

Deel I

Stroomdoorgang door

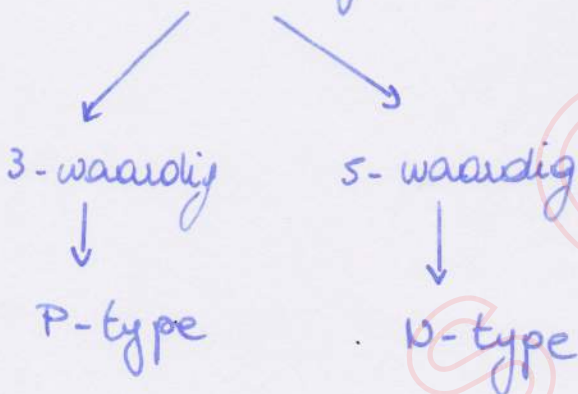
halfgeleiders

Hoofdstuk 1

Inleiding tot halfgeleiders

- zuivere halfgeleiders → intrinsieke halfgeleiders

- verontreinigen → extrinsieke halfgeleiders

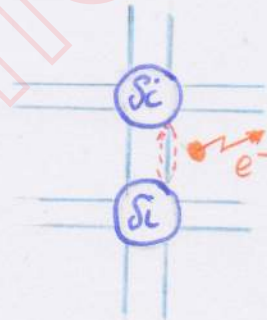


Hoofdstuk 2

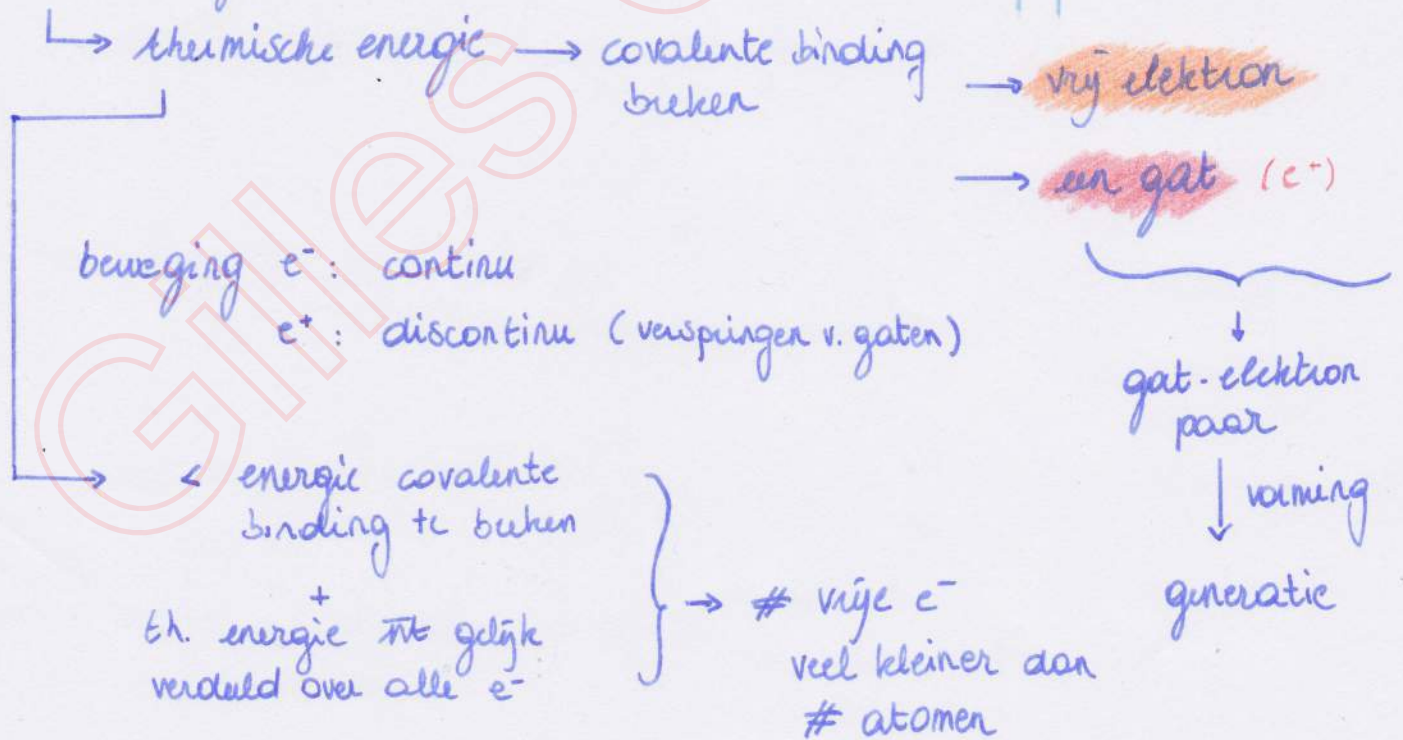
Intrinsieke halfgeleiders

ladingdragers in een intr. halfgeleider

bij 0K → alle valentie-elektronen vast in kristalrooster



Thermische generatie



$T \uparrow \rightarrow$ thermische energie $\uparrow \rightarrow$ gat-elektronenparen \uparrow

bij een bepaalde $T \rightarrow$ thermische generatie \rightarrow gat- e^- paren

intrinsieke ladingsdragersconcentratie \leftarrow { thermisch evenwicht = # gaten $\propto e^-$ constant

