
Opgave 1

Gegeven: energiekloof Ge: 0,72 eV, 1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J (Binas)

Gevraagd: a) fotonenergie b) aantal elektronen voor $E_{\text{kloof}} = 1,0$ keV

Oplissing:

- a De fotonenergie wordt opgenomen door het elektron om de geleidingsband te bereiken.

Deze is dan: $0,72 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = \mathbf{1,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$.

- b Voor elk elektron is 0,72 eV nodig.

Met $1,0 \cdot 10^3$ eV kunnen dus de energiekloof oversteken:

$1,0 \cdot 10^3 / 0,72 = \mathbf{1,4 \cdot 10^3}$ elektronen.

Opgave 2

Gegeven: Soortelijke weerstand Ge (20 °C): $\rho_{20} = 0,588 \Omega \cdot \text{m}$.

Gevraagd: ρ_{40}

Oplissing:

$$\Delta\rho = \rho \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{waarin } \alpha = -0,047 \text{ K}^{-1}$$

$$\Delta\rho = 0,588 \times -0,047 \times 20 = -0,553 \Omega$$

$$\rho_{40} = 0,588 - 0,553 = \mathbf{0,035 \Omega \cdot \text{m}}$$

Opgave 3

- a Massa van $1,00 \text{ cm}^3$ zilver bij 20 °C: $m = V \cdot \rho$ ($\rho_{20} = 10,50 \text{ g/cm}^3$ Binas)

$$m = 1,00 \text{ cm}^3 \times 10,50 \text{ g/cm}^3 = \mathbf{10,5 \text{ g}}$$

- b Hoeveelheid atomen (mol) in $1,00 \text{ cm}^3$ zilver: $n = m / M$ ($M = 107,9 \text{ g/mol}$)

$$n = 10,5 \text{ g} / 107,9 \text{ g/mol} = \mathbf{0,0973 \text{ mol}}$$

- c Aantal zilveratomen in $1,00 \text{ cm}^3$ (0,0973 mol): $N = n \cdot N_A$ ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

$$N = 0,0973 \text{ mol} \times 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = \mathbf{5,86 \cdot 10^{22} \text{ atomen}}$$

- d Het aantal vrije elektronen is even groot, want elk atoom levert één vrij elektron.

→ $\mathbf{5,86 \cdot 10^{22} \text{ elektronen}}$.

Opgave 4

Aluminium als geleider.

Gegeven: Al, $\rho_{20} = 2,70 \text{ g/cm}^3$ (Binas), $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $M = 27,0 \text{ g/mol}$

Gevraagd: Aantal vrije ladingsdragers (elektronen) in $1,00 \text{ cm}^3$ Al.

Oplossing:

$$m = V \cdot \rho \quad n = m / M \quad \mathbf{N} = n \cdot N_A \rightarrow \text{hieruit volgt voor het aantal atomen:}$$

$$N = \frac{V \cdot \rho \cdot N_A}{M}$$

$$N = 1,00 \times 2,70 \times 6,022 \cdot 10^{23} / 27,0 = 6,022 \cdot 10^{22} \text{ atomen Al in } 1,00 \text{ cm}^3.$$

$$\text{Elk atoom levert 3 valentie-elektronen: } 3 \times 6,022 \cdot 10^{22} = \mathbf{1,81 \cdot 10^{23} \text{ elektronen.}}$$

Opgave 5

Gegeven: Si, vrije elektronen in silicium: $6,2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Gevraagd: Aantal vrije ladingsdragers in $1,00 \text{ cm}^3$ Si.

Oplossing:

Het aantal vrije elektronen bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$ is: $6,2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (gegevens uit de paragraaf).

Elk elektron laat een *gat* achter dat zich gedraagt als ladingsdrager.

Het aantal ladingsdragers (gaten + elektronen) is daardoor tweemaal zo groot als het aantal vrije elektronen:

$$2 \times 6,2 \cdot 10^{10} = \mathbf{1,2 \cdot 10^{11}}$$

Opgave 6

Gegeven: Ge, vrije elektronen in germanium: $2,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Gevraagd: a) aantal valentie-elektronen in $1,00 \text{ cm}^3$ Ge, b) valentie-el / vrije el.

