

Kenmerk: 060.xxxx

Herhaaltentamen Halfgeleiderdevices (121706)

Datum: aug-2000

Tijd: 3,5 uur voor volledig tentamen*)

Plaats: XXXXXX

Dit tentamen omvat 4 onderdelen:

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

Studenten maken alle vraagstukken indien geen vrijstelling in de loop van het **huidige** studiejaar van onderdeel pn-overgang is verworven via WASP. 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, eventueel met verwerking van de resultaten van simulatieoefeningen. (details worden tijdens de cursus gegeven)

U wordt verzocht op uw tentamenformulier en tentamenbriefje aan te geven wanneer u voor onderdeel PN overgang gebruik maakt van de verworven vrijstelling.

*)Beschikbare tijd voor het tentamen:

Indien 3 vraagstukken worden gedaan: 3 uur

Indien 4 vraagstukken worden gedaan: 3,5 uur

Bijgeleverd: formule en constantenblad.

Succes met het tentamen!!

Docenten Halfgeleiderdevices

Constants and equation sheet Semiconductor Devices en Semiconductor Physics

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

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

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

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)

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

Capacitances in MOS

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

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

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

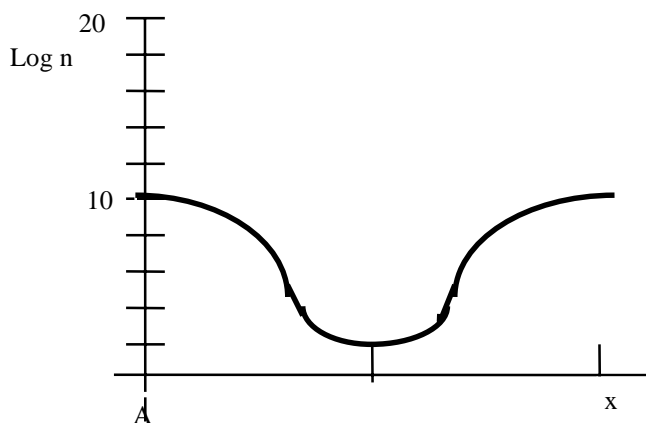
Small signal model

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

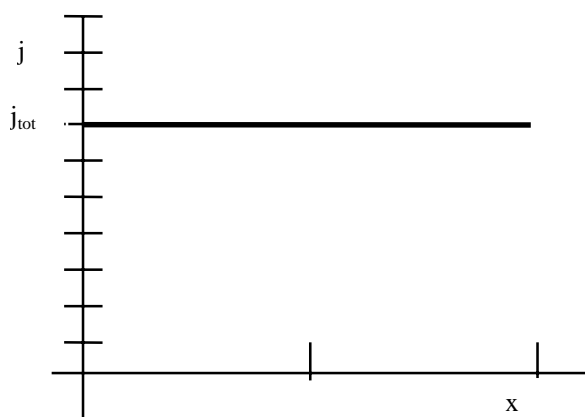
Voorbeeld tentamen Halfgeleiderdevices, d.d. aug-2000

Vraagstuk 1; Halfgeleiderfysica

- a) In de onderstaande figuur is een schets gegeven van de minderheids ladingsdragers concentratie als functie van positie in een Si kristal. Bij de temperatuur T_0 (kamertemperatuur) is $n_i^2 = 10^{20} \text{ cm}^{-6}$. Schets zo nauwkeurig mogelijk de meerderheids ladingsdragers concentratie en de doteringsatoom concentratie in dezelfde grafiek. Maak ook een grafiek van het Fermi niveau in een energiebandenplaatje. Verklaar kort de curves.



- b) De temperatuur wordt verhoogd zodat $n_i^2 = 10^{24} \text{ cm}^{-6}$. Schets zo nauwkeurig mogelijk de curve van de minderheidsladingsdragers en verklaar de verschillen t.o.v. vraag a).
- c) Schets de ruimteladingsdichtheid als functie van de plaats en daaronder het ingebouwde elektrische veld. Verklaar weer kort de curves.
- d) Het kristal wordt in een geleidende kring opgenomen en er wordt een extern elektrisch veld aangelegd waardoor er een stroomdichtheid, j_{tot} ontstaat. Schets in onderstaande grafiek de elektronen component, j_n , en de gaten component, j_p , van j_{tot} . Verklaar de curves. (Neem aan dat $\mu_n = 3\mu_p$.)