hoe meer \downarrow hoe groter de kans op recombinitie \leftarrow

$$p_0 = n_0 = n_i \quad [m^{-3}]$$

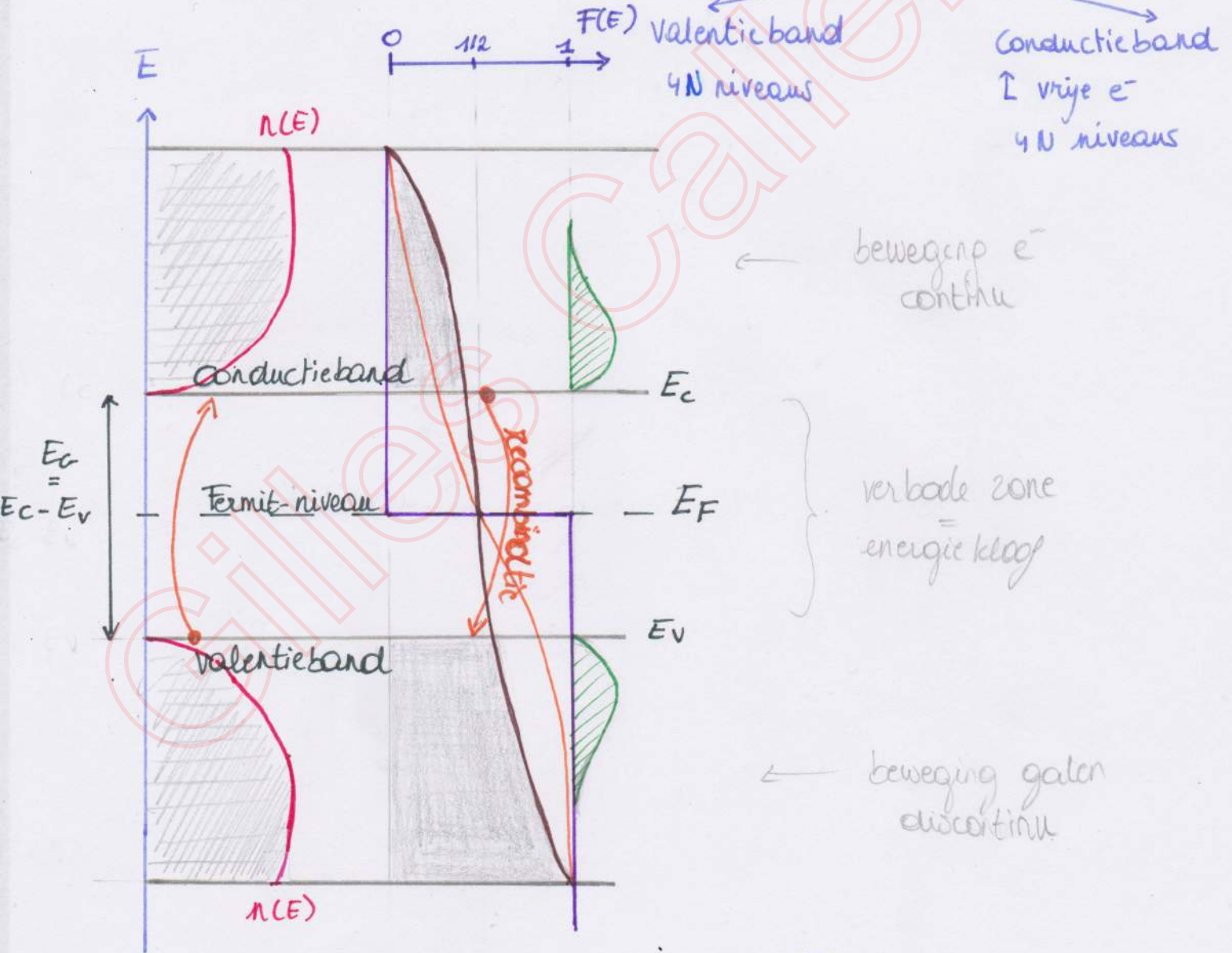
conc toenemen bij $T \rightarrow$

tijdens T stijging generatie $>$ recombinitie

\rightarrow $\bar{g}n$ thermisch evenwicht

Energieniveaus van elektronen in intr. halfgeleider

halfgeleiderkristal \rightarrow roosterstructuur \rightarrow discrete energieniveaus (orbitalen)
 \downarrow
 energiebanden



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

