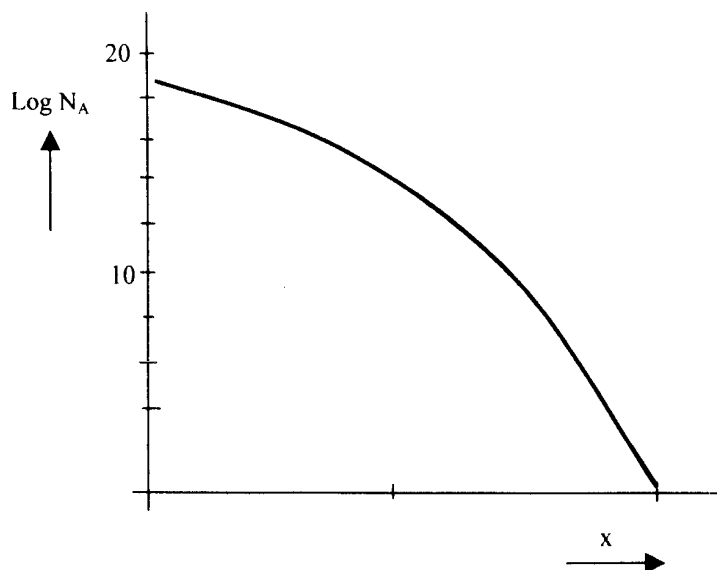


Vraagstuk 1: halfgeleiderfysica

- a) In een blokje silicium (kamer temperatuur, $E_g=1,1$ eV en $n_i^2 = 10^{20}$ cm⁻⁶) is een doteringsprofiel van Boor atomen aangebracht volgens onderstaande figuur:



- Schets, in één figuur, de elektronen en gatenconcentratie als functie van x en verklaar de grafiek.
- b) Schets in een energiebandenplaatje het verloop van het Fermi niveau als functie van plaats en verklaar weer de grafiek.
- c) De temperatuur wordt nu verhoogd. Schets weer de grafieken van elektronen- en gatenconcentratie en het Fermi niveau als functie van plaats en verklaar de veranderingen t.o.v. de grafieken bij kamertemperatuur.
- d) Verklaar of in dit blokje diffusiekrachten en/of drijfkrachten aanwezig zijn en hoe die op de ladingsdragers werken. Verklaar dit aan de hand van grafieken van ruimteladingsdichtheid en elektrisch veld als functie van de plaats.
- e) Indien in dit blokje een ingebouwd potentiaalverloop aanwezig is, schets dan het verloop ervan en verklaar de schets. Verklaar waarom een eventueel ingebouwd potentiaalverschil tussen linker en rechterkant nooit meer dan 0,55 V zal bedragen.
- f) Waardoor zal de levensduur van eventuele overmaat elektronen in dit blokje worden bepaald?

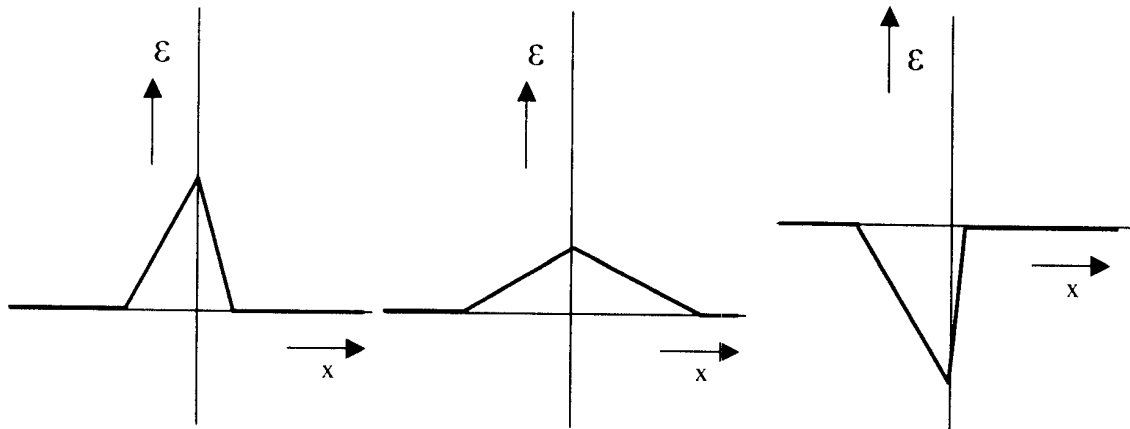
Waardering:

- a) 15 punten
 b) 15 punten
 c) 20 punten
 d) 30 punten
 e) 15 punten
 f) 5 punten

g)

Vraagstuk 2 PN-overgang

- a) Van een drietal pn-overgangen is, in de evenwichtssituatie, de vorm van het ingebouwde elektrisch veld geschetst in onderstaande grafieken:



Geef van elk van de drie overgangen een schets van de (logaritme van de) elektronen- en gatenconcentraties, daarbij aangevend wat het verschil tussen de drie overgangen is. Verklaar de verschillen.

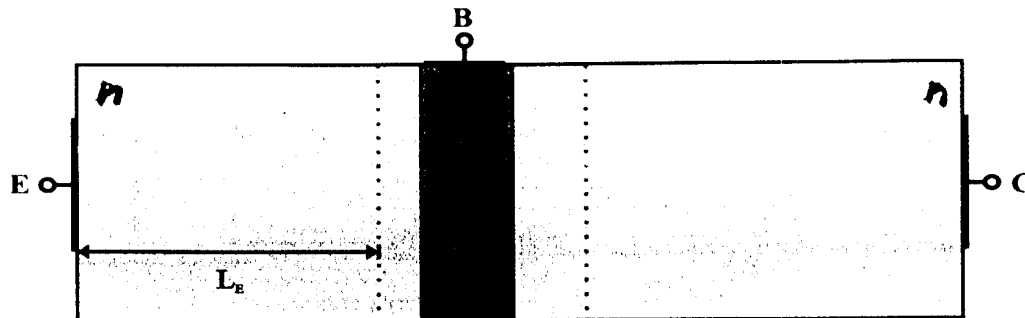
- b) Elk van de overgangen wordt nu op dezelfde voorwaartsspanning gezet. Welk van de drie zal de grootste voorwaartsstroom te zien geven? Waarom?
- c) Elk van de overgangen wordt nu getest op breakdown in de sperrichting. Welk van de diodes zal de laagste breakdown spanning hebben en waarom?
- d) Twee pn-overgangen worden gemaakt van homogeen gedoteerde materialen: n-type met $N_D=10^{19} \text{ cm}^{-3}$ en p-type met $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$, waarbij de ene diode $200 \mu\text{m}$ lang is en de andere $4 \mu\text{m}$ lang (de junctie zit precies halverwege de langte). Beide diodes worden op een voorwaartsspanning van $0,7 \text{ V}$ gezet. Bereken voor beide diodes de gaten en elektronenstroomdichtheden. (Gebruik formuleblad voor materiaalconstanten.)
- e) Bereken van beide diodes het hoogfrequent kleinsignaalvervangschema bij die instelling, wanneer de diode een oppervlak heeft van $100 \mu\text{m}^2$.