Oplossing:

$$m = V \cdot \rho \quad n = m / M \quad N = n \cdot N_A \rightarrow N = \frac{V \cdot \rho \cdot N_A}{M}$$

$$\rho_{20} = 5,32 \text{ g/cm}^3$$

$$M = 72,64 \text{ g/mol}$$

$$\text{a} \quad N = 1,00 \times 5,32 \times 6,022 \cdot 10^{23} / 72,64 = 4,41 \cdot 10^{22} \text{ atomen in } 1,00 \text{ cm}^3 \text{ Ge.}$$

$$\text{Vier valentie-elektronen per atoom: } 4 \times 4,41 \cdot 10^{22} = \mathbf{1,76 \cdot 10^{23} \text{ valentie-elektronen.}}$$

$$\text{b} \quad \text{valentie-el / vrije el.} = 1,76 \cdot 10^{23} / 2,4 \cdot 10^{13} = \mathbf{7,3 \cdot 10^9}$$

Opgave 7

Een gedoteerd siliciumkristal is in zijn geheel neutraal. Er zijn evenveel plus-ionen als vrije elektronen (-).

Opgave 8

Si gedoteerd met Al:

Al heeft drie elektronen in de buitenste schil. Als Al 'meedoet' in het kristal dan is er steeds een elektron te kort rond een Al-atoom. Dat wordt ergens anders weggehaald en dus ontstaat op die plek een gat. Er ontstaan positieve ladingsdragers: **een p-kristal**.

Opgave 9

P heeft vijf elektronen in de buitenste schil. Als het P-atoom bindingen aangaat met omringende germaniumatomen dan is er steeds een elektron te veel rond een P-atoom. Zo komen er vrije elektronen in het kristal, negatieve ladingsdragers: **een n-kristal**.

Opgave 10

Gegeven: Si, $6,2 \cdot 10^{10}$ vrije elektronen cm^{-3} , gedoteerd met antimoon (Sb): $2,0 \cdot 10^{14}$ vrije elektronen,

Gevraagd: a) aantal vrije ladingsdragers zuiver Si per cm^3
b) aantal vrije ladingsdragers in gedoteerd Si per cm^3
c) verhouding (met welke factor vergroot)

Oplossing:

- In zuiver Si zijn er evenveel gaten als vrije elektronen, Het aantal vrije ladingsdragers is daarom: $2 \times 6,2 \cdot 10^{10} = 1,2 \cdot 10^{11}$ per cm^3 .
 - Gedoteerd met Sb zijn er: $2,0 \cdot 10^{14}$ vrije ladingsdragers per cm^3 . Dit is het aantal vrije elektronen van Sb. De gaten van Si die er waren worden weer gevuld.
 - De toename is: $2,0 \cdot 10^{14} / 1,2 \cdot 10^{11} = 1,6 \cdot 10^3 \times$.
-

Opgave 11

Ge: $4,53 \cdot 10^{22}$ Ge-atomen per cm^3 .

- Ga heeft drie valentie-elektronen, er is voor de edelgasconfiguratie van Ga steeds één elektron te kort, door opvulling uit andere bindingen (van Ge) ontstaan er gaten (+) het wordt dus een p-type kristal.
- Verhouding Ga-atomen / Ge-atomen: $6,0 \cdot 10^{16} / 4,53 \cdot 10^{22} = 1,3 \cdot 10^{-6}$
- De geleiding wordt vergroot met de factor:

ladingsdragers gedoteerd

ladingsdragers zuiver Ge

ladingsdragers gedoteerd: $6,0 \cdot 10^{16}$ gaten per cm^3

ladingsdragers zuiver Ge: $2 \times 2,4 \cdot 10^{13} = 4,8 \cdot 10^{13}$ gaten + elektronen per cm^3

De verhouding wordt dan: $6,0 \cdot 10^{16} / 4,8 \cdot 10^{13} = \mathbf{1,3 \cdot 10^3}$

Een niet zo grote toevoeging (1,3 op 1000000) heeft heel grote gevolgen voor de geleiding (1300 maal zo groot).

Opgave 12

In het n-gebied is er een toevoeging aan vrije elektronen afkomstig van het vijfwaardige element. De aanvankelijk aanwezige gaten worden hierdoor nog geringer in aantal. De elektronen zijn dan echt in de ruime meerderheid.

Opgave 13

De vrije elektronen die oversteken door willekeurige beweging (diffusie) naar het p-gebied maken het p-gebied negatief. De barrière wordt dus steeds groter.

Bedenk dat *p-gebied* wil zeggen dat er wel positieve ladingsdragers zijn maar dat daar negatieve lading - van in bindingen vastzittende elektronen - tegenover staat. Het p-gebied is neutraal tot de elektronen uit het n-gebied binnenkomen. Dan wordt het p-gebied steeds negatiever aan de grens met het n-gebied.

