

Examen Halfgeleiderdevices (121706)

Datum: Dinsdag, 06-04-2010

Tijd: 8:45-12:15 voor volledig tentamen*)

Plaats: Spiegel, zaal 1 (SP1)

Dit tentamen omvat 4 onderdelen:

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

Studenten die in het curriculum 2009/10 een voldoende hebben gehaald voor de WASP test mogen vraagstuk 2 overslaan. In dat geval worden alleen de vraagstukken 1, 3 en 4 meegeteld voor het uiteindelijke tentamencijfer.

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 11.45 uur *)
Indien 4 vraagstukken worden gedaan:	3.5 uur tot 12.15 uur

Bijgeleverd: Formule en constantenblad.

Succes met het tentamen !!!

Constants and equations Semiconductor Device Physics

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

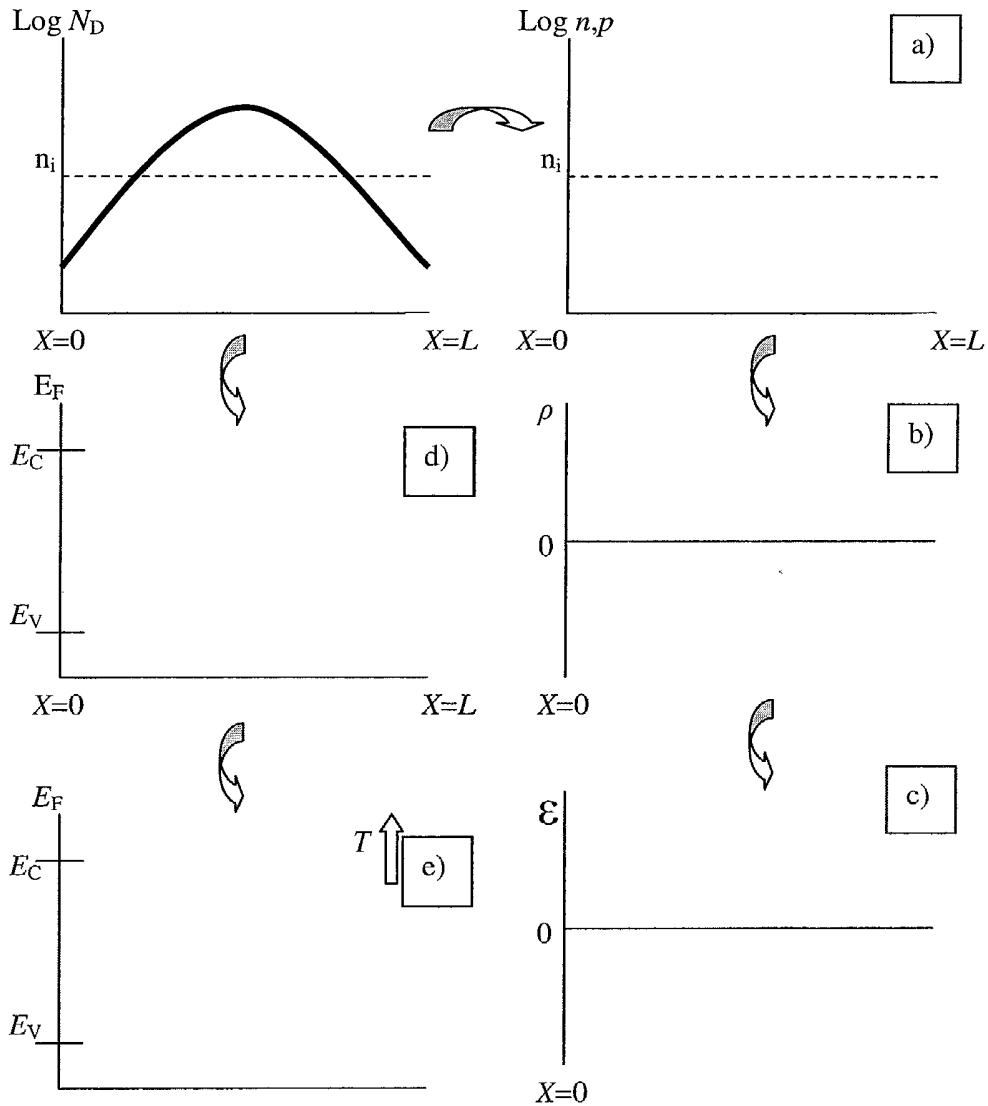
$$C_{GD} = C_{ox} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{V_{GS} - V_T}{2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}} \right)^2 \right\} + C'_{GD} W$$