Waardering:

- a) 30 punten
 b) 10 punten
 c) 10 punten
 d) 25 punten
 e) 25 punten

a) Vraagstuk 3: Bipolaire Junctie Transistor (BJT)

Beschouw een npn transistor in actieve mode met homogene doteringen



Figuur 1 : npn transistor in actieve mode

In onderstaande tabel wordt de invloed van L_E ($L_E < L_p$) en N_B (dotering in de basis) aangegeven op belangrijke transistor parameters als I_B en I_C , de in- en uitgangsgoedheid g_π en g_o , de transconductantie g_m en de Early spanning V_A bij gegeven V_{BE} en V_{BC} , wanneer de transistor in het voorwaarts actieve gebied werkt.

- a) Geef aan hoe die parameters veranderen wanneer L_E en N_B één voor één worden verkleind. Licht je antwoord kort toe.

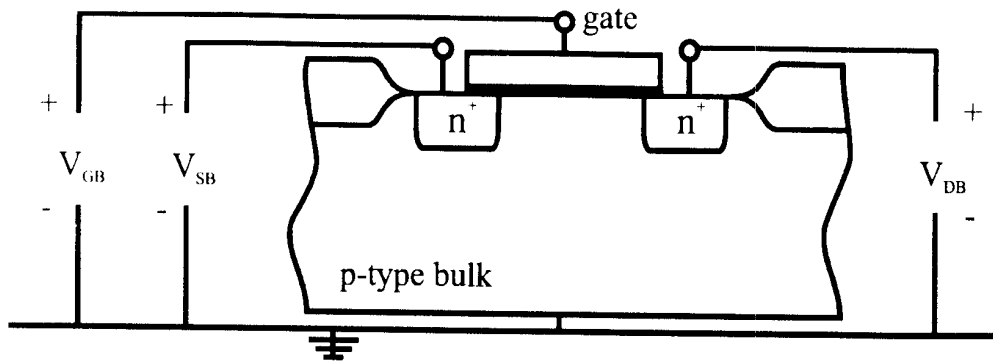
	I_B	I_C	g_π	g_o	g_m	V_A
$L_E \downarrow$						
$N_B \downarrow$						

- b) Schets de stroom-spanningskarakteristiek $I_C - V_{CE}$ voor $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ en $0 < V_{CE} < 10 \text{ V}$. Geef de verschillende werkgebieden die doorlopen worden aan en verklaar de grafiek.
- c) Bereken de steilheid (transconductantie) g_m van deze transistor als $V_{BE} = V_{CE} = 0,7 \text{ V}$, $N_B = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $L_B = 0,5 \mu\text{m}$ en het emitteroppervlak $100 \mu\text{m}^2$.
- d) Hoe groot is de steilheid van deze transistor wanneer hij in de reverse mode wordt bedreven en de als collector opererende emitter terminal een stroom voert van $I_C = 200 \mu\text{A}$?

Waardering:

- a) 40 punten
- b) 20 punten
- c) 20 punten
- d) 20 punten

Vraagstuk 4: MOST



Beschouw een n-kanaal MOST (figuur 1), waarvoor gegeven is :

$$V_{FB} = -0.7 \text{ V}, V_{T0} = 0.9 \text{ V}$$

- Beschrijf in maximaal 15 tekstregels wat er achtereenvolgens aan ladingsopbouw in het substraat onder de gate gebeurt wanneer de gatespanning $V_{GS} = V_{GB}$ opgevoerd wordt van 0 V tot 10 V ($V_{SB} = V_{DB} = 0 \text{ V}$). Additionele illustraties zijn welkom. Definieer (omschrijving of formule) de gatespanningen op de overgang van de onderscheidenlijke werkingsgebieden.
- Schets en beschrijf een eenvoudig DC vervangingsschema van de MOSTransistor in een stroomvoerend werkingsgebied naar keuze en benoem de daarin voorkomende elementen. (Vergeet niet het gekozen werkgebied te vermelden).
- Genereer uitdrukkingen voor de componenten in het laagfrequent klein-sigitaal vervangingsmodel voor het lineaire- en verzadigingsgebied ($V_{SB} = 0 \text{ V}$). Breid het klein-sigitaal vervangingsmodel uit tot een eenvoudig hoogfrequent AC model, benoem de toegevoegde componenten en beschrijf hun functie (welke aspecten worden met de betreffende componenten in het klein-sigitaal vervangingsmodel gemodelleerd)?
- Bepaal met behulp van het square-law model voor een MOSTransistor met de volgende gegevens:

$$V_{FB} = -0.7 \text{ V}$$

$$W = 20 \text{ } \mu\text{m}$$

$$V_{T0} = 0.9 \text{ V}$$

$$L = 1.0 \text{ } \mu\text{m}$$

$$C_{ox} = 3.4 \cdot 10^{-7} \text{ F/cm}^2$$

$$\mu_e = 900 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$$

- de drainstroom I_d voor $V_{SB} = 1 \text{ V}$, $V_{DB} = 4 \text{ V}$ en $V_{GB} = 2.5 \text{ V}$
- de steilheid (transconductantie) g_m bij bovenstaande instelling
- in welk gebied werkt deze transistor?

Waardering:

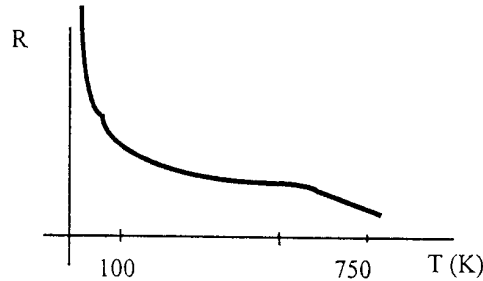
- 30 punten
- 10 punten
- 30 punten
- 30 punten

Deel halfgeleiderfysica en quantum mechanica.

Waardering 70% van het eindcijfer.
Gebruik Formuleblad toegestaan.

Opgave 1. Carrier Statistics (30 eenheden)

- a) Een blokje silicium is homogeen gedoteerd met 10^{16} fosfor atomen cm^{-3} . Hieronder is de weerstand van het blokje uitgezet als functie van de temperatuur. Er zijn duidelijk 3 trajecten aan te geven voor de weerstandsverandering. Verklaar de vorm van de grafiek in die 3 trajecten.



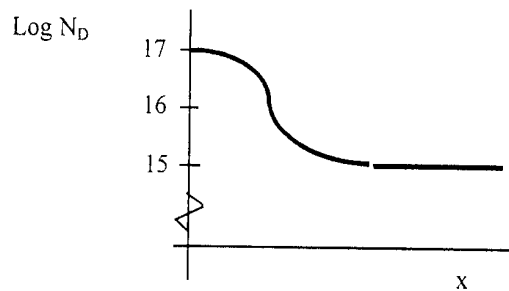
Dit blokje silicium wordt nu overgedoteerd met 10^{16} boor atomen cm^{-3} . Schets in dezelfde figuur (kopieer op het tentamenvel) nauwkeurig de weerstand van dit blokje als functie van temperatuur. Verklaar de verschillen in de 3 temperatuurgebieden.

