

Schrijf elk van de 5 opgaven op een apart blad. Lichte de antwoorden toe.

Succes

1) Een halfgeleider heeft een effectieve toestandsdichtheid (effective density of states)  $N_V$  in de valentieband en  $N_C$  voor de geleidingsband, met  $N_V = N_C$ . De temperatuur is 300 K. De bandgap is 1 eV.

De halfgeleider is ongedoteerd.

- a) Bereken de elektronen en gaten concentratie.
- b) Bereken de positie van de Fermi energie.

De halfgeleider wordt nu n-gedoteerd met een concentratie donoren  $N_D$ . Neem aan dat  $N_D$  zo hoog is dat de halfgeleider extrinsiek is geworden.

- c) Bereken de concentratie van de elektronen en van de gaten
- d) Bereken de positie van de Fermi energie

De temperatuur wordt nu verhoogd.

- e) Bereken (ongeveer) bij welke temperatuur de overgang van extrinsieke naar intrinsieke halfgeleider optreedt.
- f) Wat zijn dan de elektronen en gaten concentraties? Wat is de positie van de Fermi energie?

De halfgeleider wordt nu (bij  $T=300K$ ) tegelijkertijd n en p gedoteerd met gelijke concentraties donoren en acceptoren  $N_D=N_A$ .

- g) Bereken de concentratie van elektronen en gaten
- h) Bereken de positie van de Fermi energie

2) Er is een nieuw halfgeleider device ontworpen. Het bestaat uit een gelaagde metaal-halfgeleider-metaal structuur. De dikte van de halfgeleider is  $D$ . Elk van de metalen vormt met de halfgeleider een Schottky barriere met hoogte  $E_B$ . De bandgap is  $E_g$

In de eerste uitvoering van het device is de halfgeleider niet gedoteerd.

- a) Teken (voor de evenwichtssituatie) de positie van de geleidingsband/valentie band en de Fermienergieën in de halfgeleider en de metalen als functie van  $x$ .
- b) Een externe spanning wordt aangelegd. Beredeneer (qualitatief) of er een stroom gaat lopen, en hoe die van de spanning afhangt. Doe hetzelfde voor de situatie dat de spanning van teken is omgekeerd.

De halfgeleider wordt nu n gedoteerd met een concentratie  $N_D$ . Deze wordt zo hoog gekozen dat de (totale) breedte van de depletiegebieden in de halfgeleider kleiner is dan de dikte  $D$  van de halfgeleider.

- c) Teken (voor de evenwichts situatie) de positie van de geleidingsband/valentie band en de Fermienergieën in de halfgeleider en de metalen als functie van  $x$ .

d) Een externe spanning wordt aangelegd. Beredeneer (qualitatief) of er een stroom gaat lopen, en hoe die van de spanning afhangt. Doe hetzelfde voor de situatie dat de spanning van teken is omgekeerd.

e) Is er een verschil in elektrische karakteristieken van het device voor de situaties van ongedoteerd en gedoteerde halfgeleider? Licht toe.

3) Een halfgeleider heeft een dikte  $D$  en is opgesloten tussen andere halfgeleiders die als barrières werken. Hierdoor zijn de electronen toestanden in de halfgeleider in de  $z$ -richting opgesloten. De effectieve massa van de electronentoestanden is  $m^*$ . De temperatuur  $T=0$ , zodat alle electronentoestanden met een energie beneden de Fermi energie bezet zijn, en alle daarboven onbezet. De halfgeleider is gedoteerd met een concentratie  $N_D$

a) Hoe dun moet  $D$  genomen worden zodat de electronentoestanden effectief 2 dimensionaal geworden zijn?

b) Nu wordt de halfgeleider ook in de  $y$ -richting opgesloten. Hierdoor bevinden de electronen zich nu in een draad met een vierkante doorsnede van  $D \cdot D$ .

c) Als  $D$  wordt verkleind bereken dan de waarde van  $D$  waarbij de electronentoestanden effectief 1-dimensionaal geworden zijn.

4) De wet van Moore zegt dat elke 2 jaar de hoeveelheid componenten op een computerchip verdubbelt. Hierdoor worden ook de afmetingen van de componenten steeds kleiner. Een nieuwe mogelijkheid zou zijn om de huidige transistoren, gebaseerd op het standaard veld effect mechanisme (MIS diode), te vervangen door single electron transistoren (SETs).

a) Welke problemen zouden er op kunnen treden als de huidige componenten nog verder verkleind worden. Denk hierbij o.a. aan "lek"stromen die t.g.v. quantum effecten zouden kunnen optreden.

b) Wat is het essentiële verschil tussen de huidige "standaard" veld effect transistoren en single electron transistoren?

c) Beschrijf de werking van een SET.

d) Beredeneer of single electron transistoren een mogelijke vervanging kunnen zijn voor de huidige transistoren. Geef een aantal argumenten voor en tegen en geef bij elk argument de bijbehorende redenatie.