Small signal model

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

Vraagstuk 1 Halfgeleiderfysika

- a) We beschouwen een stukje (1D) inhomogeen gedoteerd silicium (bij kamertemperatuur is $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) met een doteringsprofiel zoals in onderstaande grafiek.



Schets de 5 ontbrekende curves in de andere grafieken: in a) de gaten- en elektronenconcentraties, in b) de eventueel aanwezige (ingebouwde) lokale overmaat lading, in c) het bijhorende ingebouwde elektrische veld. In d) de relatieve positie van het Fermi niveau en in e) opnieuw maar nu indien de temperatuur hoger is. Verklaar elk van de grafieken kort.

- b) Stel dat door een externe batterij een elektrisch veld werd aangelegd en er een stroom gaat lopen, zou de driftsnelheid van de elektronen op elke positie x dezelfde zijn? Verklaar je antwoord.
- c) In een (1D) n-type, homogeen gedoteerd blokje silicium wordt op $x=0$ een constante flux gaten geïnjecteerd. Op $x=L$ wordt een even grote flux elektronen geïnjecteerd. Verklaar nauwkeurig wat er gebeurt met de geïnjecteerde gaten en elektronen. Verklaar ook of er drift en/of diffusie van ladingsdragers plaatsvindt. (Neem aan dat diffusieweglengtes kleiner zijn dan L .)
- d) Stel we doen hetzelfde met het blokje in a), zou er wezenlijk iets anders gebeuren? Geef aan wat en waarom.

Waardering:

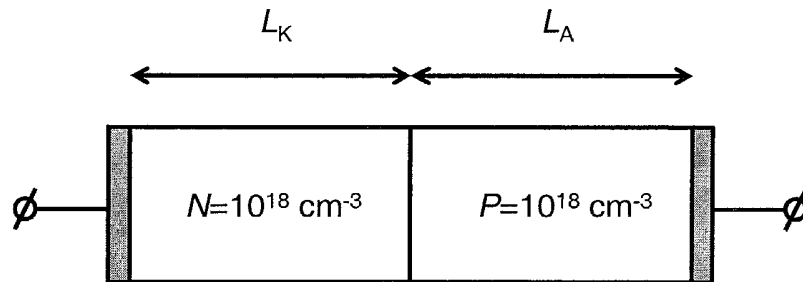
- a) 30
- b) 20
- c) 30
- d) 20

Vraagstuk 2 pn-overgang

Een schematische doorsnede van een één-dimensionale pn-junctie 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. en de abrupte depletie benadering mag toegepast worden.



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

- a) Noem minimaal twee andere type juncties naast de pn-junctie die in halfgeleider devices kunnen voorkomen.
- b) Schets voor de diode de ruimtelading als functie van de plaats en geef een korte toelichting.
- c) Schets ook het ingebouwde elektrische veld en de potentiaal voor de diode. Leg uit.

Veronderstel dat $L_K=L_A$ en dat beide veel groter zijn dan de gaten en elektronen diffusielengte (dus een symmetrische lange diode). De levensduren van elektronen τ_n en gaten τ_p worden beide $0.1\ \mu\text{s}$ verondersteld.

