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

1. Semiconductor Physics (spatially in one dimension)

Fermi-Dirac distribution	$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$
Density of states (if not given)	$g(E) \sim 10^{47} \sqrt{E}$
Carrier concentrations	$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)$ $p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right)$
Electrostatic potential	$\psi = -\frac{E_{Fi}}{q}$
Fermi potential	$\phi_F = -\frac{E_F}{q}$
General formalism	$n = n_i \exp\left(\frac{\psi - \phi_F}{u_T}\right)$ $p = n_i \exp\left(\frac{\phi_F - \psi}{u_T}\right)$
Current equations	$j_n = qn\mu_n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} = n\mu_n \frac{dE_{Fn}}{dx}$ $j_p = qp\mu_p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} = p\mu_p \frac{dE_{Fp}}{dx}$
Einstein relation	$D = u_T \cdot \mu = \frac{kT}{q} \cdot \mu$
Excess recombination rate (electrons)	$R = \tilde{n} N_i c_n = \tilde{n} N_i v_{th} \sigma_n = \frac{\tilde{n}}{\tau_n}$

Continuity equation (electrons)

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dj_n}{dx} - (R - G) = D_n \frac{d^2\tilde{n}}{dx^2} - \frac{\tilde{n}}{\tau_n}$$

Excess carrier diffusion (electrons)

$$\tilde{n}(x) = \tilde{n}_0 \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

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

Poisson's equation

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

2. pn junction

Built-in potential

$$\phi_{bi} = u_T \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

Depletion layer width

$$W = \sqrt{\left(\frac{2\epsilon_s (N_A + N_D)}{q N_A N_D} (\phi_{bi} - V_A)\right)}$$

Junction current (Shockley eq.)
long diode

$$I = A(j_n + j_p) = -Aqn_i^2 \left(\frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p}\right) \left(\exp\left(\frac{V_A}{u_T}\right) - 1\right)$$

Gummel number

$$G = \int_0^W \frac{N(x)}{D(x)} dx$$

Diffusion capacitance

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

3. Bipolar transistor

Current density (NPN)

$$j = -\frac{qn_i^2}{G} \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{u_T}\right) - 1\right)$$

Definitions

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

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

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 NMOS

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

Drain current NMOS (strong inversion)

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

Drain current NMOS (weak inversion)

$$I_D = \frac{\mu_n W u_T}{L} \int_0^L \frac{dQ_n}{dx} dx = \frac{\mu_n W u_T}{L} Q_n = -\frac{\mu_n W u_T^2}{L} C_{dep} \exp\left(\frac{V_{GB} - \alpha\phi_B}{m \cdot u_T}\right)$$

Level 3 model (square law model)

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

Capacitances in MOS

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

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

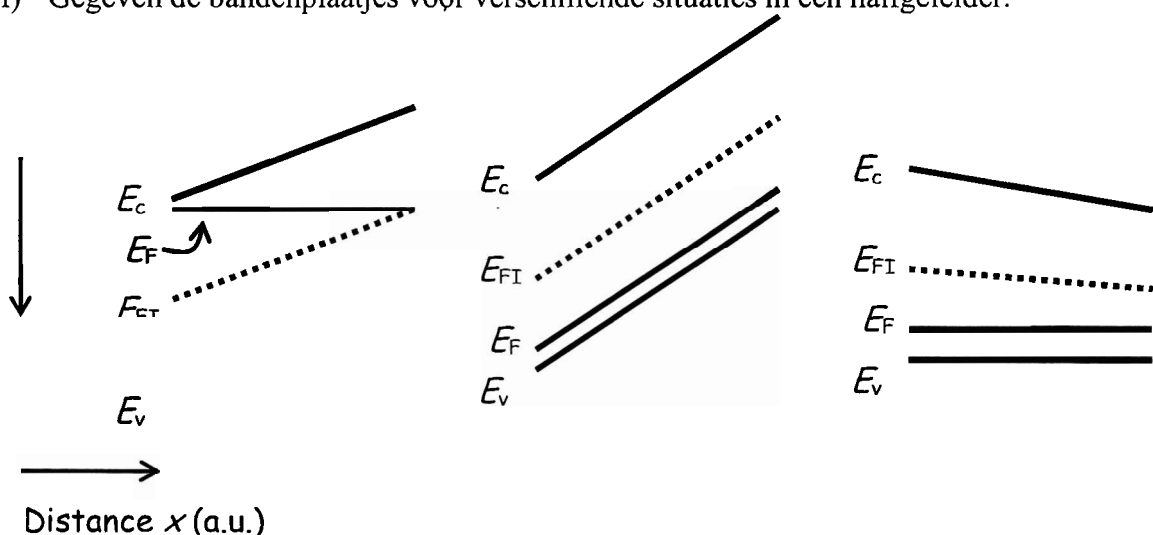
$$C_{GD} = C_{ox} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{GS} - V_T}{2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}} \right)^2 \right\} + C'_{GD} W$$