5) Solar cells can be fabricated with semiconducting materials

Inorganic solar cells:

a) Describe the working mechanism of an inorganic solar cell.

b) Write the general expression for the current output of a real solar cell; discuss the difference with the ideal case.

c) Write the expression for the calculation of the power efficiency. Explain the nature of the terms that compose the expression.

Organic solar cells:

d) Describe the working mechanism of the so-called bulk heterojunction solar cells from the absorption of the photons until the extraction of the charges.

e) Draw the HOMO-LUMO level of the components of the bulk heterojunction in an energy diagram together with the work function of the metal electrodes.

# Exam Device Physics 20-1-2009

(CORRECTED)

①

- 1) a)  $N_V = N_C$  niet gedoteerd  $\rightarrow$  Fermi energie  
 b) in het midden van bandgap

$\text{————— } E_C$     electronenconcentratie  $N_e$   
 $\text{- - - - - } E_F$     gatenconcentratie  $N_g$   
 $\text{————— } E_V$

$$N_e = N_g = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right)$$

$$= N_C \exp\left(\frac{-0.5 \text{ eV}}{26 \text{ meV}}\right)$$

c)  $\text{————— } E_C$   
 $\text{————— } E_D$   
 $\text{- - - - - } E_F$

Neem aan dat alle donoren geïoniseerd zijn

$\rightarrow N_e = N_D$

d)  $\text{—————}$

$$N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right) = N_D$$

$$E_F = E_C + kT \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right) \quad \text{OK} \quad \begin{matrix} N_D \text{ increases} \\ \rightarrow E_F \text{ increases} \end{matrix}$$

inhinsiek wanneer Fermi energie in het midden van bandgap.

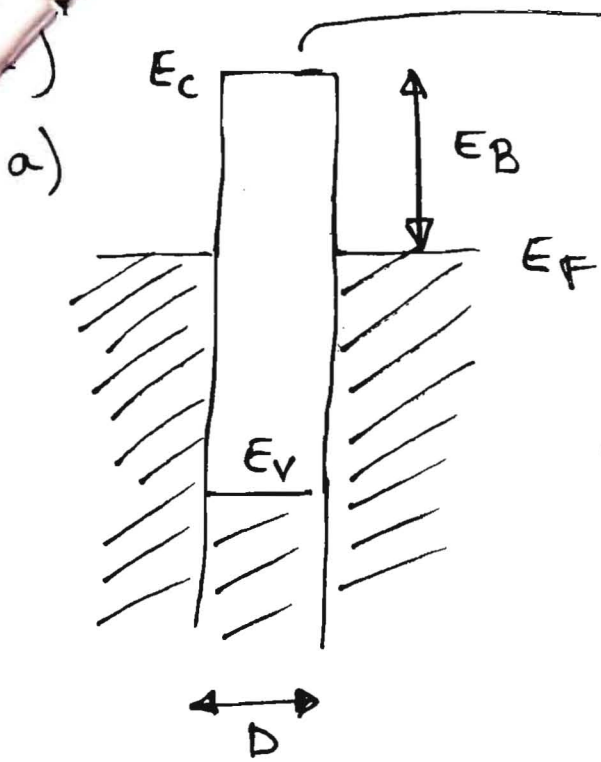
- e) f) aantal inhinsieke ladingstraggers  $\approx$  aantal ladingstraggers door dotering:

$$N_C \exp\left(\frac{-0.5 \text{ eV}}{kT}\right) \approx N_D \quad \rightarrow$$

$N_D$  increases

$$kT = \frac{0.5 \text{ eV}}{\ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)} \quad \rightarrow T \text{ increases}$$