hans energie-niveau beset

$$n_0 = \int_{E_C}^{+\infty} \underbrace{F(E) \cdot n(E)}_{\rightarrow \# e^-} dE$$

$n(E)$ = densiteit van staten

$\int \#$ beschikbare energie staten.

$T < T < T \rightarrow$ populatie vol cond band [elektr/m³]

Aantal gaten en elektronen in intr. halfgeleider

$$n_i = K_M \cdot T^{3/2} e^{-\frac{E_G}{2kT}}$$

$n_i = n_o = p_o$ (dichtheiten) [m^{-3}]

K_M (materiaalconst.)

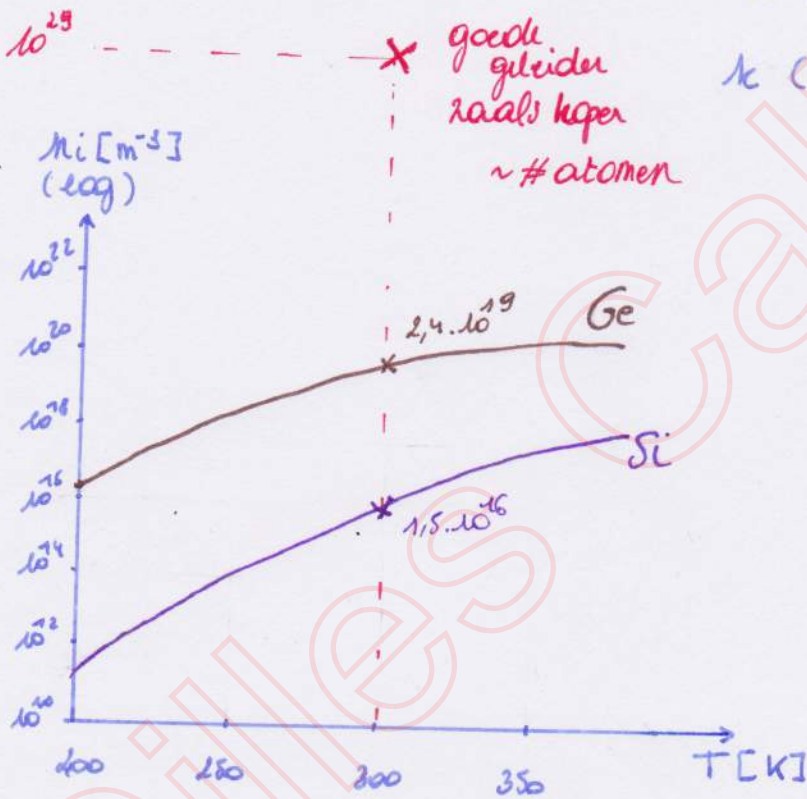
T [K]