Small signal model

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

Vraagstuk 1 Inleiding Halfgeleider Fysica

- Welke fysische parameters bepalen de geleidbaarheid (Engels: “conductivity”) van een materiaal?
- Geef aan wat het essentiële verschil is tussen atoombindingen gevormd in metalen en zuivere (d.i. intrinsieke) halfgeleiders. Leg tevens uit waarom er een (groot) verschil is tussen de geleidbaarheid van deze vaste stoffen. Verklaar in dit verband de term “halfgeleider”.
- Geef twee manieren waarmee de geleidbaarheid van zuivere halfgeleiders gecontroleerd verhoogd kan worden.
- Gegeven twee één-dimensionale silicium structuren waaraan geen externe contacten zijn verbonden en die vervuild zijn met de volgende concentraties: 1) acceptor concentratie van 10^{17} cm^{-3} en 2) donor concentratie van 10^6 cm^{-3} . De structuren zijn in thermisch evenwicht ($T=300 \text{ K}$). Bereken de ladingsdragersconcentraties en geleidbaarheid van beide structuren. (Let a.u.b. op de eenheden.) Verklaar welke ladingsdragers de geleidbaarheid van de structuren bepalen.
- Schets de bandenplaatjes voor beide structuren gegeven in d).
- Gegeven de bandenplaatjes voor verschillende situaties in een halfgeleider.



(a)

(b)

(c)

De plaatjes zijn op zelfde (lineaire) schaal getekend. Veronderstel verder volledige ionisatie van de doping. Geef antwoord op de volgende vragen.

- Voor welke situatie(s) geldt thermisch evenwicht? Leg uit.
- Leg uit in welke situatie het ingebouwde elektrische veld het hoogst is.
- Leg uit voor welke situatie(s) er sprake is van een uniforme doping verdeling.
- Voor welke situatie(s) loopt er een stroom en waardoor wordt die stroom bepaald (diffusie en/of drift)? Verklaar.

Waardering:

- a) 10
- b) 20
- c) 10
- d) 20
- e) 10
- f) 30

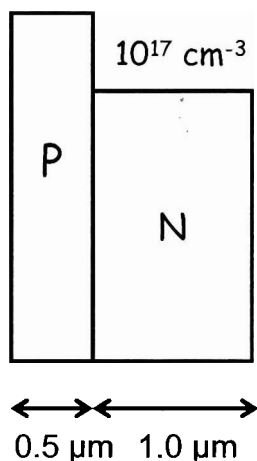
Vraagstuk 2 pn-overgang

Het doping profiel van een één-dimensionale korte diode gemaakt van silicium is weergegeven in de figuur beneden. Aan beide uiteinden van de component is een metaalcontact.

Gemakshalve wordt er het volgende verondersteld:

1. de diode opereert bij kamertemperatuur ($T=300\text{K}$),
2. de doping concentratie heeft geen invloed op parameters zoals de mobiliteit en verboden band (bandgap),
3. de metaalcontacten van de component gedragen zich "ohms",
4. de abrupte depletie benadering mag toegepast worden,
5. en aan beide zijden van de component is er sprake van een quasi-neutraal gebied.

10^{19} cm^{-3}



Veronderstel verder dat er sprake is van thermisch evenwicht in de diode, tenzij anders wordt vermeld.

- a) Schets voor de diode de ruimtelading als functie van de plaats en geef een korte toelichting.
- b) Schets ook het ingebouwde elektrische veld en de potentiaal voor de diode en verklaar.
- c) Er wordt nu een extern aangelegde spanning van 0.5 V op de aansluitingen van de diode gezet. De diode staat nu in "doorlaat". Schets op lineaire schaal de concentratie van de minderheidsladingsdragers in de quasi-neutrale gebieden. Schets deze voor elk quasi-neutraal gebied in een apart figuur en licht de schetsen toe.

