

**Tentamen Halfgeleiderdevices (1217061, 3sp) Locatie: SPORTCENTRUM**

**Datum: 1-12-2000**

**Tijd: 9.00 – 12.30 uur voor volledig tentamen\*)**

Dit tentamen omvat 4 onderdelen:

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Halfgeleider fysica  | vraagstuk 1 |
| Pn-overgang          | vraagstuk 2 |
| Bipolaire transistor | vraagstuk 3 |
| MOS transistor       | vraagstuk 4 |

Voor vraagstuk 2 wordt een vrijstelling gegeven indien de pn toets (WASP) gehaald is. Het eindcijfer wordt uitsluitend bepaald uit de score op dit schriftelijk tentamen.

(Indien u nog het vak halfgeleiderdevices *oude* stijl (121706, 2 sp) wilt afronden, dient u dit bij aanvang aan de surveillant te melden. U maakt u dan alleen vraagstuk 2,3 en 4. Voor vraagstuk 2 wordt een vrijstelling gegeven indien de pn toets (WASP) gehaald is. Het eindcijfer wordt bepaald uit de score op dit schriftelijk tentamen. U wordt verzocht op uw tentamenformulier en tentamenbriefje aan te geven dat u tentamen oude stijl doet).

Beschikbare tijd voor het tentamen:

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Indien 2 vraagstukken worden gedaan (uitsluitend oude stijl): | 2 uur tot 9.00 uur*)  |
| Indien 3 vraagstukken worden gedaan:                          | 3 uur tot 12.00 uur*) |
| Indien 4 vraagstukken worden gedaan:                          | 3,5 uur tot 12.30 uur |

*Bijgeleverd: formule en constantenblad.*

Succes met het tentamen!!

Beoordeling:

Het tentamen omvat 4 vraagstukken (fysica, pn-overgang, bipolaire transistor en MOS transistor). Elk vraagstuk wordt apart nagekeken (op schaal van 10) en het eindcijfer is het gemiddelde van de 4 cijfers.

Het onderwerp pn-overgang wordt vrijgesteld wanneer de WASP toets in het lopend studiejaar met goed gevolg is gedaan.

Door het doen van simulaties als huiswerkprojecten kunnen deelcijfers worden behaald. Voor elk van de 3 onderwerpen pn-overgang, bipolaire transistor en MOS transistor is er een simulatieopdracht die kan worden ingeleverd. Er is besloten dat de bonus voor het met voldoende beoordeling afwerken van de simulaties een punt extra (op een schaal van 10) oplevert voor het betreffende vraagstuk in het tentamen.

Het doen van de WASP test (met goed gevolg afgelegd) levert vrijstelling voor het vraagstuk van pn-overgang op. Indien ook nog de simulatieopdracht pn-overgang goed gedaan is, levert dat toch nog een punt op.

Het eindcijfer wordt dus bepaald als het gemiddelde van de 3 of 4 deelbeoordelingen.

## Constants and equations Semiconductor Devices en Semiconductor Physics (dec 2000)

|  |   |
|--|---|
| 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)                   | $\mu_h=350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$              |

### 1. Semiconductor Physics (spatially in one dimension)

Fermi-Dirac function

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

Density of states

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

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

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

Gummel number

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

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

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

Collector current density

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

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

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

$$I_B = \frac{IS}{\beta_F} \left( e^{\frac{V_{BE}}{N_F V_{th}}} - 1 \right) + \frac{IS}{\beta_R} \left( e^{\frac{V_{BC}}{N_R V_{th}}} - 1 \right)$$

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

$$V_T = V_{FB} + (2\phi_B + V_{SB}) + \frac{(2\epsilon_s q N_A (2\phi_B + V_{SB}))^{0.5}}{C_{ox}}$$

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

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

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

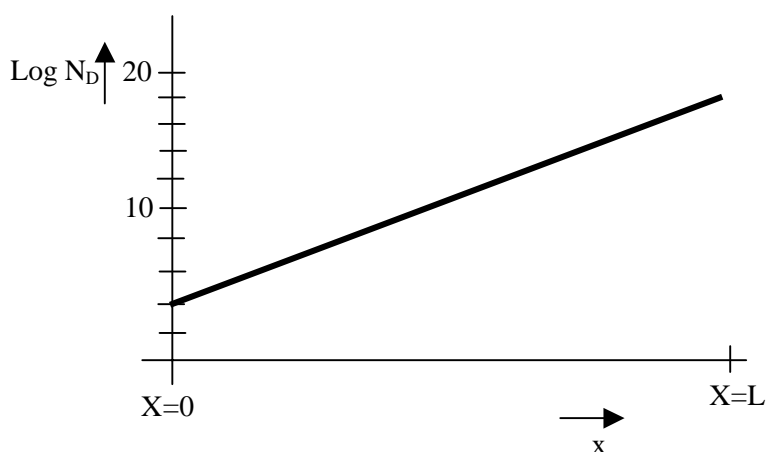
$$C_{GD} = C_{ox} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \left( \frac{V_{GS} - V_T}{2(V_{GS} - V_T) - V_{DS}} \right)^2 \right\} + C'_{GD} W$$