E_G (kloofenergie) [J of eV]

k (const. v. Boltzmann)

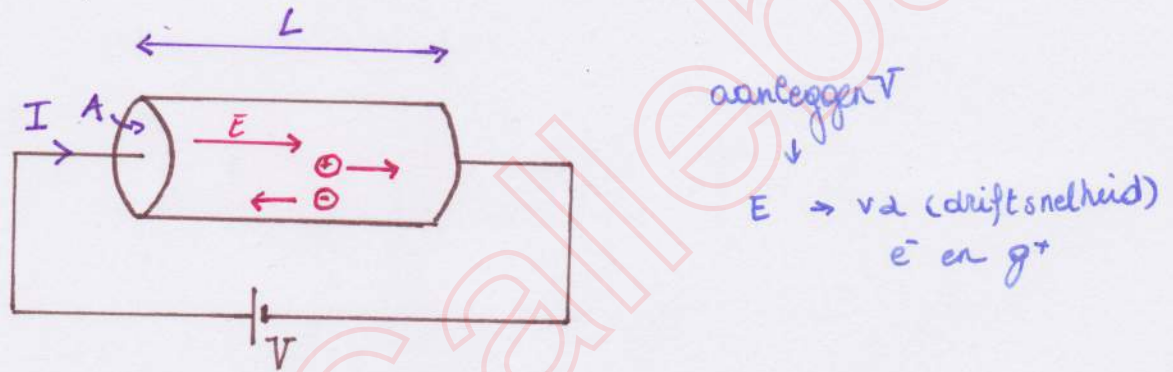
$$k = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$$

$$= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$



Elektrische stroom door een intrinsieke halfgeleider

Berekening vd stroom



Voor e^- : $v_{d,n} = \mu_n E$
 Voor g^+ : $v_{d,p} = \mu_p E$
 met $E = \frac{\text{hoeveelheid kracht}}{\text{eenheids lading}}$



$|E| = \frac{V}{L}$
 \rightarrow beweging $e^- \propto g^+$
 links rechts

met $I_p = \frac{\rho_0 e L A}{\tau}$ } hoeveelheid lading

$I = I_p + I_n$

met $\tau = \frac{L}{v_{d,p}}$



$I = (\rho_0 v_{d,p} + n_0 v_{d,n}) e A$

$I = n_i (\mu_p + \mu_n) e \frac{A}{L} V$

\downarrow
 $R = \frac{1}{n_i (\mu_p + \mu_n) e} \frac{L}{A} \rightarrow \rho_i = \frac{1}{n_i (\mu_p + \mu_n) e}$

Mobiliteit der ladingsdragers

$\mu_n > \mu_p$ + invloed v.h. gebruikt materiaal + temp. afh.

Invloed vd temperatuur

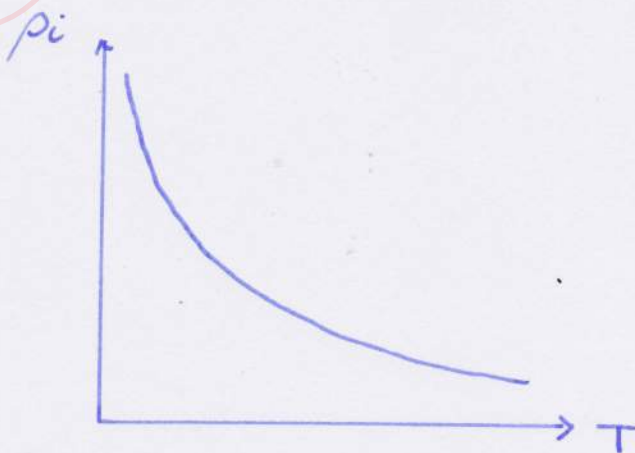
- $n_i = K_M \cdot T^{3/2} e^{-\frac{E_G}{2kT}}$ → $T \uparrow$ → $n_i \uparrow$ (exp.) → $\rho \downarrow$
- mobiliteit \downarrow als $T \uparrow$ door sterkere trilling vd deeltjes → hinder in beweging

↳ $\rho \uparrow$

⇒ n_i toename \gg μ afname (by $T \uparrow$)

→ globaal $T \uparrow$ → $\rho \downarrow$ (exp)

→ NTC-weerstand (Negativ Temp. coefficient)



Resistiviteit ve intr. halfgeleider

Foto-elektrische effecten

sprong valentie \rightarrow conductieband.