Het zelfde blokje silicium (met fosfor) wordt nu extra gedoteerd met 10^{19} fosfor atomen cm^{-3} . Schets weer in dezelfde grafiek de weerstandscurve en verklaar gedetailleerd de verschillen.

- b) Schets voor de 3 gevallen uit a) de positie van het Fermi niveau t.o.v. valentie- en geleidingsband voor hetzelfde temperatuurgebied. Verklaar de curves en hun relatieve posities.

Bereken in het 2^e geval (fosfor overgedoteerd met boor) de elektronenconcentratie in de geleidingsband. Bereken ook de elektronenconcentratie ($1/\text{Jm}^3$) op energieniveaus kT en $2kT$ hoger dan de rand van de geleidingsband, E_C .

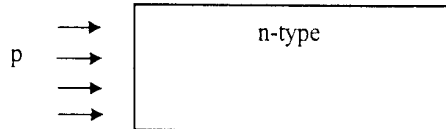
- c) Een niet homogeen gedoteerd blokje silicium heeft een doteringsverdeling als in de figuur. Schets het verloop van de elektronen- en gatenconcentratie en het Fermi niveau als functie van x door dit sample.



Schets ook de ruimteladingsverdeling en de vorm van het ingebouwde elektrische veld. Verklaar alle grafieken.

Opgave 2. Carrier dynamics (25 eenheden)

- a) Een blokje n-type silicium wordt, in een denkbeeldig experiment, aan de linker zijde continue geïnjecteerd met gaten. Dit leidt tot een constante overmaat concentratie aan gaten aan het linker grensvlak, maar gaten houden een relatief lagere concentratie dan elektronen. Het blokje is langer dan de diffusieweglengthe van gaten of elektronen. (Veronderstel voor het gemak dat aan de andere zijde elektronen worden toegevoerd zodat het totale blokje ladingsneutraal kan blijven.)

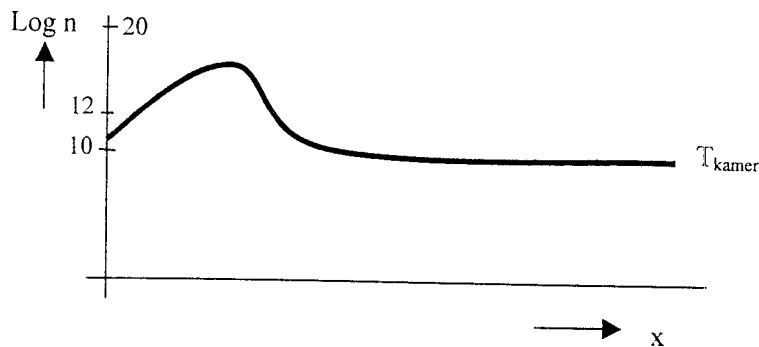


Leidt een formule af voor de gatenconcentratie als functie van positie.

- b) Beredeneer dat de elektronenconcentratie als functie van positie nagenoeg dezelfde vorm zal hebben als de gatenconcentratie.

Opgave 4 Statistiek ladingsdragers (25 eenheden)

Van een blokje silicium ($n_i^2 = 10^{20} \text{ cm}^{-6}$ op kamertemperatuur) blijkt de elektronenconcentratie te zijn als in onderstaande grafiek:



- Schets in dezelfde grafiek de elektronenconcentratie voor een lagere temperatuur en een hogere temperatuur. Verklaar je grafieken.
- Schets het bijbehorende doteringsprofiel en verklaar je grafiek.
- Maak een schets van het (extrinsieke) Fermi niveau t.o.v. valentie- en geleidingsband en verklaar de grafiek.
- Indien er sprake is van een ingebouwd elektrisch veld, schets deze en verklaar dit veld. In dat geval schets ook de ruimteladingsdichtheid en verklaar weer.

Opgave 5 Dynamisch gedrag ladingsdragers (25 eenheden)

- Over het blokje materiaal zoals beschreven in opgave 4, wordt een extern elektrisch veld aangelegd. Schets de driftsnelheid van de elektronen als functie van positie en verklaar de grafiek.
- Het blokje van opgave 4 is langer dan de diffusieweglengte van gaten. In een denkbeeldig experiment worden aan het linkervlak, continue, gaten geïnjecteerd, zodat de gatenconcentratie aan het oppervlak toeneemt tot 10^{13} cm^{-3} (veronderstel voor het gemak dat er aan de andere kant elektronen worden geïnjecteerd om een stationaire toestand te creëren). Leidt een uitdrukking af voor de gatenconcentratie als functie van plaats.
- Schets in het geval van b) de elektronenconcentratie en verklaar de grafiek.

Opgave 1. Bipolaire Junctie Transistor (BJT)

Gegeven is een npn transistor met doping concentraties N_{De} , N_{Ab} , N_{Dc} in emitter, basis en collector met basisbreedte, L_b , met constante biasing in de forward active mode, werkend op kamertemperatuur, T . Wanneer één parameter wordt veranderd, terwijl de andere onveranderd blijven, maak dan de onderstaande tabel compleet door aan te geven wat het effect zal zijn op de gegeven transistor eigenschappen. Als voorbeeld is het effect van het vergroten van T aangegeven op g_m . Geef per onderdeel kort aan waarom het effect zo is. Materiaalparameters, zoals μ , τ en $L_{n,p}$ kunnen als constant worden beschouwd.

	Effect op I_b	Effect op g_m	Effect op C_π (C_{be})
N_{De} neemt toe			
N_{Ab} neemt toe			
N_{Dc} neemt toe			
T neemt toe		neemt toe	
L_b neemt toe			

Opgave 2 (MOST)

In een oude lampenfabriek, waar men tracht dingen beter te maken, wordt in een wat verouderd CMOS proces de volgende NMOS transistor (transistor a) gerealiseerd:

$$t_{ox} = 100 \text{ nm}$$

$$V_{T0} = 1 \text{ V}$$

$$\mu_n = 800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$$

$$L = 10 \mu\text{m}$$

$$Z = W = ?$$

- Waar staat de afkorting CMOS voor? Schets een dwarsdoorsnede van een CMOS device en benoem de belangrijkste onderdelen.
- Bereken de gate-oxide capaciteit C_{ox} per cm^2 .
- Beschouw de NMOS transistor (transistor a). Schets de energie bandenplaatjes (in termen van E_c , E_v , E_f , E_{fn}) behorende bij de volgende situaties en benoem de verschillende toestanden waarin de MOST zich dan bevindt (gegeven V_{DS} erg klein):

$$V_G = V_{FB}$$

$$V_G = 0.5 \text{ V}$$

$$V_G = 2 \text{ V}$$

Tevens wordt de (laagfrequent) gate-bulk capaciteit C_{gb} gemeten bij $V_G = 0.5 \text{ V}$ en $V_G = 2 \text{ V}$. Het blijkt dat de gemeten waarde bij $V_G = 0.5 \text{ V}$ kleiner is dan bij $V_G = 2 \text{ V}$. Probeer hiervoor een verklaring te geven.