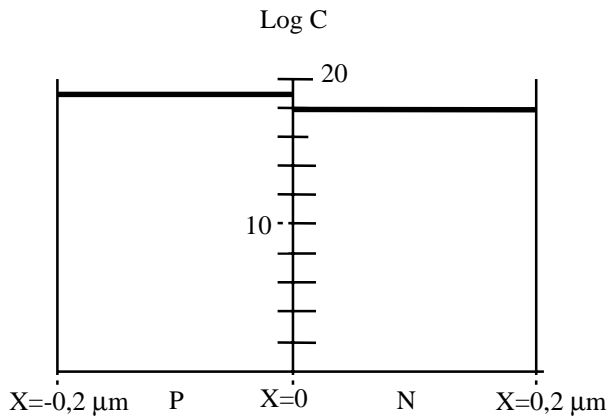
- e) Aan het zijvlak A worden continue extra elektronen geïnjecteerd. Dit leidt tot een elektronenconcentratie aan A van $n(A) = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ (bij T_0). Hoe zou het verloop van $n(x)$ kunnen zijn in dit denkbeeldige experiment?
- f) Verklaar waarom in de praktijk in silicium de levensduur van minderheidsladingsdragers nauwelijks afhangt van de dotering (mits de dotering niet al te hoog wordt).

Waardering

- a) 20 punten; b) 15 punten; c) 15 punten; d) 20 punten; e) 15 punten; f) 15 punten

Vraagstuk 2, PN overgang

a) Gegeven is een pn-overgang met onderstaande doterings details en afmeting ($n_i^2=10^{20} \text{ cm}^{-6}$):



Schets de ladingsdragers concentraties, ruimteladingsdichtheid, ingebouwd elektrisch veld en ingebouwde potentiaal, wanneer de diode in evenwicht is. Verklaar kort de grafieken.

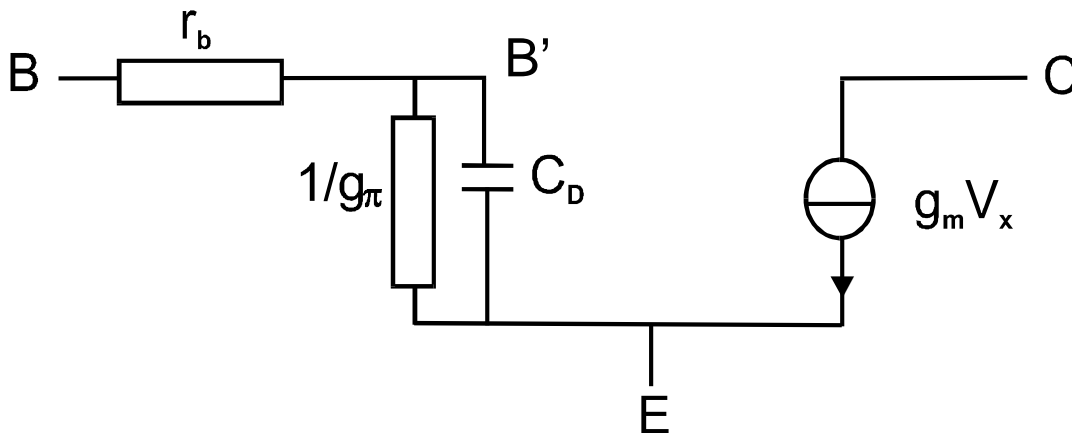
- Er wordt een voorwaartsspanning aangelegd van 0,7 V. Teken zo nauwkeurig mogelijk de elektronen en gaten concentraties. Verklaar de curves.
- Waar treedt in deze diode bij deze voorwaartsspanning de grootste recombinatie op? Waarom?
- Bereken de elektronen- en gatenstroomdichtheid aan de grenzen van de depletielaag en teken beide stroomdichtheden als functie van de plaats in de diode. Verklaar de curves.
- Bereken de diffusiecapaciteit van deze diode bij deze spanning. Schets het verloop van de waarde van de depletie- en diffusiecapaciteit wanneer de junctiespanning varieert van -5 V tegenspanning tot 0,7 V voorwaarts. Verklaar de grafiek.