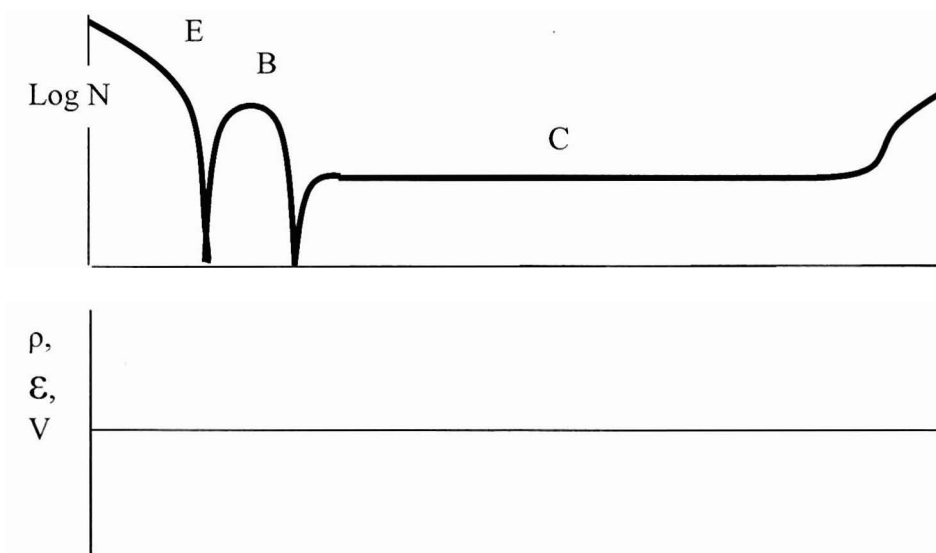
- d) Door welke type ladingsdrager wordt de totale stroom voornamelijk bepaald? Verklaar.
- e) Veronderstel dat de diffusiecapaciteit de belangrijkste oorzaak is voor de hoge loop- of vertragingstijd τ in de diode. Laat zien dat dan geldt dat $\tau = \frac{dQ}{dJ} = \frac{L^2}{2 \cdot D}$ met L is de lengte van het quasi-neutrale gebied en D is de diffusiecoëfficiënt van de minderheidsladingsdrager. Leg uit wat welk deel van de diode de grootste vertraging oplevert. Wat zou een reden kunnen zijn om steeds kleinere componenten te maken?

Waardering:

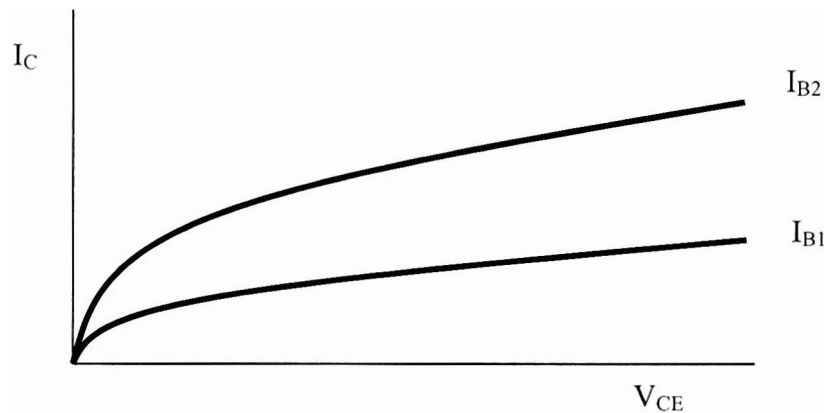
- a) 20
 b) 20
 c) 20
 d) 10
 e) 30

Vraagstuk 3 Bipolaire transistor

Gegeven is onderstaande 1D doorsnijing van het doteringsprofiel van een bipolaire transistor:



- a) Schets de grafieken van de ruimtelading, ingebouwde elektrische velden en ingebouwde potentialen in 3 grafieken en verklaar ze kort. Teken ook het bandenplaatje en verifieer of dit consistent is met de eerdere grafieken. Ga uit van evenwicht (alle spanningen op nul Volt).
- b) In onderstaande grafiek is de uitgangskarakteristiek aangegeven van deze transistor bij 2 waarden van I_B .



Teken in deze grafiek de uitgangskarakteristieken bij dezelfde waarden van I_B van 3 nieuwe transistoren waarin de doteringen van emitter, resp. basis, resp. collector zijn verlaagd t.o.v. die uit a). Verklaar kort de verschuivingen/veranderingen in de curves.

- c) Geef het klein signaal vervangschema van een (ideale) bipolaire transistor en laat zien dat voor de afsnijfrequentie f_T geldt wanneer slechts de diffusie capaciteit belangrijk is en de depletie capaciteiten te verwaarlozen zijn:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{base}} = \frac{\mu u_T}{\pi L_B^2}$$