- Van MOS transistor a is de volgende karakteristiek opgemeten:

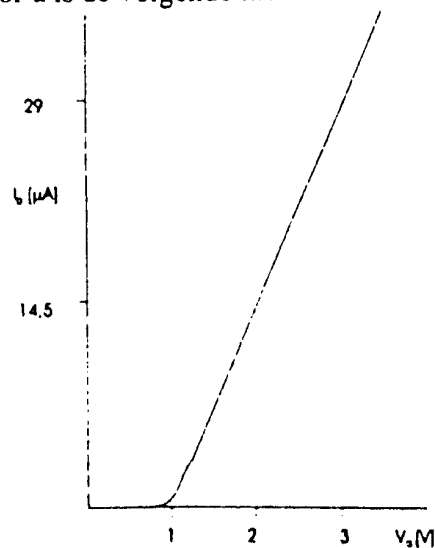


Fig 1: $I_D - V_G$ Karakteristiek transistor a

Bepaal de ontbrekende geometrie parameter W. Geef zo nauwkeurig mogelijk aan hoe u aan de oplossing komt.

- e. Vervolgens wordt in de fabriek, waar het in ieder geval gelukt is om dingen kleiner te maken, overgestapt op een geavanceerder CMOS proces, waarin MOS transistor b wordt gemaakt:

$$t_{ox} = 10 \text{ nm}$$

$$L = 1 \text{ } \mu\text{m}$$

$$Z = ?$$

$$V_{T0} = \text{zie grafiek}$$

Van deze transistor wordt de volgende karakteristiek opgemeten bij:

$$V_{SB} = 0\text{V}$$

$$V_{DS} = 0.25\text{V}$$

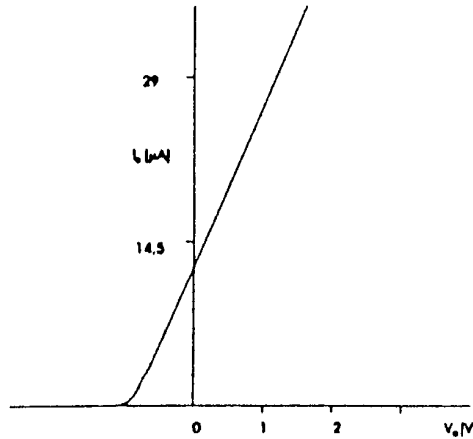


Fig 2: $I_D - V_G$ Karakteristiek transistor b

Hoe wordt dit type device genoemd? Waardoor wordt de verschuiving van de karakteristiek van transistor b t.o.v. de karakteristiek van transistor a veroorzaakt? Welke procestappen kunnen worden uitgevoerd om de verschuiving te compenseren? Verklaar uw antwoord.

- f. Vervolgens worden de veranderingen, welke door u in e) zijn voorgesteld ingevoerd in het proces. Transistor a en de nieuwe transistor b, nu uitgevoerd in het veranderde proces, worden gekarakteriseerd, wat resulteert in de volgende curves:

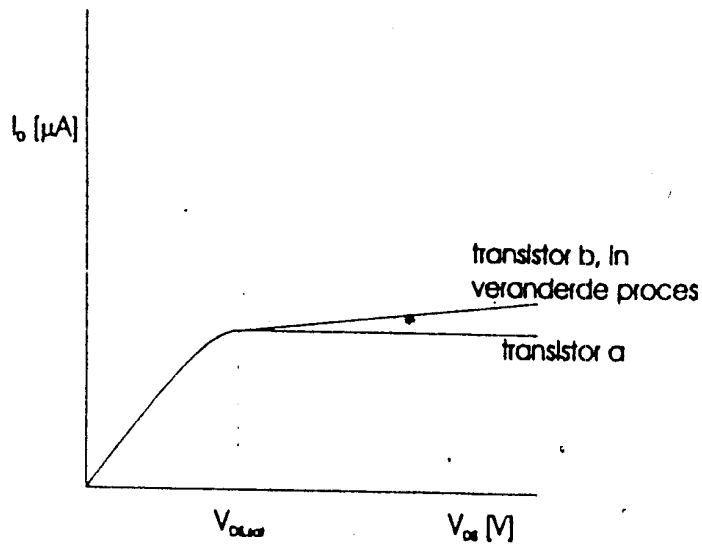


Fig 3: $I_D - V_D$ karakteristiek voor transistor a en b.

Bepaal de ontbrekende parameter Z van transistor b in het veranderde proces. Verklaar uw antwoord.

- g. Benoem en beschrijf het effect dat u in transistor b waarneemt. Verklaar uw antwoord.
- h. Tijdens een excursie aan de bovengenoemde fabriek, waar u met uw ouders (beide met middelbare school diploma) naar toe mag, wordt u gevraagd uw ouders zo simpel mogelijk (lieft in huis tuin en keuken taal) de werking van een willekeurig type MOS transistor uit te leggen. Probeer dit in max 10 zinnen zo duidelijk mogelijk te doen.

Opgave 3 (pn-junctie)

Beschouw twee type blokjes : p-type en n-type monokristallijn silicium (Fig 4).
Hoewel praktisch onuitvoerbaar, nemen we aan dat we de blokjes zo tegen elkaar kunnen drukken dat ze samen één geheel gaan vormen en wel zodanig dat het kristalrooster regelmatig doorloopt op het scheidingsvlak $x=0$.

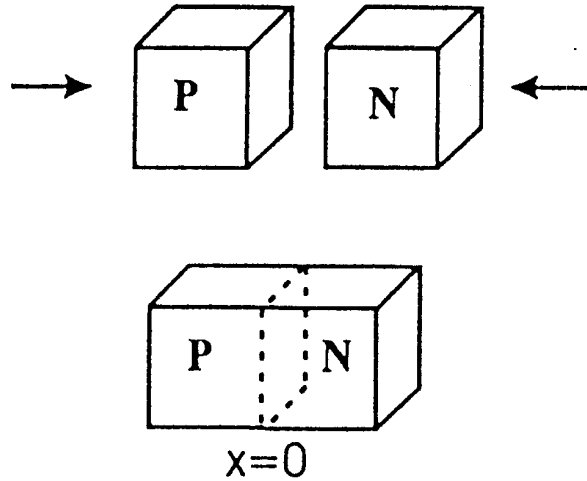


Fig 4: pn-diode

- a. Geef aan welke stromen er gaan lopen (inclusief de richting) op het moment van aanraken, verklaar uw antwoord.