Opgave 14

In de evenwichtssituatie is er *dynamisch* evenwicht. Het proces van overstekende elektronen verloopt dan even snel als het proces van de overstekende gaten. Er is geen netto ladingtransport.

Opgave 15

De gatenstroom van n-gebied naar p-gebied maakt de barrière kleiner. Maar deze stroom is klein.

De barrière wordt groter doordat elektronen van n naar p gaan en de p-laag negatief maken. En door de gaten die van p naar n gaan en de n-laag positief maken.

Opgave 16

Om een stroom-spanningskarakteristiek te maken moet je de spanning over de component en de stroom door de component meten.

In schakeling (a) meet je beide. De stroom die door de voltmeter loopt is te verwaarlozen want de voltmeter heeft een heel hoge weerstand en de diode in doorlaatrichting een heel

lage.

In schakeling (b) meet je ook beide maar de spanning ook over de ampèremeter. Deze spanning is gering want de weerstand is klein maar dat is de spanning (en weerstand) over de diode in doorlaat ook. De spanning over de ampèremeter is daardoor niet te verwaarlozen. Schakeling (b) meet een te hoge spanning.

(a) is dus de juiste schakeling.

Opgave 17

Om een stroom-spanningskarakteristiek te maken moet je de spanning over de component en de stroom door de component meten. In de keerrichting is de weerstand van de diode heel hoog, er gaat vrijwel geen stroom door.

In schakeling (a) meet je ook de stroom door de voltmeter. Die is mogelijk *niet te verwaarlozen* ook al heeft de voltmeter een heel hoge weerstand. De diode heeft namelijk ook een heel hoge weerstand in de keerrichting. Je meet bij (a) een te hoge stroomsterkte.

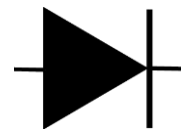
In schakeling (b) meet je niet de stroom door de voltmeter maar alleen die door de diode. De spanning meet je over ampèremeter + diode maar omdat de weerstand van de ampèremeter heel klein is en die van de diode heel hoog, is de spanning over de ampèremeter te verwaarlozen.

(b) is dus de juiste schakeling.

Opgave 18

a Een germanium-diode heeft een drempelspanning van ongeveer 0,3 V en silicium 0,7 V. Zie de tekst in de paragraaf.
De diode van 0,7 V is dus een siliciumdiode.

b De verticale streep is de kathode, het n-gebied, aan te sluiten op de *min* van een gelijkspanningsbron voor de doorlaatrichting. Het n-gebied wordt immers positief door de overgelopen *gaten*. Door aansluiting op de *minpool* wordt de contactpotentiaal afgebroken en gaat er een stroom lopen.



Opgave 19

Gegeven: Diode in serie met weerstand, $R = 200 \Omega$, $U_{\text{weerstand}} = 1,00 \text{ V}$, grafiek U - I -karakteristiek.

Gevraagd: a) I b) U_{diode} c) U_{bron}

Oplossing:

a $U = I \cdot R \rightarrow I = U / R \rightarrow I = 1,00 / 200 = 0,00500 \text{ A}$ **5,00 mA**

b Uit de grafiek U - I -karakteristiek van de BA 100 schatten we bij 5,0 mA de spanning op: **0,7 V**.

c De klemspanning die de bron levert is dan: $1,0 + 0,7 = \mathbf{1,7 \text{ V}}$

Opgave 20

- a Enkelfasige gelijkrichtschakeling zonder afvlakcondensator: **1**
 - b Dubbelfasige gelijkrichtschakeling zonder afvlakcondensator: **3**
 - c Enkelfasige gelijkrichtschakeling met afvlakcondensator: **2**
 - d Dubbelfasige gelijkrichtschakeling met afvlakcondensator: **4**
-

Opgave 21

De rimpelspanning van een afgevlakt signaal wordt kleiner door vergroting van de onderstaande eigenschappen.

- a *Capaciteit C* van de condensator,

want als de capaciteit toeneemt, dan kan er meer lading op de condensator opgevangen worden en duurt het langer voordat hij ontladen is, de spanning blijft dan langer op een hoger niveau.

- b *frequentie f* van de ingangswisselspanning,

want als de frequentie toeneemt is er mindertijd voor de ontlading van de condensator, de condensator wordt sneller weer opgeladen, dus stabielere hoge spanning.