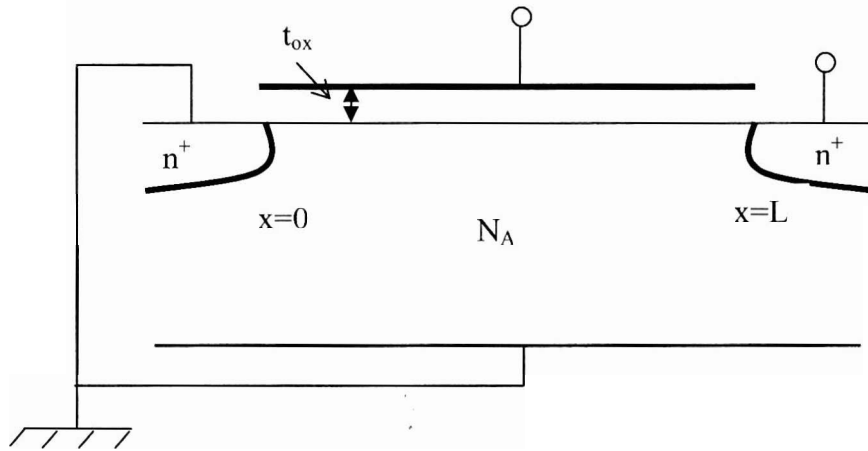
(Frequentie waarbij stroomversterking nul is bij kortgesloten uitgang.)

Waardering:

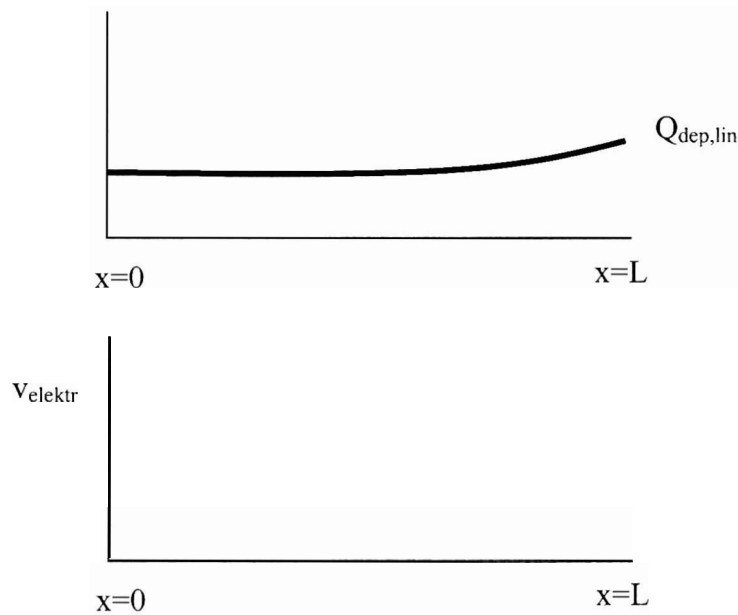
- a) 40
- b) 30
- c) 30

Vraagstuk 4 MOS transistor

Een nMOS, lengte L en breedte W , is gegeven als in onderstaand figuur met een dotering van $N_A=10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $t_{ox}=10 \text{ nm}$, gebruik verder de constanten als op het formuleblad.



- Laat zien dat inversie optreedt als de potentiaal in het kanaal ca $0,8 \text{ V}$ is (of wel dat de bandbuiging aan het interface Si-SiO₂, $-2q\phi_B$, $-0,8 \text{ eV}$ is). Bepaal van deze transistor de drempelspanning. (Neem in beide gevallen $V_{FB}=0 \text{ V}$).
- Hieronder is een grafiek geschetst van de grootte van de depletielading in deze nMOS als functie van de plaats in het kanaal, wanneer de transistor in het lineaire gebied is gebiased met een kleine V_{DS} ($Q_{dep,lin}$). Schets in dezelfde grafiek het verloop van de mobiele (kanaal)lading, Q_n , als functie van de plaats (absolute grootte niet van belang). Schets ook het verloop van beide ladingsconcentraties wanneer voor dezelfde V_{GS} de transistor nu in verzadiging is gebiased met een grotere V_{DS} . Verklaar kort alle curves. In de grafiek daaronder wordt gevraagd het verloop van de driftsnelheid van de elektronen als functie van de plaats te schetsen in beide gevallen. Lig kort de curves toe.



- c) Geef het kleinsignaal vervangschema van een verzadigde nMOS ($V_{\text{SB}}=0$). Neem voor $C_{\text{GS}} \sim (2/3)WLC_{\text{ox}}$ en verwaarloos de andere capaciteiten. Laat zien dat de afsnijfrequentie (frequentie waarbij de stroomversterking 1 is met voor wisselspanning kortgesloten uitgang) is:

$$f_T = \frac{3\mu(V_{\text{GS}} - V_T)}{4\pi L^2}$$

($KP = \mu C_{\text{ox}}$ en gebruik het 'square law model', met $\lambda=0$.)

Bonus: reflecteer op het verschil tussen de afsnijfrequentie van bipolair en MOS.

Waardering:

- a) 40
- b) 30
- c) 30