Waardering;

- 20 punten
- 20 punten
- 20 punten
- 20 punten
- 20 punten

Vraagstuk 3; BJT

In het onderstaand kleinsignaal vervangschema van een BJT is een basisweerstand r_b opgenomen.



Klein-signaal vervangingschema voor een BJT

- Voor welk werkingsgebied van de transistor geldt dit vervangschema ?
- Benoem de spanning V_x , die de uitgangsstroombron stuurt
(bijv $V_x = V_{BB'}$ of $V_x = V_{CE}$)
- Leid een verband af tussen de grootsignaal stroom I_c en de kleinsignaal parameter g_m .

Het volgende is verder gegeven :

$$r_b = 1 \text{ k}\Omega; \beta = 100 \text{ en } I_c = 2 \text{ mA.}$$

- Bereken de steilheid $\frac{\partial I_c}{\partial V_{BE}}$ van de transistor bij gegeven instelling.
- Met de capaciteit C_D wordt ladingsopslag gemodelleerd. Beschrijf welke lading(en) hier wordt(en) opgeslagen, hoe deze lading afhangt van de terminal spanningen en waar de lading zich in de actuele transistor bevindt.

Waardering:

- 20 punten
- 20 punten
- 20 punten
- 20 punten
- 20 punten

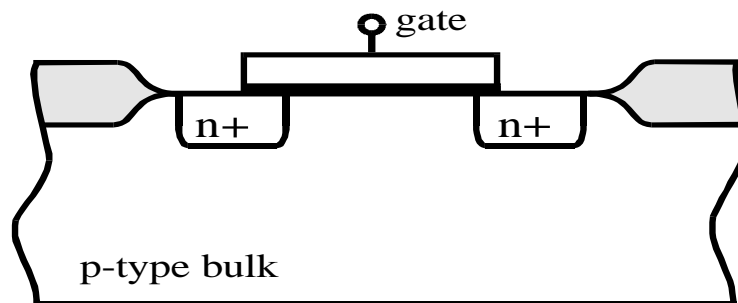
Vraagstuk 4; MOST

Beschouw een MOS transistor waarvan de volgende parameters bekend zijn:

vlakke banden spanning	$V_{FB} = -0.3 \text{ V}$
dikte gate-oxide	$t_{ox} = 50 \text{ nm}$
substraat dotering	$N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
electronen mobiliteit :	$\mu_e = 900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
gaten mobiliteit :	$\mu_h = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

MOST geometrie: kanaallengte $L = 10 \mu\text{m}$
kanaalbreedte $Z = W = ? \mu\text{m}$

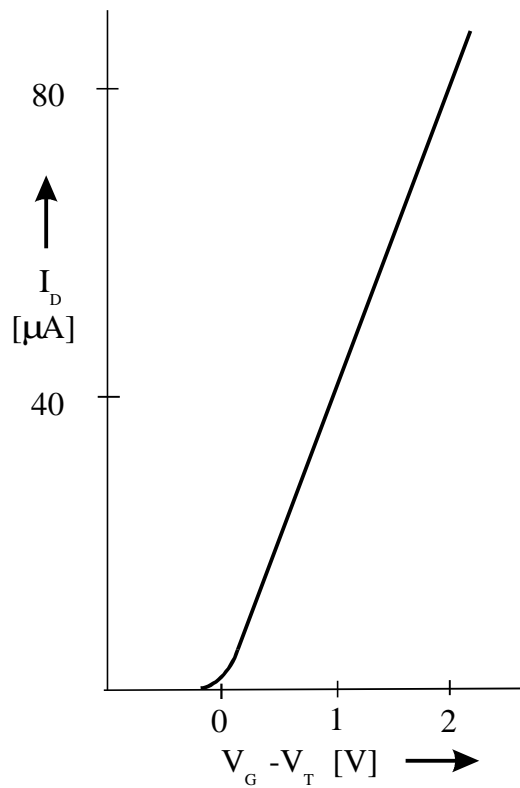
Een lengtedoorsnede van de transistor is gegeven in de volgende figuur:



Figuur1: Lengtedoorsnede MOS transistor

- Om wat voor type MOST (n-kanaal of p-kanaal) gaat het in figuur 1? Verklaar uw antwoord.
- Geef de definitie van de drempelspanning V_T en de vlakkeband spanning V_{FB} . Welke verschillende termen kunnen in V_{FB} verdisconteerd zijn ?
- Bereken de drempelspanning $V_T(V_{SB}=0)$; (laat vooral de gebruikte uitdrukkingen zien en voer het rekenwerk pas uit in de uw resterende tijd).
- Schets de energie bandenplaatjes (in termen van E_C, E_V, E_F en E_{Fi}) behorende bij de volgende situaties en benoem de verschillende toestanden waarin de MOST zich bevindt (gegeven: V_{DS} is erg klein)
 - $V_G = V_{FB}$
 - $V_G = 0.5 V_T$
 - $V_G = 2 V_T$

De I_D - V_G karakteristiek van de MOST wordt gemeten onder de volgende condities:
 $V_{DS}=0.1$ V en $V_{SB}=0$ V.



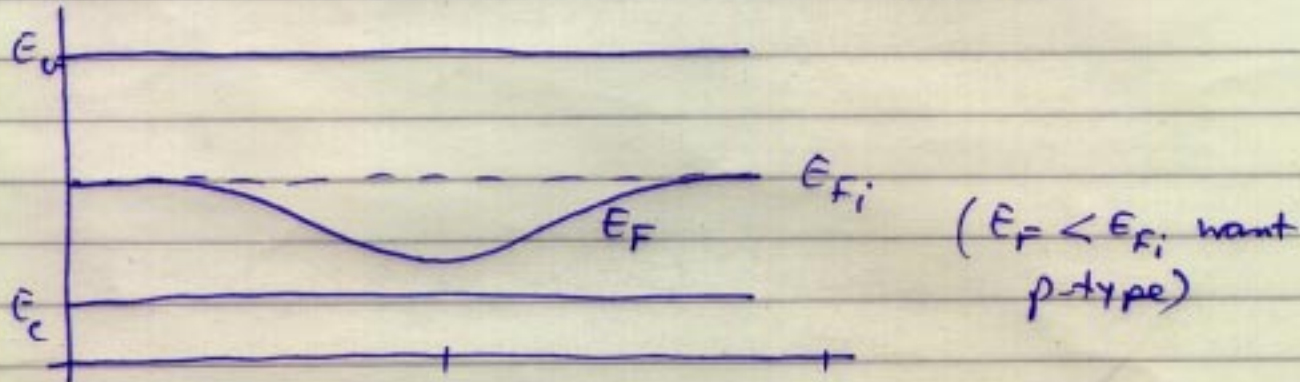
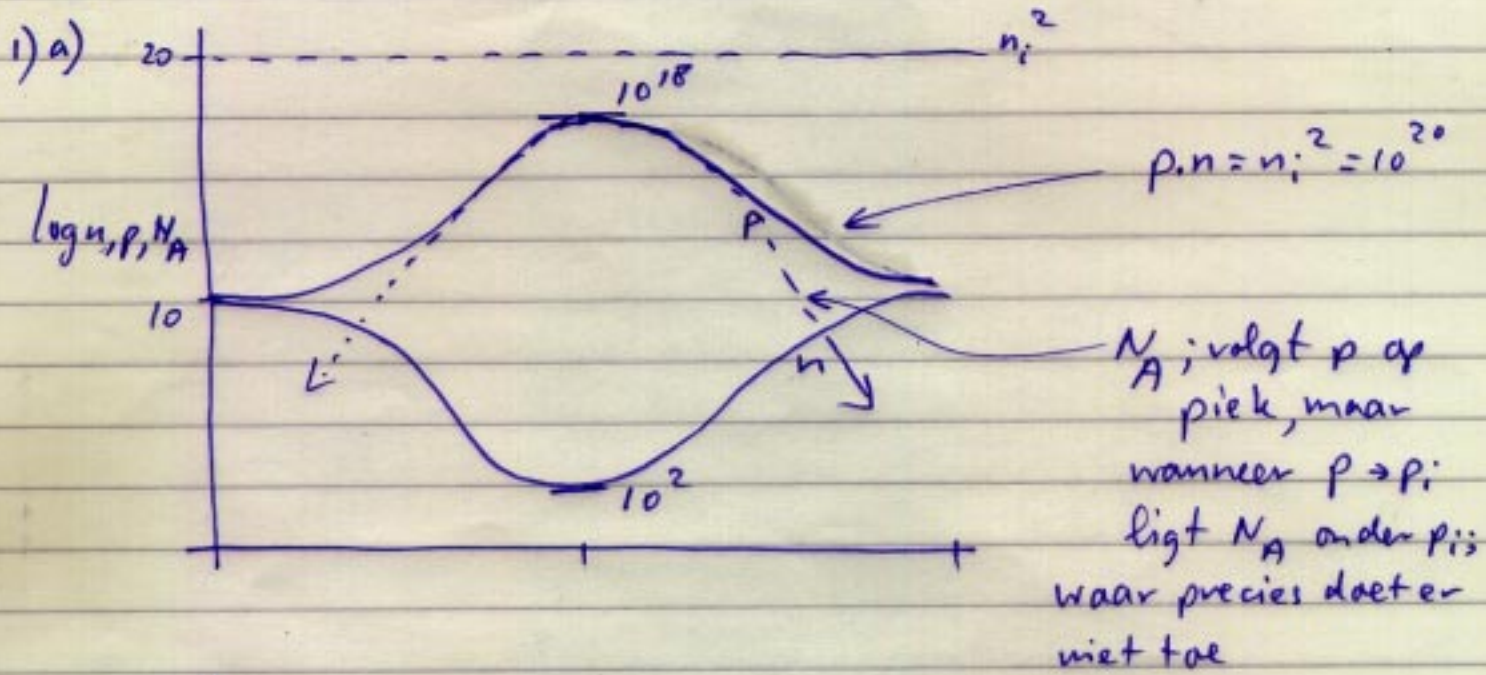
Figuur 1 : I_D - V_G karakteristiek, MOST

