

**Examen Halfgeleiderdevices (191217061)**

**Datum:** Maandag, 04-04-2011

**Tijd:** 13:45-17:15 voor volledig tentamen\*)

**Plaats:** Sportcentrum (SC)

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 2010/11 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.

Een rekenmachine mag op het tentamen gebruikt worden, het is echter **geen** open boek tentamen.

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 16.45 uur
Indien 4 vraagstukken worden gedaan:	3.5 uur tot 17.15 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

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

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

$$D = u_T \cdot \mu = \frac{kT}{q} \cdot \mu$$

Einstein relation

Excess recombination rate (electrons)

Continuity equation (electrons)

Excess carrier diffusion (electrons)

Poisson's equation

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

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

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

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

## 2. pn junction

Built-in potential

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

Depletion layer width

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

Junction current (Shockley eq.)  
long diode

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

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)

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

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

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

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

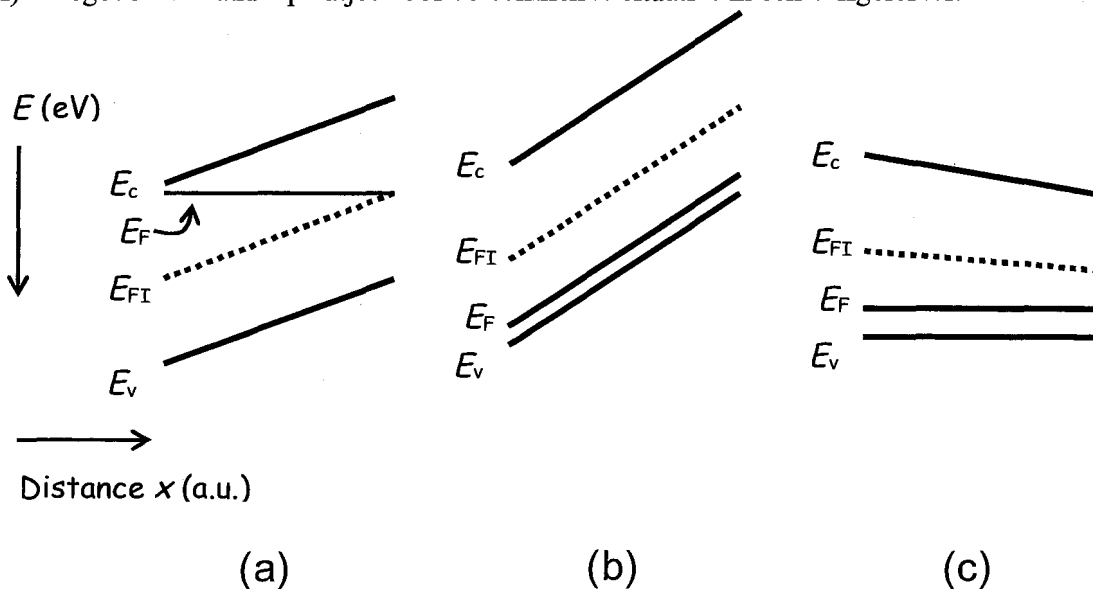
$$C_{GD} = C_{ox} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left( \frac{V_{GS} - V_T}{2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}} \right)^2 \right\} + C'_{GD} W$$

Small signal model

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

### Vraagstuk 1 Halfgeleider fysica

- Welke fysische parameters bepalen de geleidbaarheid (Engels: "conductivity") van een materiaal?
- Geef aan wat het essentiële verschil is vanuit het oogpunt van geleiding tussen atoombindingen gevormd in metalen en zuivere (d.i. intrinsieke) halfgeleiders. 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:  
 structuur (1): acceptor concentratie van  $10^6 \text{ cm}^{-3}$   
 structuur (2): donor concentratie van  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .  
 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.



- 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 elektrisch veld het hoogst is.
  - Leg uit voor welke situatie(s) er sprake is van een uniforme doping verdeling en of er ruimtelading aanwezig is.
  - Voor welke situatie(s) loopt er een stroom en waardoor wordt die stroom bepaald (diffusie en/of drift)? Verklaar.

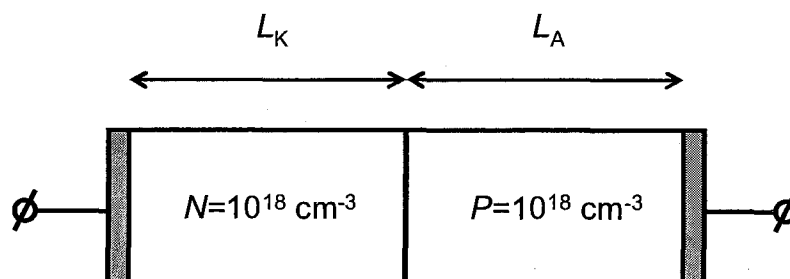
Waardering: a) 10 b) 20 c) 10 d) 20 e) 10 f) 30

## Vraagstuk 2 pn-overgang

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 ( $T=300$  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) Leg uit wat de verschillen zijn tussen een depletiegebied en een quasi-neutraal gebied. Schets deze gebieden (b.v. door middel van ruimtelading) in een plaatje zoals hierboven weergegeven.
- b) Schets ook het elektrische veld en de potentiaal voor de diode als functie van de afstand. Leg uit.