Small signal model

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

## 1 HALFGELEIDER FYSICA

a) Gegeven is het volgende doteringsprofiel in een blokje silicium met lengte  $L$ :



Teken in het zelfde assenstelsel de gaten- en elektronenconcentratie bij kamertemperatuur, waarbij aangenomen mag worden dat  $n_i^2 = 10^{20} \text{ cm}^{-6}$ . Verklaar je grafieken.

b) Van het zelfde blokje wordt nu gevraagd de positie van het Fermi niveau te tekenen als functie van  $x$  in een energiebanden plaatje. Bepaal de waarde van  $E_F - E_{Fi}$  op  $x=0$  en  $x=L$ . Hoe zal de positie van het Fermi niveau veranderen als de temperatuur stijgt?

c) Teken nu de ruimteladingsdichtheid (space charge), kwalitatief, als functie van de plaats en verklaar je grafiek.

d) Teken nu de grafiek van het elektrisch veld dat mogelijk aanwezig is in het blokje en verklaar de curve. Bereken ook de grootte van het elektrisch veld op  $x=L$ .

e) Maak een grafiek van de ingebouwde potentiaal die mogelijk aanwezig is en bereken  $V(L) - V(0)$ . Verklaar de grafiek.

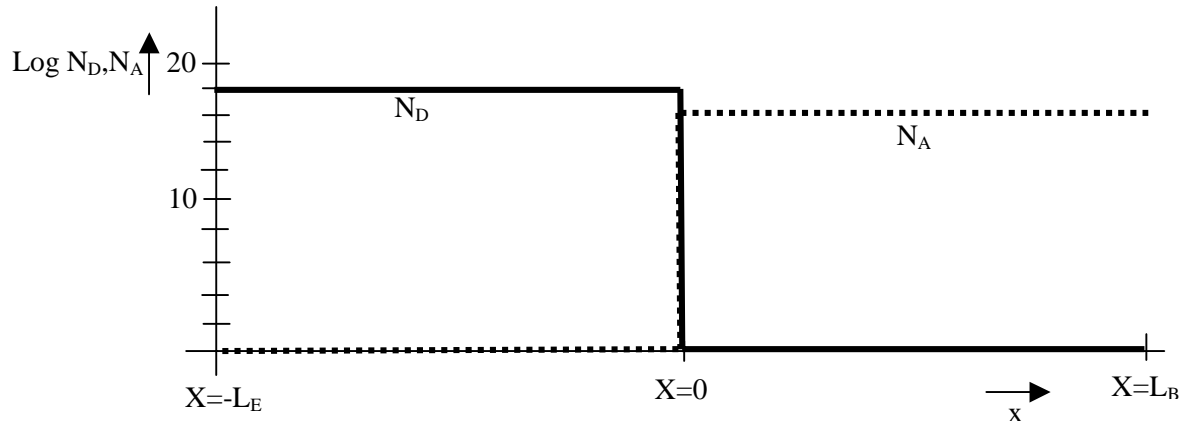
f) Waardoor wordt de levensduur van overmaatladingsdragers (excess carriers) bepaald in een silicium blokje als dit?

Waardering:

- a) 20
- b) 15
- c) 15
- d) 20
- e) 20
- f) 10

## 2 PN-OVERGANG

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



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?

Waardering:

- a) 25  
 b) 30  
 c) 20  
 d) 25

### 3 BIPOLAIRE TRANSISTOR

Beschouw een Si bipolaire npn junctietransistor. Omwille van de eenvoud beperken we ons tot de intrinsieke transistor, dwz de kristalkubus met en onder de emitter. Gekanteld en schematisch in een 2-dimensionale tekening levert dat de bekende schets uit fig. 1.