- e. Bepaal de ontbrekende geometrie parameter W van de MOST.
 Geef zo nauwkeurig mogelijk aan hoe u aan de oplossing komt.
- f. Bepaal de verzadigingsspanning $V_{D,sat}$ voor $V_{GB}= 3,0$ V

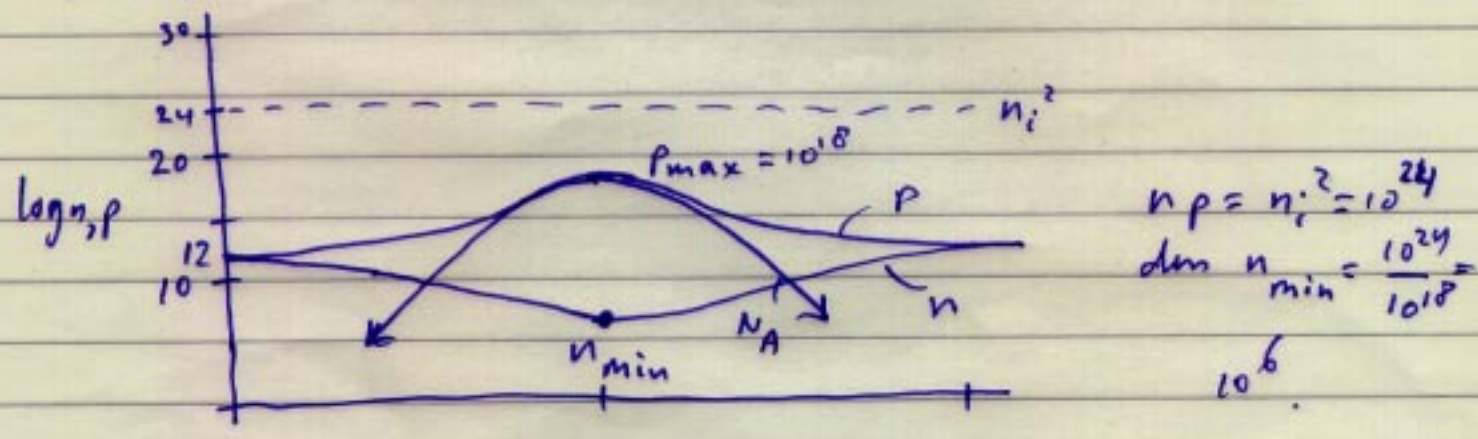
Waardering:

- a. 5 punten
- b. 15 punten
- c. 30 punten
- d. 25 punten
- e. 15 punten
- f. 10 punten