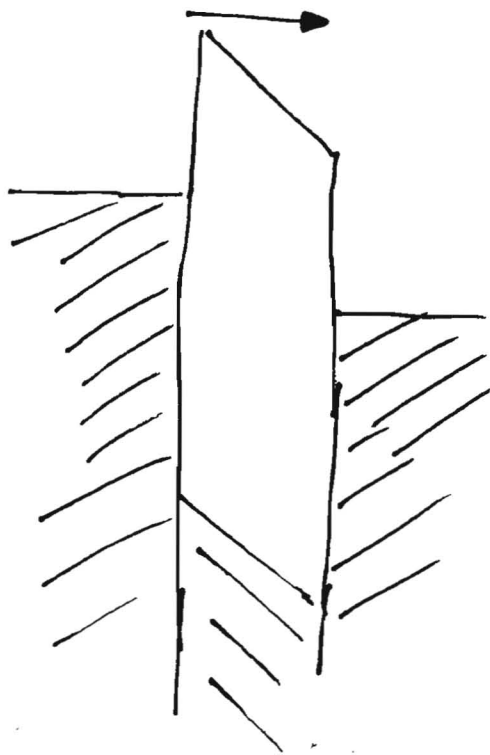
- g) h) Vanwege symmetrie: Fermi energie in het midden van bandgap  $\rightarrow$  dotering heeft geen effect  $N_e = N_g =$  inhinsieke waarde (zie a)



niet gedoteerd →  
 geen bandbuiging  
 → vlakke banden

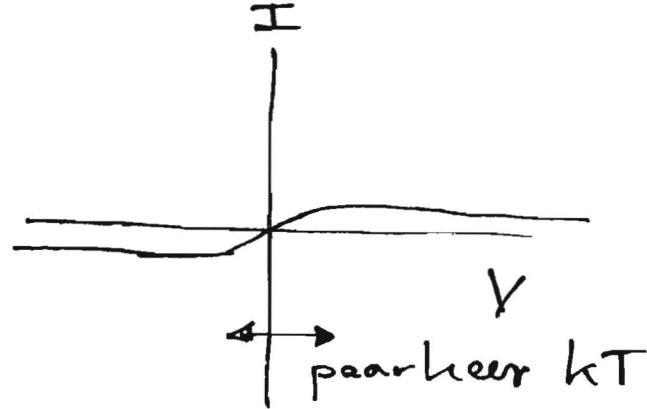
$$E_c - E_v = E_g$$

b) Met externe spanning



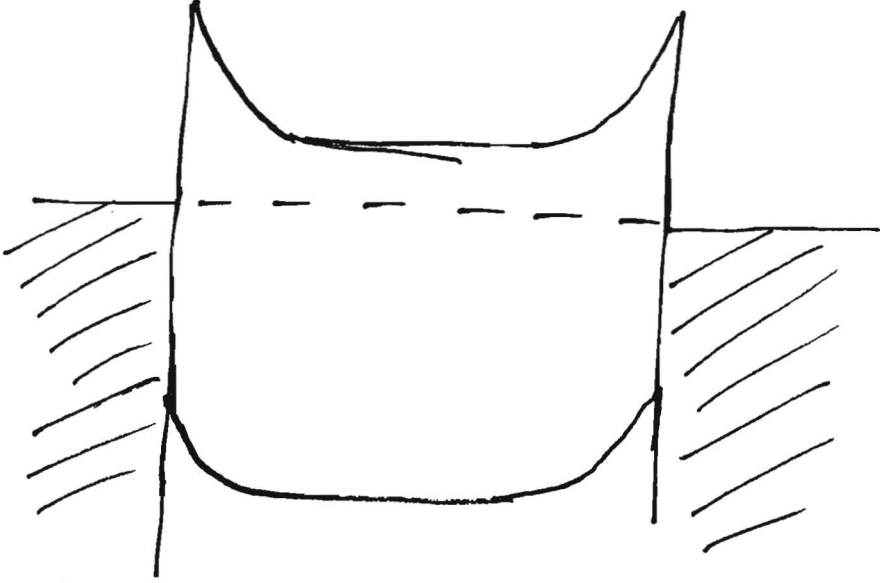
geen lading in halfgeleiden  
 → geen bandbuiging →  
 veld → constant elektrisch