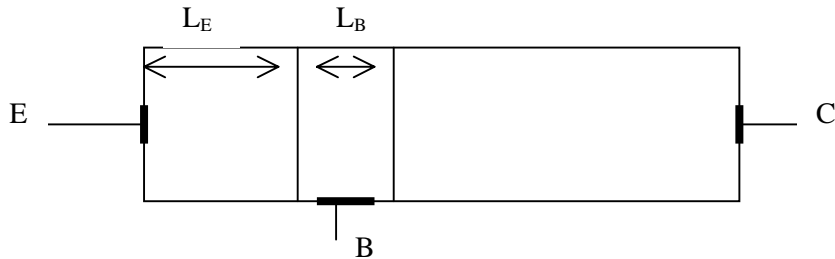


fig. 1.

- De doperings concentratie van de collector is  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  en van de emitter  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Voor de basis heeft u de keuze uit de dope elementen Fosfor (P) en Borium (B) en de dopeconcentraties  $N = 10^{17}$ ,  $N = 4 \cdot 10^{17}$  of  $N = 2 \cdot 10^{18}$ . Welk dope element is nodig voor de basis en welke dopering kiest u om een hoge stroomversterkingsfactor  $\beta$  te realiseren? Verklaar het antwoord.
- Bij een goed ontworpen transistor is de collectorstroom vrijwel gelijk aan de emitterstroom als de transistor in het voorwaarts actieve gebied is ingesteld. Deze stroom passeert dus het basisgebied. Beschrijf het ladingstransport door de basis (spanningsteken  $V_{BE}$ , resp.  $V_{CE}$  over de juncties, type ladingdragers, transportmechanisme). Hoe beïnvloeden  $V_{BE}$ , resp.  $V_{CE}$  deze stroom?
- Veronderstel dat recombinatie in de quasi-neutrale basis en emittergebieden en in de ruimteladingsgebieden verwaarloosd mag worden (korte basis en emitter). Gegeven is dat de emitterlengte twee maal de basislengte is. Bepaal nu de stroomversterkingsfactor  $\beta$ .
- Een eenvoudig dc klein-sigitaal vervangingscircuit is weergegeven in fig. 2.

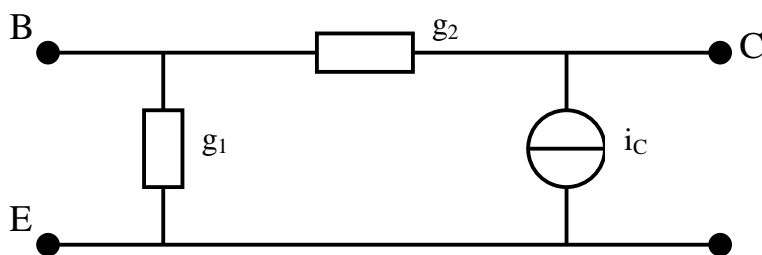


fig. 2.

Leid een uitdrukking af voor de elementen  $g_1$  en  $i_c$  en bepaal hun waarden bij de instelling  $I_C = 10 \mu\text{A}$

Waardering:

- a) 25    b) 25    c) 25    d) 25

#### 4. MOS TRANSISTOR

- a) Gegeven is een nMOS transistor met de volgende specificaties:
- $L=1\ \mu\text{m}$
  - Dotering in de bulk homogeen  $N_A=10^{16}\ \text{cm}^{-3}$  (neem kamertemperatuur aan met  $n_i^2=10^{20}\ \text{cm}^{-6}$ )
  - Oxide dikte  $0,05\ \mu\text{m}$

Bereken  $\phi_B$  ( $(E_F-E_{Fi})/q$  in de bulk). Neem aan dat  $V_{FB}$  (de vlakkeband spanning)  $0\ \text{V}$  is en bereken dan de drempelspanning van deze nMOS transistor (neem aan dat  $V_{SB}=0\ \text{V}$ ).

- b) De transistor van a) wordt gebiased met  $V_{GB}=3\ \text{V}$ . Geef aan in welke werkingsgebieden de MOS werkt wanneer  $V_{DS}$  verandert van  $0,1\ \text{V}$  tot  $5\ \text{V}$  en geef aan voor welke  $V_{DS}$  de overgang(en) precies plaatsvinden (neem indien nodig  $V_{T0}=1\ \text{V}$ ).
- c) De transistor van a) wordt nu gebiased met  $V_{DS}=2\ \text{V}$ . Geef nu aan in welke werkingsgebieden de nMOS werkt wanneer nu  $V_{GB}$  verandert van  $0\ \text{V}$  tot  $5\ \text{V}$  en geef aan voor welke  $V_{GB}$  de overgang(en) precies plaatsvinden (neem weer indien nodig  $V_{T0}=1\ \text{V}$ ).
- d) Geef een grootsignaal vervangschema van een MOS transistor en geef hierbij aan welke capacitieve effecten van belang zijn in de verschillende werkingsgebieden van opgave c)

Waardering:

- 30
- 20
- 30
- 20



Uitwerking tentamen **Halfgeleiderdevices dd 1-12-2000.**

Opgave 1 **Halfgeleiderfysica**

Opg. 1a.