Op deze manier worden twee verschillende typen ideale n^+p diodes gemaakt door verschillende doteringen te gebruiken:

type A : $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 $N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

type B : $N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
 $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Voor beide diodes geldt verder :

$$\tau_n = \tau_p = 10^{-8} \text{ s}$$
$$A = 10^{-4} \text{ cm}^2$$
$$T = 300 \text{ K}$$

- b. Schets voor één van de diodes het bandenplaatje in termen van E_C , E_V , E_F , E_{Fi} , x_{dp} , x_{dn} en V_{bi} .

- c. Bepaal de ingebouwde potentiaal V_{bi} en de verhouding x_{dr}/x_{dp} van de dikte van de ruimteladings gebieden in het n^+ en p gebied van beide diodes.

Vervolgens wordt een ideale stroommeter in serie met een weerstand van $R=800 \Omega$ aangesloten op de $n^+ p$ diode met de grootste ingebouwde potentiaal V_{bi} .

- d. Hoeveel vermogen wordt gedissipeerd in de weerstand R , verklaar uw antwoord.

- e1. Beide diodes worden nu in voorwaards gebiased met een spanning van $V_f = 0.7 \text{ V}$. Bepaal de verhouding van de capaciteiten van de beide diodes.

- e2. Vervolgens worden beide diodes in spergebied gebiased met een spanning van $V_r = -6.0 \text{ V}$. Bepaal opnieuw de capaciteitsverhouding van de beide diodes en verklaar het verschil met het antwoord gevonden in e1.

- f1. Door welke dotering in de $n^+ p$ diode wordt de doorslagspanning het meest beïnvloed? Verklaar uw antwoord.

- f2. Bereken vervolgens de doorslagspanning V_{br} van beide diodes indien gegeven is dat de kritische veldsterkte voor deze diodes $E_{br} = 6 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ bedraagt.

Vervolgens wordt van de $n^+ p$ (type A) de I_D als functie van V_D gemeten, hetgeen de volgende grafiek oplevert:

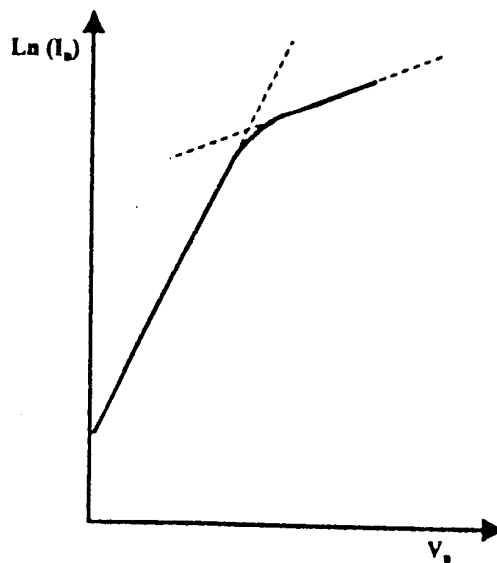
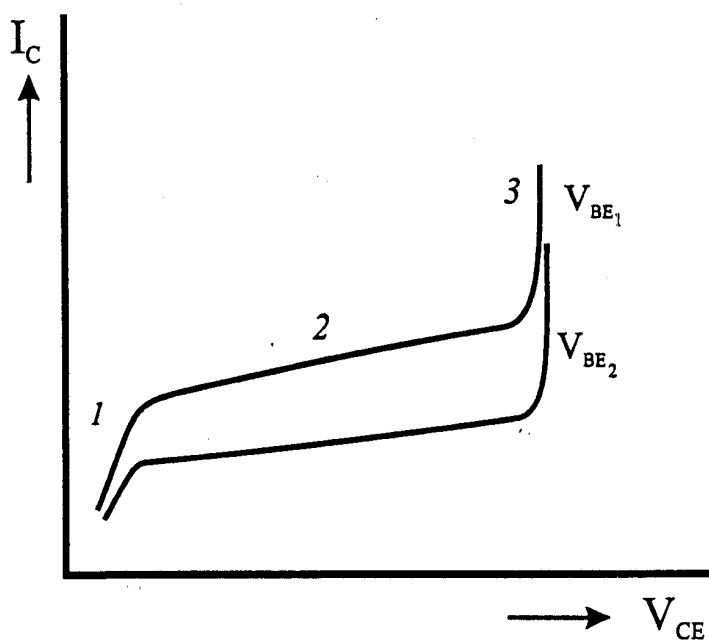


Fig 5: $I_D - V_D$ karakteristiek.

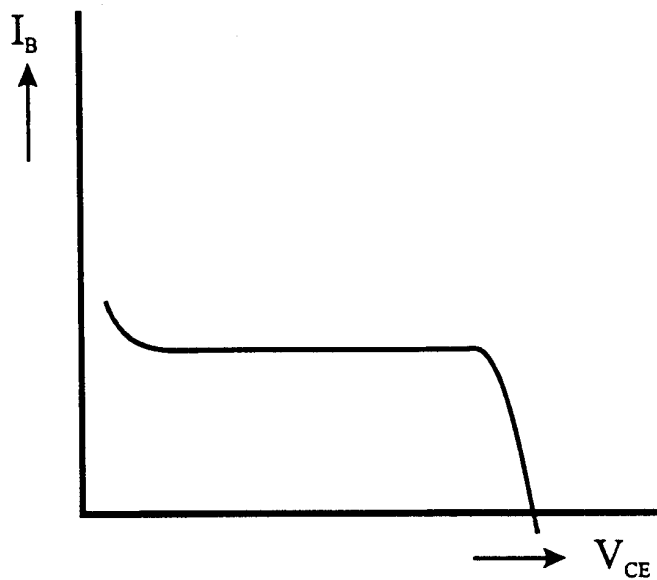
- h. Verklaar het verloop van de grafiek.

Opgave 1. Bipolaire Junctie Transistor (BJT)



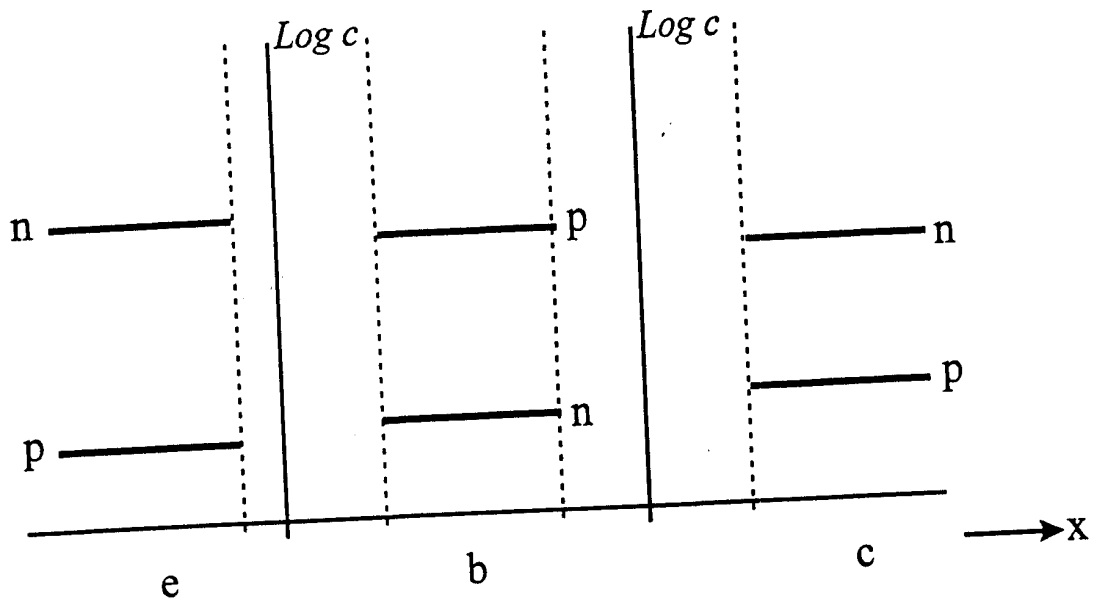
Figuur 1 : I_C - V_{CE} karakteristiek van een bipolaire npn transistor