mogelijk transport:  
 thermionische emissie  
 over de barriere

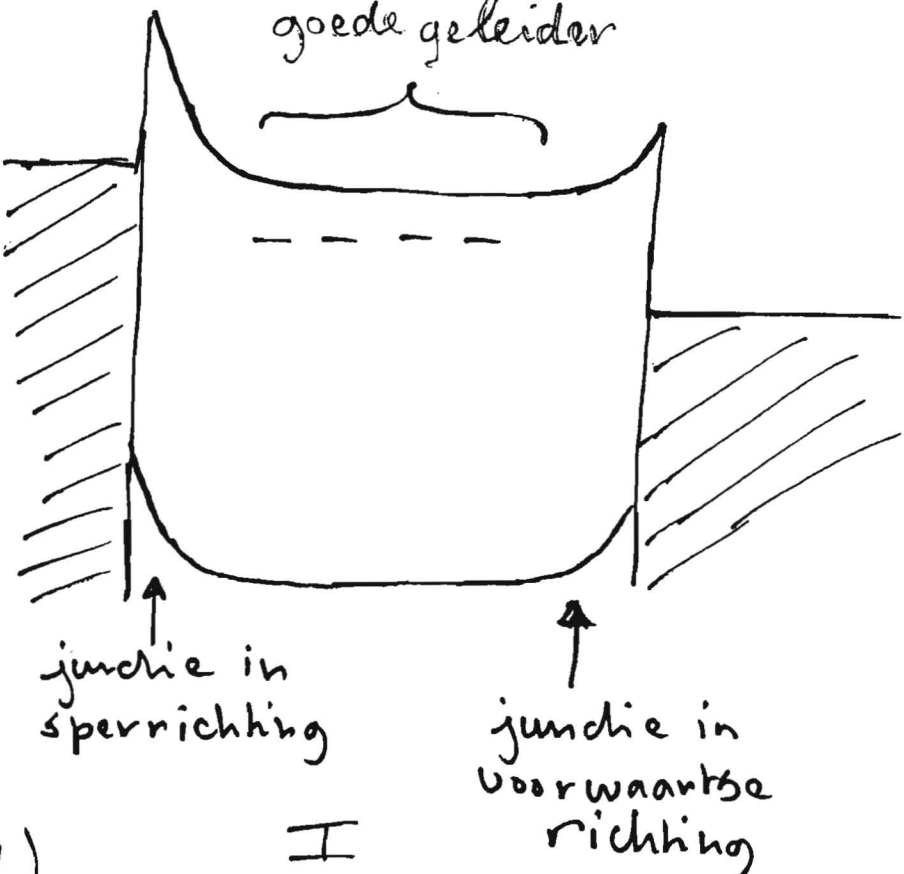


I/V symmetrisch door symmetrische structuur  
 I verzadigt voor positieve/negatieve  $V \gg kT$

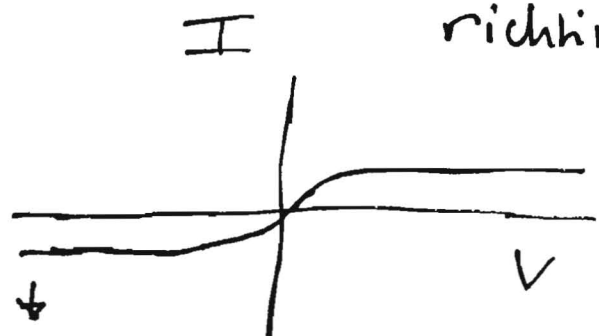
c)



gedoteerd: 2 Schottky junctions + gedoteerde halfgeleider.  
 Bottleneck: Schottky junctions → Spanningsval over deze junctions.  
 met externe spanning:

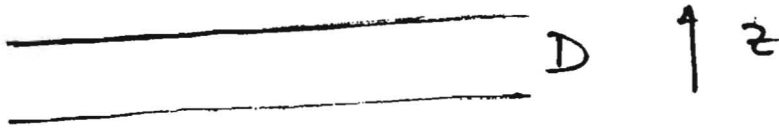


d)



→ stroom beperkt door junctie in sperrichting

(4)