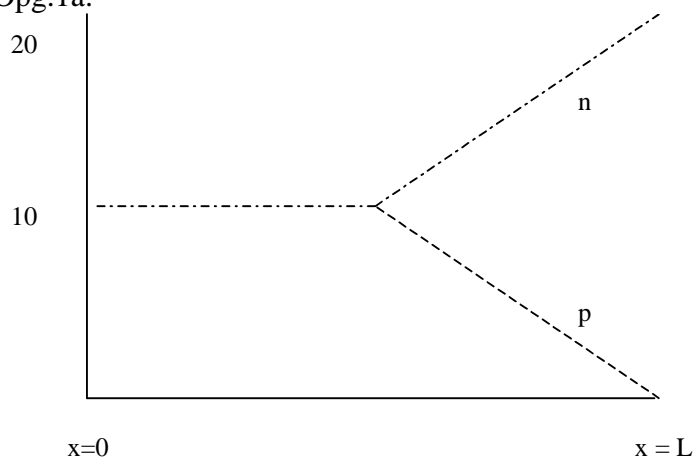


Fig.1

Bij kamertemperatuur zijn alle donoratomen geïoniseerd. Voor

$$N_D > n_i \text{ geldt dan } n \approx N_D, \text{ verder geldt } np = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Voor dosering lager dan  $n_i$  gedraagt het materiaal zich intrinsiek.

Opg. 1b.

De ligging van het Fermi niveau wordt bepaald door:

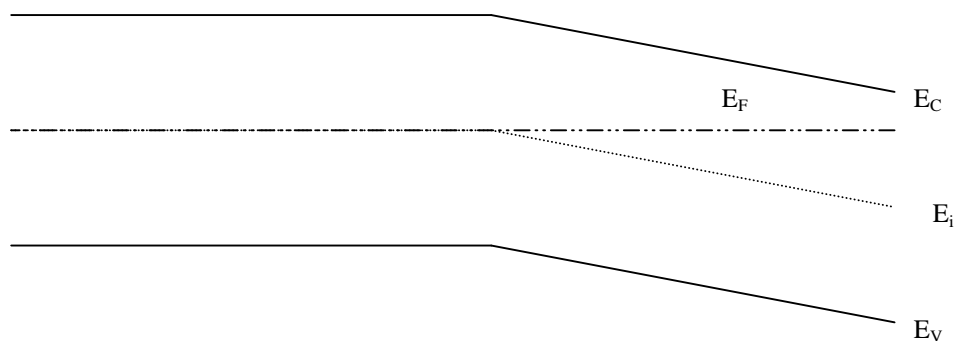
$$n = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right) \rightarrow (E_F - E_{Fi}) = kT \cdot \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \text{ eV}$$

$$(E_F - E_{Fi})_{x=0} = 0 \rightarrow (E_F - E_{Fi})_{x=L} = kT \cdot \ln\left(\frac{10^{18}}{10^{10}}\right) = 0,025 \times 8 \ln 10 = 0,2 \times 2,3 = 0,46 \text{ eV}$$

In thermisch evenwicht is het Fermi-niveau vlak.

Het banden schema ziet er dan als volgt uit.

Fig.



Opg.1c.

Ten gevolge van diffusie vloeien elektronen naar gebieden met lagere donor concentratie, daarbij een positieve ruimtelading van geioniseerde donoratomen achterlatend. Gaten diffunderen naar gebieden met hogere donorconcentratie. Ruimtelading is daar aanwezig waar  $N_D^+ + p - n \neq 0$ . Dit process wordt gecompenseerd door drift t.g.v. het elektrisch veld dat ontstaat t.g.v. ruimtelading. Uit de evenwichtsituatie is de volgende gelijkheid te destilleren

$$0 = j_n = q \cdot n(x) \cdot \mu_n \cdot \mathcal{E}(x) + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \quad (1)$$

Uit fig 1a weten we :

$$\frac{\partial \log n(x)}{\partial x} = \frac{14}{L}$$

$$\frac{\partial \log n(x)}{\partial x} = \frac{1}{n(x)} \frac{dn}{dx} \rightarrow \frac{dn}{dx} = \frac{14}{L} \cdot n(x)$$