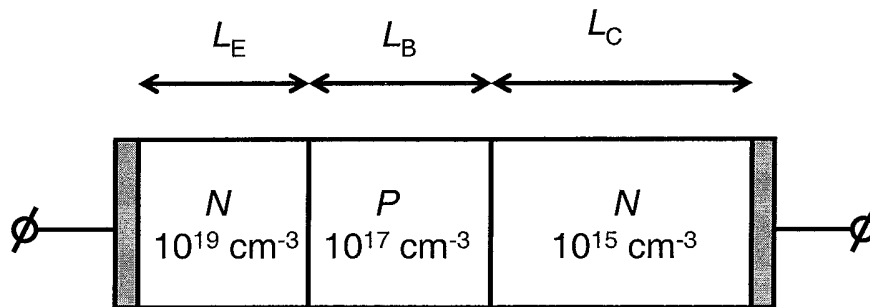
- d) Er wordt nu een extern aangelegde spanning van 0.5 V op de aansluitingen van de diode gezet. De diode staat nu in "doorlaat". Schets op lineaire schaal de concentratie van de minderheidsladingsdragers in de quasi-neutrale gebieden. Licht de schetsen toe.
- e) Schets de gaten-, elektronen- en totale stroomdichtheid (dus J_p , J_n en J) als functie van de plaats van het device beschreven in vraag d).
- f) Stel nu dat L_K veel kleiner is dan de diffusielengte van gaten. Alle andere parameters zoals hierboven beschreven worden niet veranderd. Schets nu J_p , J_n en J als functie van de plaats. Welke ladingsdragers bepaalt nu de totale stroomdichtheid? Verklaar.

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

Vraagstuk 3 Bipolaire Transistor

De schematische doorsnede van een ideale één-dimensionale silicium bipolaire transistor wordt in het plaatje beneden weergegeven (E=emitter, B=basis & C=collector). De dimensies van deze transistoren zijn zodanig dat er slechts recombinatie aan de contacten is. Verder is de aansluiting van de basis ergens in de andere dimensie (niet weergegeven). Gemakshalve worden er verschillende aannames verondersteld:

1. de transistor opereert bij kamertemperatuur ($T=300\text{K}$),
2. doping concentratie heeft geen invloed op transportparameters zoals de mobiliteit en verboden band (bandgap),
3. de metaalcontacten aan de uiteinden van het device zijn "ohms",
4. de snelheidsverzadiging in de transistor mag buiten beschouwing genomen worden,
5. de abrupte depletie benadering mag toegepast worden,
6. en de basisstroom wordt bepaald door de gaten.



- a) Noem minimaal twee niet ideale effecten die tijdens de werking van de bipolaire transistor kunnen voorkomen. Geef een korte toelichting.
- b) Schets de bandendiagram van de transistor bij thermisch evenwicht. Geef daarbij het volgende duidelijk aan: conductieband (E_c), valentieband (E_v), intrinsiek Fermi-niveau (E_{Fi}), Fermi-niveau (E_F), depletiegebieden, emitter, basis, collector.

De volgende dimensies voor de transistor zijn gegeven:

L_E (μm)	L_B (μm)	L_C (μm)
0.2	0.3	2.0

- c) Gegeven een basis-emitter spanning van $V_{BE}=0.5\text{V}$ en collector-basis spanning van $V_{CB}=0\text{V}$. Bereken de collectorstroombichtheid J_C en stroomversterking β_F .

Veronderstel nu dat in de basis-collector depletie laag de electronensnelheid instantaan verzadigt ($v=v_{th}=10^7\text{ cm/s}$) onafhankelijk van het elektrische veld (aanname 4 mag dus genegeerd worden). We kunnen dan afleiden dat voor de

collector stroomdichtheid geldt dat $J_C = \left(\frac{1}{1 + \frac{D_n}{v_{th} L_{NB}}} \right) \cdot \frac{q D_n n_i^2}{N_B L_{NB}} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{u_T}\right)$, waarin