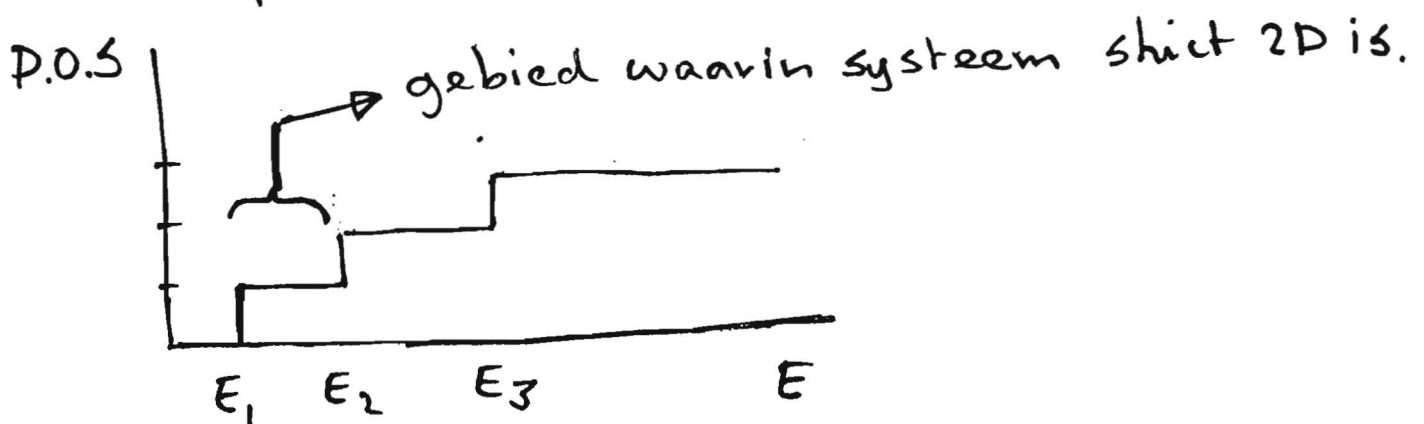


concentratie  $N_D$

$$E = E_{kin} = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

Door opsluiking in  $z$  richting met "harde wand" potentiaal  $\rightarrow$  golf functie = 0 bij de wanden  $\rightarrow k_z = \frac{\pi N}{D}$  met  $N$ : integer.

Density of states:



$$E_1 = \frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{\pi^2}{D^2} \quad E_2 = \frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{4\pi^2}{D^2} \quad E_3 = \frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{9\pi^2}{D^2}$$

2D DOS :  $\frac{m^*}{\pi\hbar^2}$  (inclusief spin ontwaarding)

Voor sticht 2D moet dus gelden

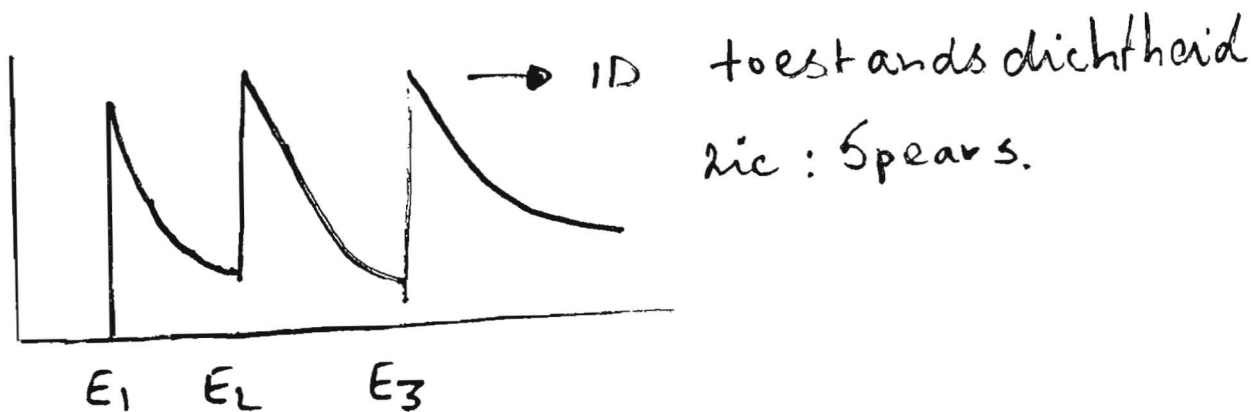
$$\frac{m}{\pi\hbar^2} (E_2 - E_1) > \frac{N_D}{D}$$

Hieruit volgt een voorwaarde voor  $D$

3c)

idem maar nu voor 1D

(5)



Fermi energie moet in dit gebied liggen

4a) quantum tunnelen door gate oxide  
quantum tunnelen door kanaal tussen  
source en drain

b) de standaard FETs maken geen gebruik van  
de Coulomb blochade, dus het feit dat de  
electrostatische energie op een discrete manier  
verandert als het aantal electronen  $N$  verandert.

c) zie: lecture notes

d) voor: klein, werkt al bij weinig electronen  
gevoelig

tegen: \* by kamertemperatuur is er nog  
steeds genoeg thermische energie  
om "random" electronen te laten tunnelen  
\* de elektrische "ladingsomgeving"  
moet gecontroleerd worden tot op beter  
dan een electron lading  
\* de RC tijd is groot ( $R > h/e^2$ )