Antwoorden tentamen 10-1-2000

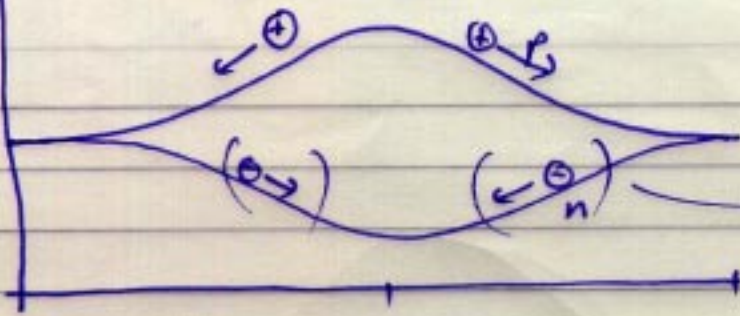


b) by $T \uparrow, n_i^2 \uparrow 10^{24}$



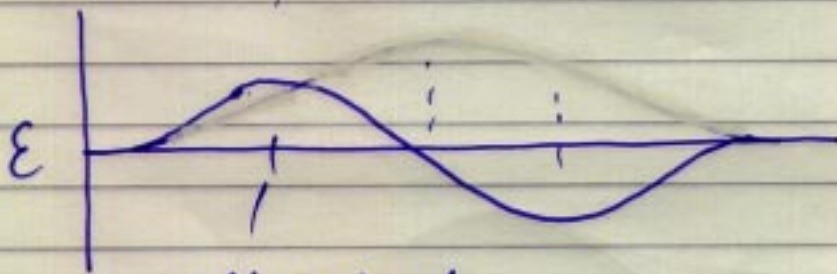
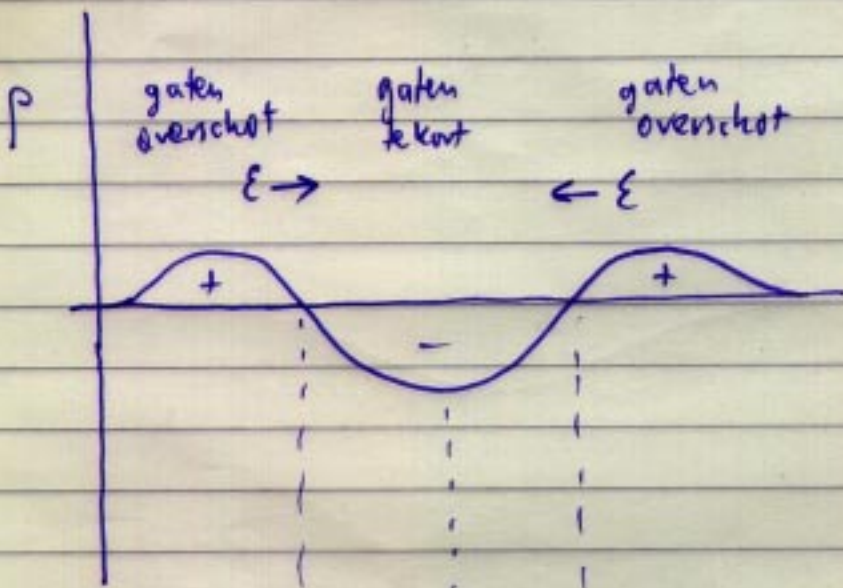
p_{max} blijft dus hetzelfde ; n_{min} neemt toe.