Gegeven is dat  $L_A \ll L_K$  en dat beide parameters ( $L_K, L_A$ ) veel kleiner zijn dan de gaten en elektronen diffusielengte (we hebben dus te maken met een symmetrische korte diode). Er wordt nu een externe potentiaal van  $+0.5$  V op de anode gezet en  $0$  V op de kathode.

- c) Leg uit welke ladingsdragers (gaten, elektronen) de totale stroom van de diode bepalen.
- d) Schets de gaten-, elektronen- en totale stroomdichtheid (dus  $J_p, J_n$  en  $J$ ) als functie van de afstand in het device.

We willen nu meer stroom krijgen uit de diode bij dezelfde instelspanning zoals besproken bij c) en d). Dit doen we door slechts in de n-type laag een ander halfgeleider materiaal te gebruiken. Dit materiaal heeft slechts een andere mobiliteit  $\mu$  en band gap  $E_G$ .

- e) Welke parameter zal de grootste invloed hebben op de stroom? Leg uit. Waaraan moet deze parameter voldoen om een hogere stroom te krijgen? Leg uit.

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

### Vraagstuk 3 Bipolaire Transistor

Gegeven een ideale één-dimensionale silicium NPN bipolaire transistor.

Gemakshalve wordt er het volgende aangenomen:

1. de transistor opereert bij kamertemperatuur ( $T=300\text{K}$ ),
  2. doping concentratie heeft geen invloed op transportparameters zoals de mobiliteit en verboden band (band gap),
  3. de abrupte depletie benadering mag toegepast worden,
  4. en de basisstroom wordt bepaald door de gaten.
- 
- a) Noem minimaal drie fysieke gebieden van de bipolaire transistor waarin recombinatie belangrijk zou kunnen zijn in het geval van normale werking van de transistor ("forward active mode"). Bespreek wat het gevolg hiervan is op de stroomversterking uitgaande dat de stroomversterking zeer hoog is.
  - 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.
  - c) We zetten de transistor nu in "forward active mode". Voor het berekenen van de collectorstroom hebben we net als bij de diode twee randvoorwaarden voor de minderheidsladingsdragersconcentratie nodig. Echter, één van die twee randvoorwaarden is fundamenteel anders wat cruciaal is voor geavanceerde bipolaire transistoren. Leg uit welke randvoorwaarde dat is en in hoeverre is dat nu anders met de diode.
  - d) We zetten de transistor nu in "saturatie mode" door alleen de collector spanning aan te passen vergeleken met de situatie beschreven in vraag c). Leg uit wat er vergeleken met situatie c) met de ladingsdragers in de basis en collector gebeurt. Wat is het gevolg daarvan op het schakelgedrag van de transistor?

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

#### Opgave 4 MOS Transistor

Gegeven de verzadigingstroom van de MOS transistor:

$$I_D = \frac{\mu \cdot C_{\text{ox}} \cdot W}{2L} \cdot (V_{\text{GS}} - V_T)^2, \quad \text{met}$$

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}}.$$

Het substraat (of backgate) is kortgesloten met het source contact.

- Noem minimaal twee niet ideale effecten wat de eigenschap van het gate oxide wat de MOS transistor werking negatief zouden kunnen beïnvloeden. Wat zouden de gevolgen daarvan kunnen zijn op de werking van de MOS transistor?
- Een manier om de drainstroom te verhogen is om de oxide capaciteit  $C_{\text{ox}}$  te verhogen. Wat zal men met de oxidelaag moeten doen om dit voor elkaar te krijgen? Echter, dit kan niet onbeperkt doorgaan. Beschrijf in woorden wat er zal gebeuren met de werking van de transistor mocht dit desondanks toch gebeuren.
- Een manier om het probleem in b) te omzeilen is het gebruik van een alternatief gate dielectricum. Welke eigenschap zou dit alternatief materiaal moeten hebben om toch een hoge "oxide" capaciteit te hebben? We nemen hierbij aan dat we een ideaal alternatief gate materiaal hebben (dus geen last van de in vraag a) beoogde effecten). Welke eigenschap zou eigenlijk hierbij ook belangrijk zijn?
- Leid een formule af voor de transconductantie  $g_m$  uitgaande van de verzadigingstroom.
- Schets het klein signaalschema van deze MOS transistor in common source mode.

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