- a. In figuur 1 is de I_C - V_{CE} karakteristiek geschetst van een bipolaire npn transistor voor twee verschillende basis-emitter spanningen. Verklaar de vorm van de curves.



Figuur 2 : I_B - V_{CE} karakteristiek van dezelfde npn transistor

- b. Voor dezelfde transistor op dezelfde V_{CE} -schaal is in figuur 2 de basis-stroom geschetst behorende by basis-emitter spanning V_{BE1} . Verklaar ook de vorm van deze curve.
- c. Voor de drie gebieden 1,2 en 3 zoals aangegeven in de I_C - V_{CE} grafiek schets de mobiele lading in de neutrale gebieden, uitgaande van onderstaande situatie bij de ongebiaste transistor.



- d. Dezelfde transistor wordt in gebied 2 gebiased. Teken in die situatie het laagfrequent klein-sigitaal schema en compleet het daarna zodat het ook geldig is voor hogere frequenties. Geef een toelichting.
- e. De transistor uit de voorgaande vraagstukken wordt vergeleken met een transistor met een lagere basisdotering, maar overigens identiek aan de transistor uit a. Schets in de grafiek van de transistor uit a. de I_C - V_{CE} curve die hoort bij dezelfde V_{BE1} als voor de transistor uit a. Verklaar de belangrijkste verschillen tussen de curves.
- f. Beschouw het hoogfrequent vervangschema uit d. Geef aan wat het verschil zal zijn met het vervangschema van de transistor uit e. (Weer dezelfde V_{BE1}). Verklaar je antwoord.

Opgave 2 (MOST)

In standaard IC-processen worden MOS transistoren gemaakt met verschillende afmetingen. Beschouw twee MOS transistoren met de volgende paramters:

drempelspanning $V_{T0} = 1.0 \text{ V}$
dikte gate-oxyde $t_{ox} = 50 \text{ nm}$

electronen mobiliteit : $\mu_e = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

gaten mobiliteit : $\mu_h = 300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

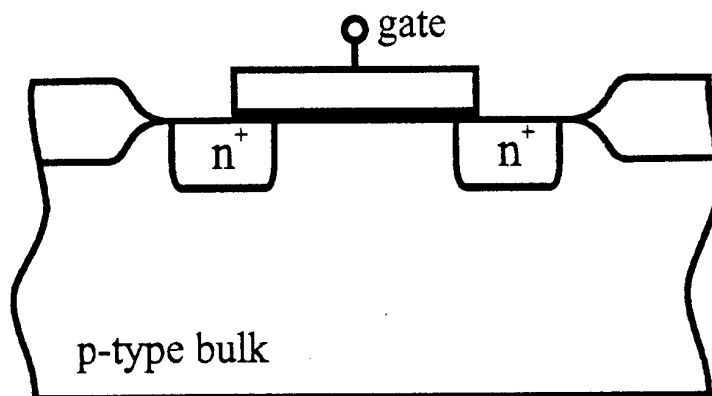
Twente MOST model : $\alpha = 1.1$

Van de MOS transistoren is verder bekend:

MOST A kanaallengte $L = 25 \text{ }\mu\text{m}$
kanaalbreedte $Z = 250 \text{ }\mu\text{m}$

MOST B kanaallengte $L = 5 \text{ }\mu\text{m}$
kanaalbreedte $Z = ?$

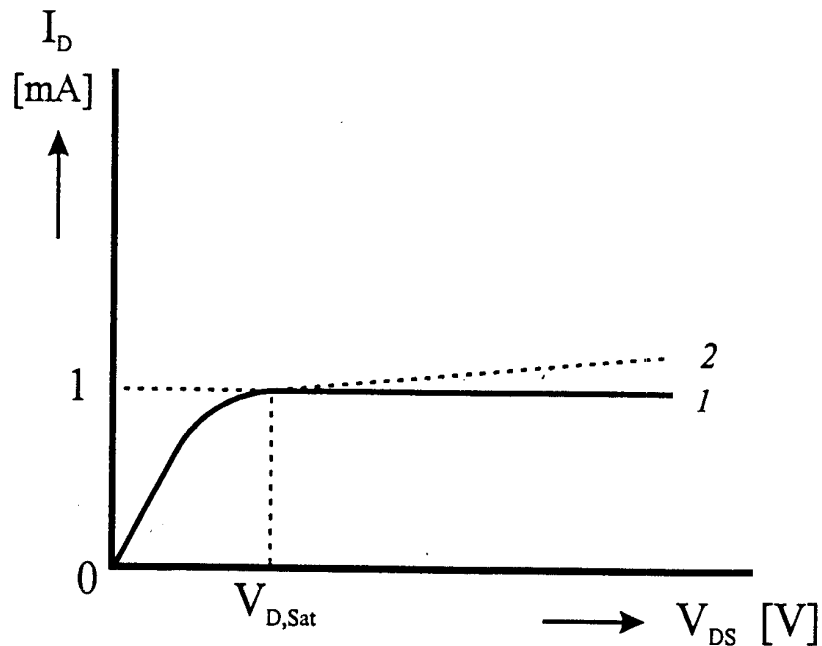
Een lengtedoorsnede van de transistoren is gegeven in de volgende figuur:



Figuur 1: Lengtedoorsnede MOS transistoren

- a. Om wat voor type MOST (n-kanaal of p-kanaal) gaat het in figuur 1? Verklaar uw antwoord.

Van beide transistoren is een I_D - V_D karakteristiek opgenomen bij $V_{SB}=0V$ en $V_{GB}=V_{GI}$. De resultaten zijn weergegeven in figuur 2:



Figuur 2: Karakteristieken MOST A (1) en B (2).

- b. Bepaal voor MOST A (karakteristiek 1) de gatespanning V_{GB} waarbij de bovenstaande I_D - V_{DS} karakteristiek ontstaat (gegeven: $V_{SB} = 0 V$, $I_{D,sat} = 1 \text{ mA}$).
- c. Bepaal voor deze MOST tevens $V_{D,sat}$. Waarom blijft de stroom constant wanneer bij MOST A een drainspanning $> V_{D,sat}$ wordt aangelegd? Illustreer uw antwoord m.b.v. een schets.