- c *weerstand R*,

want als de weerstand groter is dan is de stroomsterkte kleiner en dus de ontladingssnelheid van de condensator kleiner.

Opgave 22

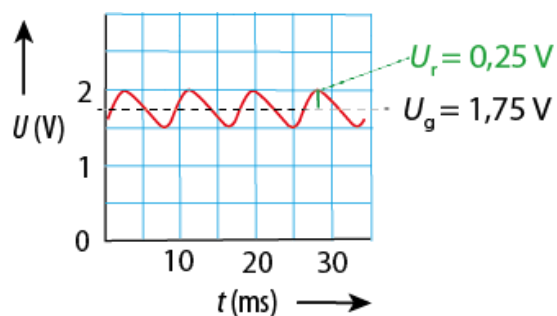
Aflezen uit de afbeelding.

- a Gelijkspanningscomponent U_g .
Deze is (orde van grootte): **1,75 V**

- b Topwaarde rimpelspanning U_r .
Deze is (orde van grootte): **0,25 V**

- c De frequentie: $f = 1 / T$
 $T \rightarrow$ er staan 3 golfjes op 26 ms, dus $T = 26 / 3 = 8,67 \text{ ms} \rightarrow 0,00867 \text{ s}$.

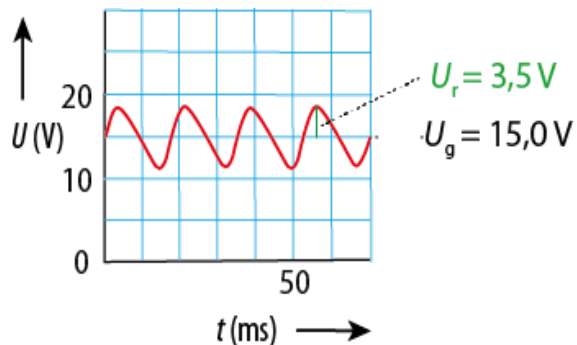
$$f = 1 / 0,00867 \text{ s} = \mathbf{1,2 \cdot 10^2 \text{ Hz}}$$



Opgave 23

Aflezen uit de afbeelding.

- a Gelijkspanningscomponent U_g .
Deze is: **15,0 V**
- b Rimpelspanning U_r .
Deze is (orde van grootte): **3,5 V**
- c De frequentie: $f = 1 / T$



$T \rightarrow$ er staan 4 golfjes op 70,0 ms,
dus $T = 70 / 4 = 17,5 \text{ ms} \rightarrow 0,0175 \text{ s}$.

$$f = 1 / 0,0175 \text{ s} = \mathbf{57 \text{ Hz}}$$

Opgave 24

Afbeelding *dubbelfasige gelijkrichting*.

- a Als A positief is t.o.v. B dan loopt de stroom via: $A \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow B$
- b Als A negatief is t.o.v. B dan loopt de stroom via: $B \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow A$

Opgave 25

Transistor als schakelaar.

Gegeven: $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 820 \Omega$, Si-transistor $U_{be} = 0,7 \text{ V}$

Gevraagd: U_{bron}

Oplossing:

U_{be} moet minimaal 0,7 V zijn. De stroom die dan door R_1 loopt gaat ook door R_2 .
De spanning van de bron is dan gelijk aan: $I \times (R_1 + R_2)$

Voor R_1 : $I = U / R \rightarrow I = 0,7 / 820 = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ A}$

Voor $R_1 + R_2$: $U = I \times (R_1 + R_2) \rightarrow 8,5 \cdot 10^{-4} \times (1,0 \cdot 10^4 + 820) = \mathbf{9,2 \text{ V}}$

Opgave 26

Transistor schakelt een relais (afbeelding).

Gegeven: $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = \text{LDR}$, Si-transistor $U_{be} = 0,7 \text{ V}$, $U_{bron} = 9 \text{ V}$

Gevraagd: a) $R_{LDR} = 5 \text{ k}\Omega$ (donker) lamp aan of uit?

b) $R_{LDR} = 500 \Omega$ (zon) lamp aan of uit?

c) R_{LDR} op schakelmoment?

Oplossing:

a De stroom die door de weerstanden loopt berekenen we met $I = U / (R_1 + R_2)$

$$I = 9 / (10 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3) = 0,0006 \text{ A}$$

De spanning U_{be} is dan: $0,0006 \times 5 \cdot 10^3 = 3 \text{ V}$. Veel groter dan 0,7 V, **lamp aan**.