c) $\log \epsilon$

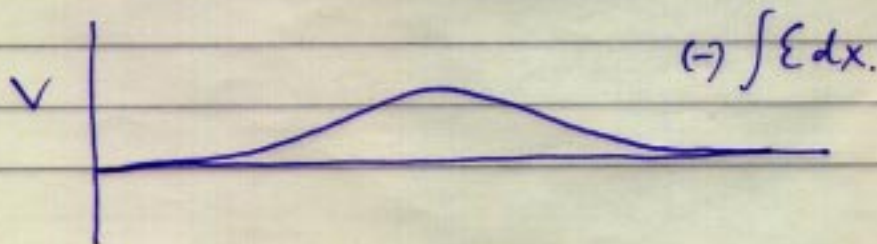


door kleine absolute waarde verwaarloosbaar

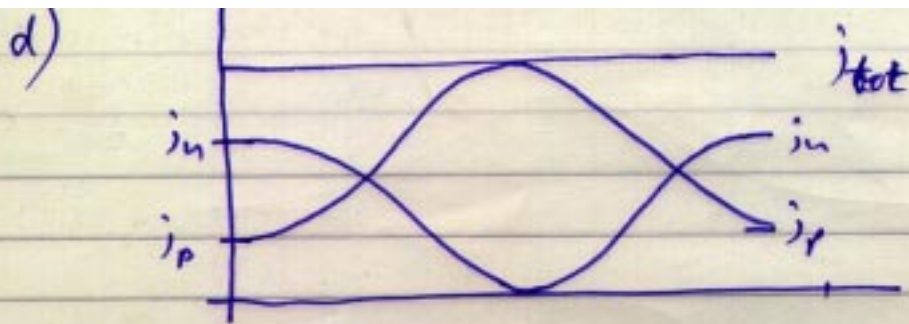
Er is een gradient in zowel n als p die tot diffusie leidt. Maar diffusie leidt tot ruimtelading en dus E . Dit veld duwt dus ladingstraggers weer terug: er ontstaat een evenwicht.



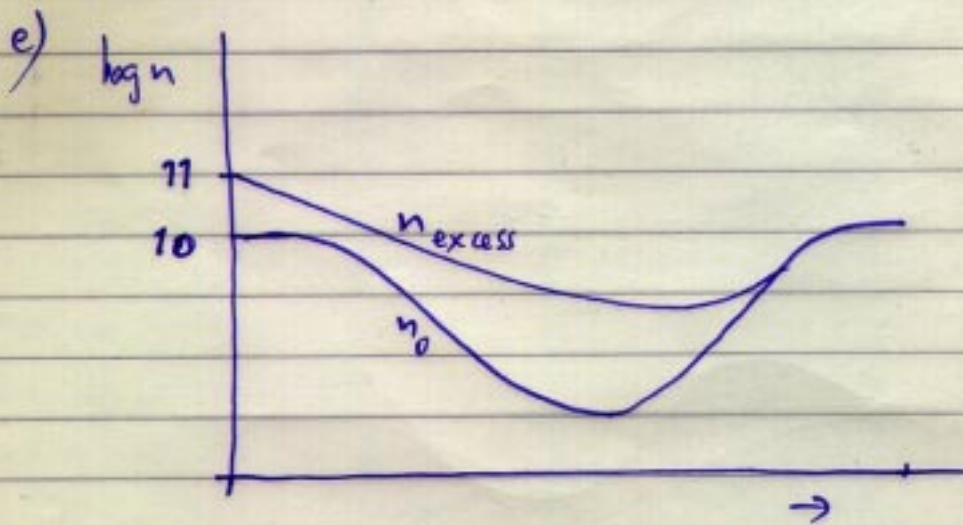
veld maximaal bij maximale scheiding p



$(\rightarrow) \int E dx.$



$i_n = 3i_p$ wanneer $n = p$.
 Wanneer $n \ll p$ dan zal bijna volledige stroom door gaten worden verzorgd.



Er is sprake van injectie van mindereheden. Voor $n_{\text{excess}}(x)$ moet de continuïteitsvergelijking worden opgelost. Dit levert exponentiële daling op (dan rechte lijn) tot evenwichtswaarde bereikt is ($na \sim L_e$)

f) Aantal 'traps' bepaalt \bar{i}

en 133

- 2 a) zie boek blz 115, met zelfde asymmetrie
b) zie boek blz ~~133~~ 133
c) aan de oppervlakten; volume in neutrale gebieden te klein.
d) blz 134, plaatje blz 130.
e) blz 162, blz 159

- 3 a) forward active
b) V_{BE} want 'verlies' over r_b staat niet over de junctie.
c) blz 241, 242
d)

$$\frac{1}{g_m} = \frac{I_B}{V_{th}} = \frac{I_c/100}{V_{th}} = 0,4 I_c$$

$$\frac{\partial I_c}{\partial V_{BE}} = \frac{\partial I_c}{\frac{1}{g_m} \partial V_{BE}} = \frac{\frac{1}{g_m} + r_b}{\frac{1}{g_m}} g_m$$

verder substitueren.

- e) blz 237, 238, C_D is diffusie cap. van E-B overgang.

- 4 a) n-kanaal
b) blz 266
c) V_{FB} gegeven. φ_p halen uit dotering (blz 37)
d) blz 266, alleen V_{FB} als offset toevoegen (blz 270).