Dus (1):  $\rightarrow q \cdot n(x) \cdot \mu_n \cdot \mathcal{E}(x) = -q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$

$$n(x) \cdot \mu_n \cdot \mathcal{E}(x) = -D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$n(x) \mu_n \cdot \mathcal{E}(x) = -D_n \cdot \frac{14}{L} n(x)$$

$$\mu_n \cdot \mathcal{E}(x) = -D_n \cdot \frac{14}{L}$$

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{D_n}{\mu_n} \cdot \frac{14}{L}$$

$$\mathcal{E}(x) = -V_{th} \cdot \frac{14}{L}$$

Bijvoorbeeld als  $L=1 \text{ mm} = 0,1 \text{ cm} \rightarrow \mathcal{E}(x) = -0,35 \frac{1}{L} \text{ V/cm}$

Het elektrische veld is dus constant voor  $N_D(x) > x$ :

De ruimtelading volgt met de wet van Poisson:

$$\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s}$$

De ruimtelading is dus uiterst gering waar het veld constant is. De ruimtelading zal aanwezig zijn waar het veld verandert. Dit moet op de rand van het intrinsieke gebied zijn en de tegenlading zal zich dan op het grensvlak (einde kristal) aan de hooggedoteerde kant moeten bevinden.

Fig.



Opg.1d.

Uit het voorgaande blijkt de volgende plot voor het elektrisch veld.

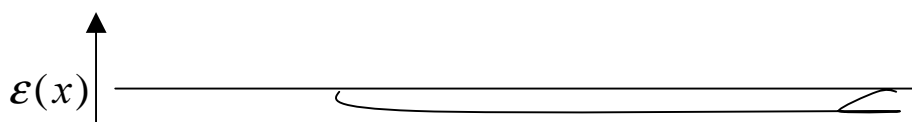


Fig.

Opg.1e.

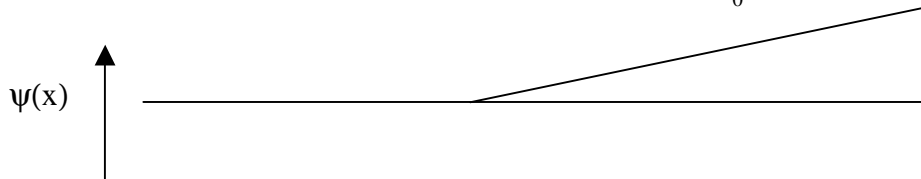
De sterkte van het veld is al uitgerekend onder c:

$$\mathcal{E}(x) = -V_{th} \cdot \frac{14}{L} \text{ V/cm}$$

( Eventueel kan ook geredeneerd worden dat op  $x = L$  het veld weer tot nul gereduceerd is door de scherpe ruimteladingspiek op de rand  $x = L$ )

Opg 1.e)

Weer met behulp van de wet van Poisson geldt:  $V(x) = -\int_0^x \mathcal{E}(x) dx$



N.B. De interne potentiaal  $\psi(x)$  is ook meteen te herleiden uit de plot voor de Fermi energie met  $\psi(x) = (E_F - E_i(x))/q$  en dan kan m.b.v. de wet van Poisson het elektrisch veld en de ruimtelading in omgekeerde volgorde worden afgeleid.

### Opgave 2, PN-overgang.

Op de junctie ontstaat een ruimteladingslaag.

Bij een voorwaartse spanning worden de concentraties van een minderheidslading dragers op de rand van de junctie met een factor  $\exp(qV_A/kT)$  vermenigvuldigd. Voor  $V_A=0,7V$  is deze factor  $\exp(0,7/0,025)=\exp(28)=1,4 \cdot 10^{12}$  (Vuistregel: 60 mV per decade)

De ingebouwde junctie potentiaal voor deze junctie is:

$$\phi_{bi} = V_{th} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = 0,025 \ln \frac{10^{34}}{2 \cdot 10^{20}} = 0,025 \ln 5 \cdot 10^{13} = \frac{31,54}{40} = 0,79$$

In de onderstaande figuur is de ruimteladingsdikte vergroot weergegeven.

Bij evenwicht is de minderheidsladingdragersconcentratie in de quasi-neutrale gebieden gelijk aan de evenwichtsconcentratie resp.  $p_{n0}=20$  en  $n_{p0}=2000$ .