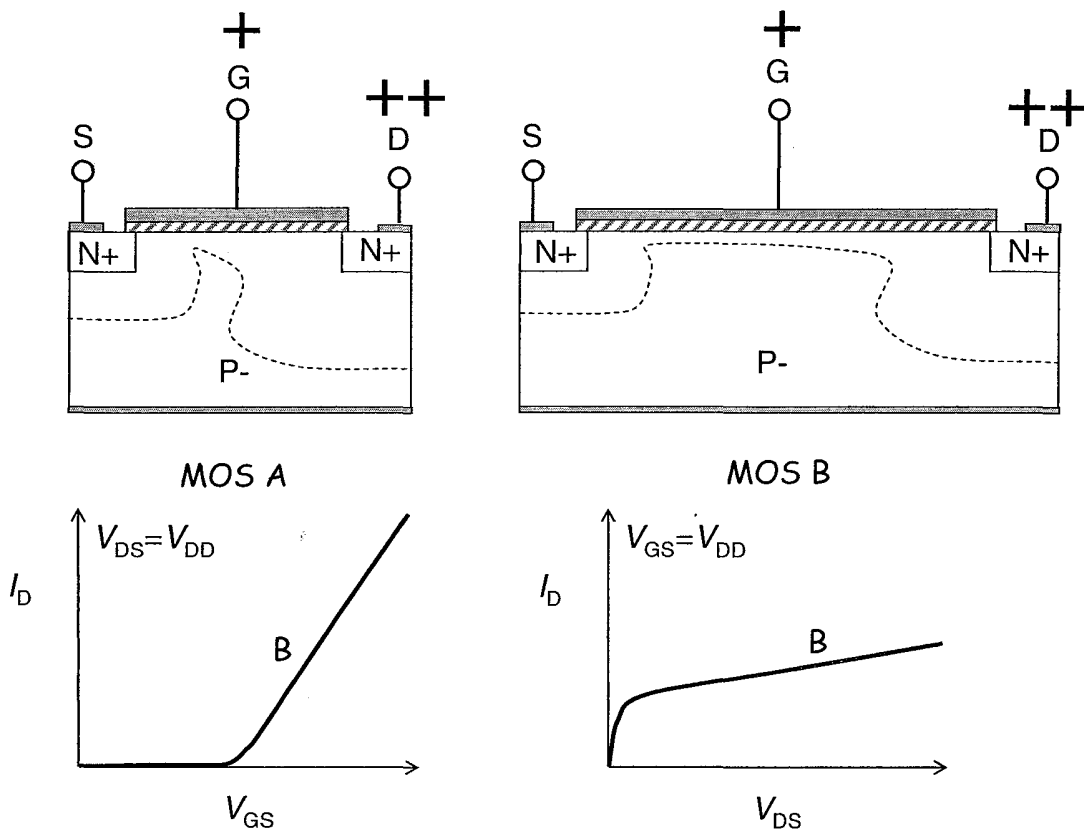
N_B is de basisdoping en L_{NB} de neutrale basislengte.

- d) Stel nu dat $L_{NB}=20$ nm. Bereken nu J_C in geval van snelheidsverzadiging en zonder snelheidsverzadiging. Leg uit wanneer snelheidsverzadiging belangrijk wordt.

Waardering: a) 30 b) 25 c) 25 d) 20

Opgave 4 MOS Transistor

In een substraat worden twee MOSTen gemaakt die identiek zijn, behalve de lengte van de kanalen; MOS B heeft een erg kort kanaal. Zie de schets.



- Van MOS B zijn de I_D - V_{GS} (bij bepaalde V_{DD}) en de I_D - V_{DS} (bij bepaalde V_{DD}) karakteristieken geschetst. Schets in dezelfde grafieken de curves van MOS A en verklaar de relatieve positie t.o.v. de curves van MOS B (bij dezelfde bepaalde V_{DD}).
- We kijken nu nauwkeurig naar de drempelspanning van beide MOSTen. Waarom zijn deze niet gelijk? Wat zou(den) de reden(en) zijn van eventuele verschillen? Hoe zouden we de drempelspanning van MOS A gelijk kunnen maken aan die van MOS B?
- Welke MOS zou je gebruiken wanneer je een versterker moet maken met een grote versterkingsfactor? Waarom? Welke MOS zou je gebruiken voor snelle schakelingen? Waarom?
- In hetzelfde substraat wordt nog een MOS B gemaakt, maar dan met een dunner gate oxide. Zal deze nieuwe MOS B een grotere of kleinere bulk- of body-factor hebben dan de 'oude' MOS B? Waarom?
- Schets ook de curves van deze nieuwe MOS B in de grafieken en verklaar de relatieve posities van de curves t.o.v. de andere MOS B.

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