In de figuur is ook een karakteristiek voor MOST B weergegeven (karakteristiek 2).

- d. Bepaal voor deze MOST de breedte Z . Verklaar uw antwoord.
- e. Wanneer karakteristiek 1 en 2 met elkaar vergeleken worden, zien we een duidelijk verschil. Welk effect neemt u hier waar? Geef een toelichting op dit verschijnsel.
- f. Teken voor MOST A het verloop van I_D voor $V_{GB} = 3 V$ en $V_{SB} = 1 V$ als functie van V_{DB} voor het traject $0 \leq V_{DB} \leq 5 V$. Bereken de spanning $V_{DB,sat}$ onder deze condities.

g. Leg uit wat het body-effect is.

h. Beschrijf het begrip inversielading. Hoe ontstaat dit en waaruit is het opgebouwd?

i. Bereken en schets de I_D - V_{GB} karakteristiek voor $V_{DS}=3V$, $V_{SB}=0V$ voor het traject $1 < V_{GB} < 5 V$. Benoem de verschillende werkingsgebieden in deze karakteristiek.

Opgave 1. (Bipolaire Junctie Transistor)

Beschouw een *npn* transistor waarbij de dotering in de basis lineair varieert met de plaats in het quasi-neutrale gebied. Dit is in de praktijk vaak het geval. Aan de emitter kant bedraagt de dotering 10^{17}cm^{-3} en aan de collector zijde 10^{16}cm^{-3} . De (quasi-neutrale) basisbreedte bedraagt $1\mu\text{m}$ en de emitter en collector zijn gelijk gedoteerd (10^{19}cm^{-3}). De oppervlakte van de doorsnede van het emitter-basis contact bedraagt $100\mu\text{m}^2$. Recombinatie in de basis is verwaarloosbaar, de diffusie constante voor elektronen in de basis bedraagt $5\text{cm}^2/\text{s}$ en de vrije weglengte voor elektronen in de basis is $10\mu\text{m}$.

- Schets nu de concentraties van minderheidsladingsdragers onder
 - thermisch evenwicht (N.B. ook in dit geval kan uitgegaan worden van quasi neutraliteit in de basis),
 - forward active bias (onder lage injectie condities).
- In deze transistor is er in thermisch evenwicht al een gradient in de concentratie van de minderheden in de basis. Waarom loopt er geen continue stroom in de basis?
- Leid een uitdrukking af voor het elektrisch veld in de basis en geef ook aan waar het elektrische veld een maximum aanneemt. Bereken de waarde van dit maximum veld.
- Leg in woorden uit wat het effect is van het ingebouwde elektrische veld op het hoogfrequent gedrag van de transistor (m.a.w. op de snelheid van de transistor).
- In onderstaande figuur is de I_C - V_{CE} karakteristiek geschetst met I_B als parameter. Beschrijf waarom I_C toeneemt voor oplopende V_{CE} . Bereken uit de grafiek de benaderde waarde van de kleinsignaal uitgangsgoedheid g_0 .

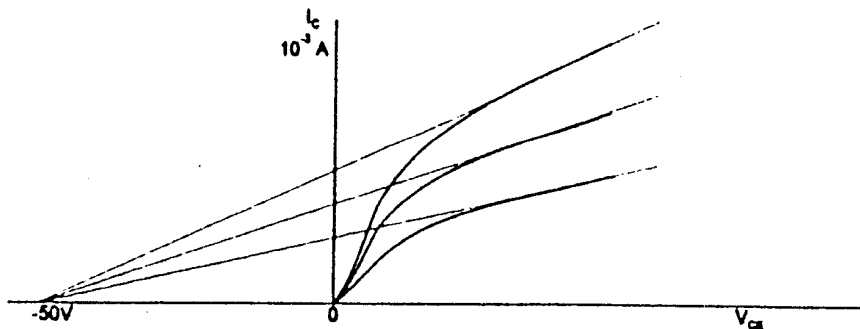


Figure 1: I_C - V_{CE} karakteristiek

- De transistor wordt nu als volgt gebruikt: $V_{BE}=0.7\text{V}$, over de collector-basis overgang staan een reverse spanning en de Early-spanning V_A mag zeer groot verondersteld worden. Bereken nu de collectorstroom en de transconductantie (de rol van het ingebouwde veld kan verwaarloosd worden).

Indien u een bepaald onderdeel in de opgave niet kunt beantwoorden en het antwoord bij een van de volgende onderdelen nodig denkt te hebben, kunt u een waarde aannemen (de aangenomen waarde dient realistisch gekozen te zijn).

a. Waar staat de afkorting CMOS voor?

Schets een doorsnede van de relevante CMOS devices in een richting loodrecht op het Si oppervlak en benoem relevante onderdelen.

b. Geef de definitie van de vlakke bandenspanning V_{FB} . Welke verschillende termen kunnen in V_{FB} verdisconteerd zijn?

Van een onbekend type MOS-transistor, waarvan doorsnede is getekend in figuur 2, is gegeven:

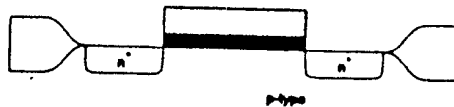


Figure 2: Dwarsdoorsnede MOS transistor

$$V_{TD} = 0.8V$$

$$t_{ox} = 50nm$$

$$\mu_n = 800cm^2/Vs$$

$$L = 4\mu m$$

De hellingshoek α in de gelineariseerde dermpelspanningsgrafiek van het Twente MOST

Model is:

$$\alpha = 1.2$$

c. Om wat voor type MOST gaat het in figuur 2?

In figuur 3 is de gemeten I_D-V_G karakteristiek van MOST A weergegeven onder de volgende condities:

$$V_{DS} = 0.1V$$

$$V_{SB} = 0V$$

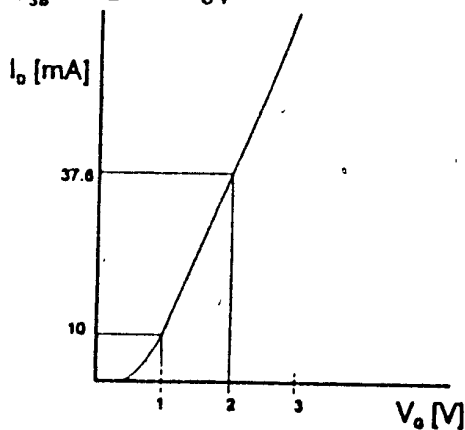


Figure 3: Gemeten I_D-V_G karakteristiek

d. Bepaal met behulp van de I_D-V_G karakteristiek de ontbrekende geometrie parameter, de breedte Z , van MOST A.