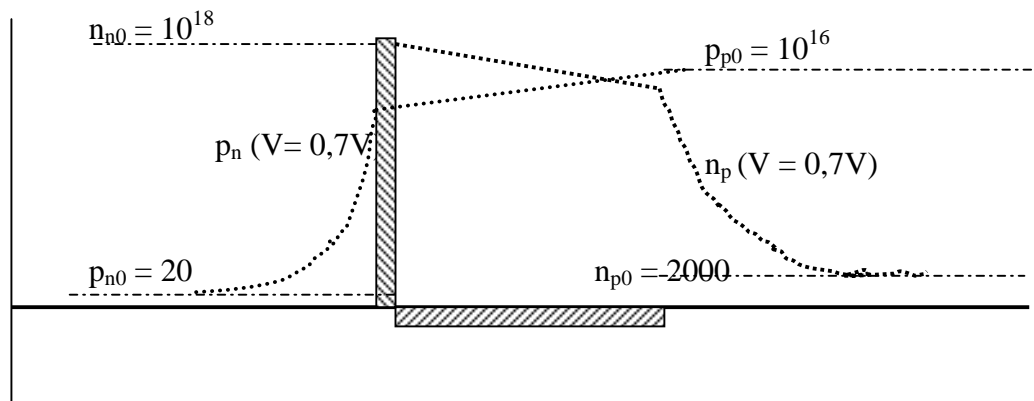
Bij  $V_A=0,7$  worden deze concentraties op de grens van de ruimtelading gebieden vermenigvuldigd met de  $\exp(qV_A/kT)=1,4 \cdot 10^{12}$  terwijl de concentraties op een afstand van enkele malen de diffusieweglengte van de ruimteladingslaag op de evenwichtswaarde terecht komt (tengevolge van recombinatie). Bij de lange emitter en basislengtes  $L_E \gg L_n$  en  $L_B \gg L_p$  vindt diffusie en recombinatie in de quasi-neutrale gebieden plaats. Op de contacten wordt de stroom vrijwel uitsluitend verzorgd door de meerderheidsladingdragers.

Op de randen van de ruimteladingslaag geldt:

$$j_n = q \cdot D_n \cdot \frac{dn_p}{dx} = q \cdot D_n \cdot \frac{n_{p0} \cdot \exp(qV_A / V_{th})}{L_n} \quad \text{in het p-type materiaal}$$

$$j_p = q \cdot D_p \cdot \frac{dp_n}{dx} = q \cdot D_p \cdot \frac{P_{n0} \cdot \exp(qV_A / V_{th})}{L_p} \quad \text{in het n-type materiaal}$$

Figuur:  
conc.  
ln n,p



Bij verwaarlozing van recombinatie in de ruimteladingslaag zijn de elektronen- en gatenstroomdichtheden over de junctie constant en geldt overall in de ruimteladingslaag:

$$\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \cdot \frac{L_p}{D_p p_{n0}} = 10 \cdot \frac{D_n L_p}{D_p L_n}$$

Op de contacten is de verhouding

$$\frac{j_n(x = -L_E)}{j_p(x = L_B)} = 1$$

omdat de stroom daar volledig door meerderheden verzorgd wordt. Uiteraard is de totale stroom aan de beide contacten gelijk.

Opg.2c.

Wanneer we door de junctie gelijke elektronen- en gatenstroom dichtheid willen hebben moet

de gaten-diffusiestroom in de emitter verhoogd worden met de factor  $100 \cdot \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \approx 300$

Dat kan door de concentratiegradient  $\frac{dp}{dx}$  op de grens van de ruimtelading aan de emitterkant

met een factor 300 te vergroten. Dan moet  $L_E$ , gemeten over het quasi-neutrale gebied, in de orde van  $0,003 L_N$  gekozen worden. Dan wordt de recombinatie op het contact geconcentreerd en de concentratie op de nieuwe afstand  $L_E$  wordt daarmee op de evenwichtsconcentratie gebracht. We forceren dus de gradient van de gatenconcentratie in de emitter op een factor 300 hoger door de afstand waarover het concentratieverval optreedt te verkleinen.

Opg 2d.

Depletiecapaciteit

$$C_{dep} = dQ_{dep}/dV_A = -qd (N_A x_{dp} + (\text{te verwaarlozen dikte ruimtelading in n-gebied})N_D)/dV.$$

Dus bij benadering is de depletiecapaciteit :  $C_{dep} \approx -qN_A dW/dV_A$

Met W uit het formuleblad:  $dW/dV_A = -\left(\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \frac{1}{2(\phi_{bi} - V_A)}\right)^{1/2}$

$$C_{dep} = \left(q\epsilon_s \frac{N_A(N_A + N_D)}{N_D} \frac{1}{(\phi_{bi} - V_A)}\right)^{1/2} \cong \left(q\epsilon_s N_A \frac{1}{(\phi_{bi} - V_A)}\right)^{1/2}$$

$$C_{dep} \cong \left(1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-12} \cdot 10^{16} \frac{1}{0,09}\right)^{1/2} = 1.3 \cdot 10^{-7} F \cdot cm^{-2}$$

De ladingsdichtheid van het positieve ruimteladingsgebied in het n-gebied is 100 maal de ladingsdichtheid van het negatieve ruimteladingsgebied in het p-gebied. (zie figuur).