Je kunt natuurlijk ook meteen stellen: $U_{be} = \frac{5}{10+5} \times 9 \text{ V} = 3 \text{ V}$.

b In de zon: $R_{LDR} = 500 \Omega \rightarrow I = 9 / (10 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot 10^3) = 0,00086 \text{ A}$

De spanning U_{be} is dan: $0,00086 \times 500 = 0,4 \text{ V}$. Kleiner dan 0,7 V, **lamp uit**.

Of direct: $U_{be} = \frac{0,5}{10+0,5} \times 9 \text{ V} = 0,4 \text{ V}$.

c Bij het schakelmoment is de spanning U_{be} : 0,7 V. Over de weerstand van 10 kΩ staat dan een spanning van $9 - 0,7 = 8,3 \text{ V}$.
 En de stroomsterkte is: $I = 8,3 / 1,0 \cdot 10^4 = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ A}$.

$$R_{LDR} = U / I \rightarrow 0,7 / 8,3 \cdot 10^{-4} = 843 \Omega \rightarrow \mathbf{0,8 \text{ k}\Omega}$$

Opgave 27

Transistor schakelt een lampje met een NTC, meetwaarden in tabel.

Gegeven: $R_2 = 56 \text{ k}\Omega$, $R_1 = \text{NTC}$, $U_{drempel} = 0,68 \text{ V}$, $U_{bron} = 6,00 \text{ V}$

Gevraagd: a) grafiek

- b) 0 °C, lamp aan of uit?
- c) $U_{56\Omega}$ op schakelmoment?
- d) R_{NTC} op schakelmoment?
- e) t op schakelmoment?

Oplossing:

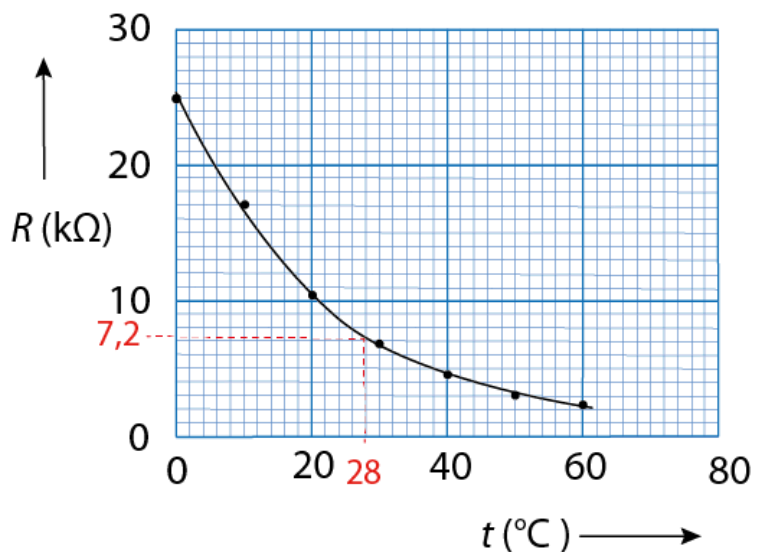
a

b Bij 0 °C is de weerstand 24,8 kΩ. De spanning over de NTC-weerstand is dan:

$$U_{be} = \frac{R_{NTC}}{(R + R_{NTC})} \times U_{bron}$$

$$\frac{24,8}{(56 + 24,8)} \times 6,00 \text{ V} = 1,8 \text{ V}$$

1,8 V > 0,68 V **lampje aan**.



c $U_{DA} = U_{56k\Omega} = 6,00 - 0,68 = \mathbf{5,32 \text{ V}}$

d R_{NTC} op het schakelmoment.

Dan is $U_{NTC} = U_{be} = 0,68 \text{ V}$. Met I kunnen we R berekenen. Maar I eerst te berekenen met de weerstand van 56 kΩ:

Uitwerkingen van de opgaven uit:

Natuurkunde voor het MBO deel 3 ISBN 9789491764462, 1e druk, Uitgeverij Syntax Media

Hoofdstuk 10 Halfgeleiders

bladzijde 9

$$I = U / R \rightarrow I = 5,32 / 5,6 \cdot 10^4 = 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ A}$$

$$R_{\text{NTC}} = U / I \rightarrow R_{\text{NTC}} = 0,68 / 9,5 \cdot 10^{-5} = 7,2 \cdot 10^3 \Omega \rightarrow \mathbf{7,2 \text{ k} \Omega}$$

e De schakeltemperatuur is blijktbaar (rode stippellijn grafiek): **28 °C**.