- e. Bepaal de uitdrukking voor de steilheid van MOST A in het verzadigingsgebied. Bereken de waarde bij $V_{GB} = 2V$. Geef het geldigheidsgebied van V_{DS} aan, waarvoor deze $g_{m, sat}$ bij $V_{GB} = 2V$ geldt.
- f. Vervolgens nemen we een tweede transistor, MOST B. Van deze transistor wordt, bij overigens gelijkblijvende parameters, de kanaalbreedte $Z_B = 10 \cdot Z_A$ gekozen. Bepaal de verzadigingsspanning $V_{D, sat}$ voor $V_{GB} = 3V$.
- g. Van MOST B wordt bij $V_{GB} = 2.5V$ en $V_{DB} = 1V$ de drainstroom I_D gemeten als functie van V_{SB} . Deze V_{SB} varieert van $0V$ tot $5V$. Schets het verloop van $I_D(V_{SB})$ onder deze condities. Bepaal de uitdrukking voor I_D als functie van V_{SB} en bereken $I_D(V_{SB})$ voor de volgende spanningen: $V_{SB} = 0V$, $V_{SB} = 1V$, $V_{SB} = 2V$, $V_{SB} = 4V$.

Opgave 1. (pn overgang)

Van een pn-diode, gebruikt met konstante voorwaartse spanning V , is gegeven dat de doping concentraties aan de n- resp. p-zijde zijn N_D en N_A . Het is kamertemperatuur T . Wanneer één van de parameters N_D of T wordt verhoogd terwijl der andere konstant wordt gehouden, vul dan de onderstaande tabel in met de verwachte verandering van de verschillende grootheden. Beschouw parameters als τ , μ en ook V_{th} ter vereenvoudiging als konstant.

	J_p	J_n	V_{bi}	W (depl. laag breedte)	C_{diff} (diffusie capaciteit)
N_D neemt toe					
T neemt toe					

Licht elk van de antwoorden kort toe.

Opgave 2 (MOS transistor)

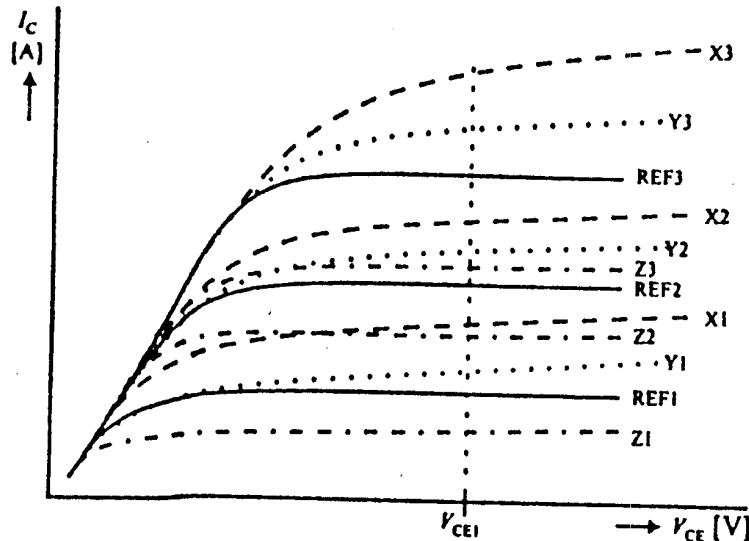
Gegeven een nMOST met oxide dikte t_{ox} , source, drain en bulk doping concentraties N_{Ds} , N_{Dd} , N_{Ab} resp., gebruikt op kamer temperatuur T . Wanneer één van de parameters wordt verhoogd, terwijl de andere constant worden gehouden, vul dan de tabel beneden in door aan te geven wat het effect zal zijn op de verschillende grootheden. Verklaar kort de verschillende effecten. (μ is constant)

	K (of β)	V_{th} V_T	g_m	f_T
t_{ox} neemt toe				
N_{Ds} , N_{Dd} neemt toe				
N_{Ab} neemt toe				
T neemt toe				////

(common source ckt.)

Opgave 2. (Bipolaire Junctie Transistor)

- a. Van een referentie bipolaire npn transistor REF zijn de I_C - V_{CE} karakteristieken (common emitter configuratie) in figuur 1 geschetst, met de getrokken lijnen voor 3 oplopende basisstromen I_{B1} , I_{B2} en I_{B3} (REF1, REF2 en REF3). Tevens zijn in de figuur van nog 3 andere transistoren X, Y en Z voor dezelfde basisstromen de karakteristieken geschetst. In onderstaande tabel zijn van de referentie transistor en 3 transistoren A, B en C de (homogeen veronderstelde) doteringen gegeven. Geef aan met welke transistor A, B en C de curves X, Y en Z kunnen corresponderen. Motiveer kort uw antwoord bij *elke* keuze.
Hint: vergelijk, op basis van de gegeven doteringen, de verschillende belangrijkste injectie-stromen.



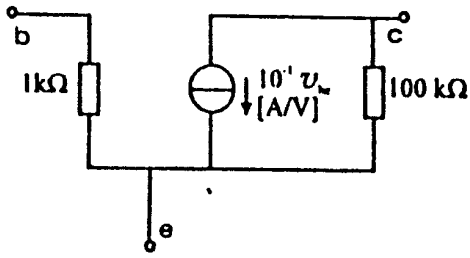
Figuur 1: I_C - V_{CE} karakteristieken met I_B als parameter voor de transistoren REF, X, Y en Z

	E (n) [cm ⁻³]	B (p) [cm ⁻³]	C (n) [cm ⁻³]
REF	10 ¹⁹	10 ¹⁷	10 ¹⁶
A	10 ¹⁸	10 ¹⁷	10 ¹⁶
B	10 ¹⁸	10 ¹⁶	10 ¹⁷
C	10 ¹⁹	10 ¹⁶	10 ¹⁶

Tabel 1: netto doteringen

- b. Van dezelfde transistoren X, Y en Z beschouwen we de curves behorende bij basisstroom I_{B3} (dus de curves REF3, X3, Y3 en Z3). Er wordt een collector-emitter spanning V_{CE1} aangeboden. Geef aan welk van de onderstaande kleinsignaal vervangschema's P, Q en R corresponderen met de de situaties X3, Y3 en Z3 als het kleinsignaal schema voor de referentie transistor (REF3) is zoals aangegeven. Verklaar voor *elk* van de parameters uw keuze.

(z.o.z.)



	P	Q	R
$(g_{\pi})^{-1}$	1 k Ω	1 k Ω	1 k Ω
g_m	0.5 Ω^{-1}	0.05 Ω^{-1}	0.2 Ω^{-1}
$(g_0)^{-1}$	10 k Ω	100 k Ω	50 k Ω

Tabel 2: kleinsignaal parameters

Figuur 2: Kleinsignaal vervangschema

- c. Bepaal welk van de transistoren A, B of C (uit a.) de laagste β_F zal hebben en welke de hoogste β_R . Bepaal ook welke de hoogste I_S (parameter uit het Ebers-Moll model) heeft/hebben. Motiveer bij *elke* keuze, uw antwoord.