De diffusiecapaciteit is conform formuleblad:  $C_{diff} \approx \frac{\tau}{V_{th}} j = \frac{\tau}{0.025} j$

De levensduur  $\tau$  is niet gegeven (fout in de opgave!). Afschatting met  $L_n = 10^{-3} cm$

$$\tau = \frac{L_n^2}{D_n} = \frac{10^{-6}}{30} = 3 \cdot 10^{-8} s$$

$$j \approx qn_i^2 \frac{1}{N_A} \frac{D_n}{L_p} \left(\exp^{V_A/V_{th}} - 1\right) = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{20} \frac{30}{10^{16} \cdot 10^{-4}} \left(\exp^{0.7/0.025}\right) = 1.4 \cdot 10^3 A \cdot cm^{-2}$$

dus

$$C_{diff} \approx \frac{\tau}{V_{th}} j = \frac{\tau}{0.025} j = \frac{3 \cdot 10^{-8}}{0.025} 1.4 \cdot 10^3 = 1.7 \cdot 10^{-3} F \cdot cm^{-2}$$

De lading van de diffusiecapaciteit bestaat uit positieve en negatieve ladingdragers met vrijwel gelijke concentratie in en rondom de ruimteladingslaag, vooral in het laagst gedoteerde gebied (waar de overmaat lading het grootst is).

We zien tevens dat de diffusiecapaciteit bij voorwaarts veel groter is dan de depletiecapaciteit.

*(Deze uitwerking is uit didactische overweging veel vollediger (en bewerkelijker) dan op het tentamen verlangd werd. De vraagstelling bleek onvoldoende begrensd.)*

Opgave 3. Bipolaire transistor

Opg. 3a.

Het is npn transistor, dus moet de basis p-type zijn. Doting moet met B geschieden.

Voor een hoge stroomversterking moet de verhouding elektronenstroom/gatenstroom

$$j_n/j_p \text{ groot zijn } \beta = j_n / j_p = N_{D,E} / N_{A,B} \text{ dus } N_{A,B} = 10^{17} cm^{-2}.$$

Opg.3b.

In voorwaarts actief is de Basis-Emitter overgang in voorwaarts en de Basis-Collector overgang in sper.

$$\text{Dus } V_{BE} \geq 0 \text{ en } V_{BC} \leq 0$$

In voorwaarts actief moet dus  $V_{CE} \geq V_{BE}$

Stroomtransport door de basis:

Tengevolge van de voorwaartse spanning over  $V_{BE}$  wordt de elektronen(minderheid) ladingsconcentratie in de basis, op de grens van de ruimtelading vergroot met de factor

$$\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right).$$

De concentratie van de elektronen in de basis op de rand van de depletie laag van de BC-junctie is gelijk aan  $n_{p0} \exp\frac{V_{BC}}{V_{th}}$ . Dit is een kleine waarde ( $V_{BC} \leq 0$ ).

In de basis vindt nu diffusie van elektronen plaats van de emitter kant naar de basis kant. De aanvoer van elektronen over de junctie vanuit de emitter zal zich aanpassen om de concentratie van elektronen op de rand van de ruimtelading te handhaven.

Alle aangevoerde diffusie elektronen (minderheidsladingdragers) aan de rand van de BC depletie laag worden voor deze gesperde junctie naar het collector gebied getransporteerd. De aangelegde voorwaartsspanning  $V_{BE}$  bepaalt d.m.v. de factor  $\exp(V_{BE}/V_{th})$ , sterk de gradient en daarna de diffusiestroom in de basis. De grootte van de sperspanning  $V_{CB}$  is nauwelijks of niet van invloed op de stroom door de basis.

Opg.3c.

$$\beta = \frac{j_n}{j_p} = \frac{qD_n n_{p0} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_{th}}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_{th}}} \right) / L_B}{qD_p p_{n0} \left( e^{\frac{V_{BC}}{V_{th}}} - 1 \right) / L_E} = \frac{D_n}{D_p} \cdot \frac{n_i^2}{N_{AB}} \cdot \frac{N_{DE}}{n_i^2} \cdot \frac{L_E}{L_B} = \frac{30}{10} \cdot \frac{5 \cdot 10^{18}}{10^{17}} \cdot \frac{2}{1} = 300$$

$$\text{of: } \beta = \frac{G_E}{G_B} = \frac{\frac{N_D L_E}{D_p}}{\frac{N_A L_B}{D_n}} = 300$$

Opg.3d.

$$g_i = \text{de basisconductantie} = \frac{dI_B}{dV_{BE}}$$

$i_c$  = de kleinsignaal uitgangsstroom =  $g v_{BE}$ , waarbij  $g = \frac{dI_c}{dV_{BE}}$  de steilheid of transconductantie

is.

$$g = \frac{dI_c}{dV_{BE}} = \frac{d(IS \cdot \exp(V_{BE}/V_{th}))}{d(V_{BE})} = \frac{1}{V_{th}} \cdot I_C = \frac{10^{-5}}{0,025} = 400 \mu A/V$$

$$i_c = g v_{be} = 4 \cdot 10^{-4} v_{be} \text{ A}$$

De ingangsconductantie is:

$$g_i = g/\beta = 4 \cdot 10^{-4} / 300 = 1,3 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}$$

## Opgave 4 MOS

Opg 4a

$$\Phi_B = \frac{E_F - E_{Fi}}{q} = kT \ln \frac{n}{n_i} = 0,025 \ln 10^6 = 0,35V$$

De drempelspanning volgt uit toepassing vna de formule uit het formuleblad:

$$V_T = 2\Phi_B + \frac{(2q\epsilon_S N_A \cdot 2\Phi_B)^{1/2}}{C_{ox}} = 0,7 + \frac{\sqrt{2,24 \cdot 10^{-15}}}{7 \cdot 10^{-8}} = 0,68 V$$

Opg. 4b

$$V_{GB} = 3 V, \quad V_{GB} - V_T = 2,32V,$$

De verzadigings spanning is  $V_{DS} = 2,32 V$ .

Voor  $0,1 V < V_{DS} < 2,32 V$  is de transistor in het lineaire gebied

Voor  $V_{DS} > 2,32 V$  is de MOST in verzadiging.

Opg 4c.

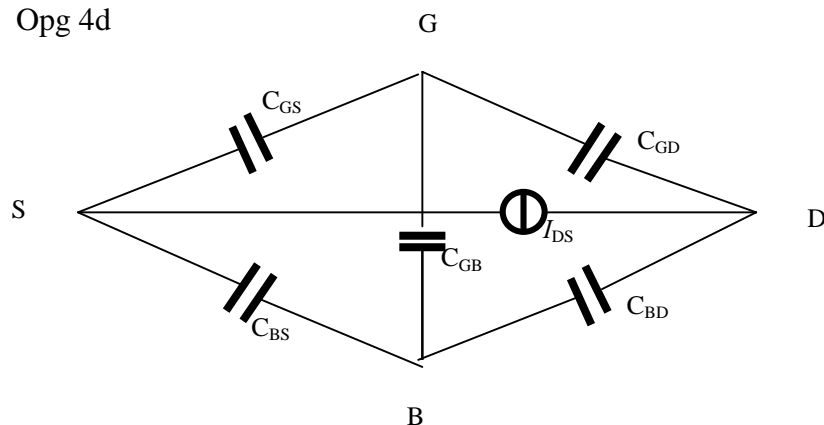
De gatespanning waarbij de transistor van het lineaire naar het verzadigingsgebied overgaat bij  $V_{DS} = 2 V$  is  $V_{GB} = V_{DS} + V_T = 2,68 V$ .

Dus voor  $0 < V_{GB} < 0,68$  is de transistor in depletie.

$0,68 < V_{GB} < 2,68 V$  is de transistor in verzadiging

voor  $V_{GB} > 2,68 V$  is de transistor in het lineaire gebied

Opg 4d



In het depletie regime zijn de capaciteiten:  $C_{GB}$ ,  $C_{SB}$  en  $C_{DB}$  van belang;  $I_{DS} = 0$

In het lineaire gebied zijn de capaciteiten:  $C_{GS} = C_{GD}$  en in mindere mate  $C_{SB}$  en  $C_{DB}$  van belang.  $I_{DS} \neq 0$ .

In het verzadigde regime is voornamelijk  $C_{GS}$  en in mindere mate  $C_{SB}$ ,  $C_{DB}$  en de overlapcapaciteit  $C_{GD}$  aan de orde.