- energie door kristal (in zijn geheel)

\hookrightarrow verdeeld onder de dultjes

$$E_{\text{elektron}} < E_G \rightarrow \text{maar sommige} \quad \text{toch} \geq E_G$$

\uparrow
thermische generatie

- energie direct overgedragen op de valentie- e^-

- belicht $\omega \rightarrow E_{\text{photon}} \quad f_0 = \frac{E_G}{h}$ (minstens een golflengte van f_0)

\hookrightarrow foto-elektrische generatie \sim lichtintensiteit
(bovenop therm. gen.) \rightarrow therm. evenw. verbroken $p = n > n_i$

- botsing ve vrije $e^- \rightarrow$ door elektrisch veld

$$\hookrightarrow E \uparrow \rightarrow v_d \uparrow$$

\hookrightarrow lawine-effect

ongecentreerd vermenigvuldigen van vrije e^-

- hoge elektrisch veld

\hookrightarrow losrukken uit covalente binding

\hookrightarrow Zener effect.

LDR - light dependant Resistor

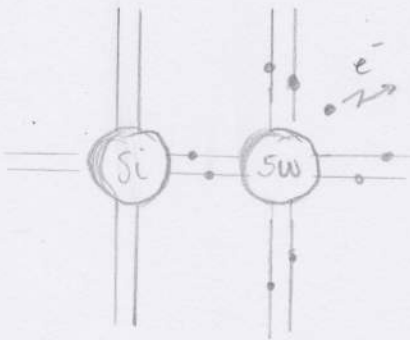
\hookrightarrow lichtintensiteit $\uparrow \rightarrow$ # vrije ladingdragers \uparrow

$$\downarrow \\ \rho \downarrow$$

Hoofdstuk 3

Extrinsieke halfgeleiders

N-Halfgeleider



Doperen met een 5-waardig atoom:

- vijfde valentie-elektron vast aan 5-waardig atoom, maar veel zwakker

→ alle 5^{de} e⁻ vrij bij 200K

↑
vermits u de doperingsgraad kennen → # vrije e⁻ ook gekend

resistiviteit goed inschatten ←

- Ook gat-elektron paren (therm. gen)
- Temp. beïnvloed het # niet/weinig

→ De stroom wordt gedragen door de elektronen.

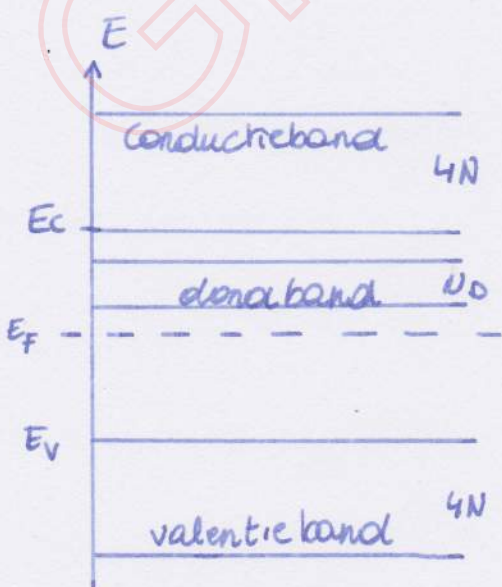
Opm.: De introductie van 5-waardig atoom mag de halfgeleider structuur niet wezenlijk verstoren
dopering \sim 100.000.000.000 onzuiverheidsgraad → maskeren onzuiverheid

elektron afstaan \rightarrow (vastzittend) positief ion achter
 \downarrow
 Donors \neq gat

thermisch evenwicht:

- N_D vaste, positieve ionen
 - p_0 gaten door therm. gen.
 - n_0 vrije e^- afkomstig van
 - geïoniseerde ionen
 - therm. gen.
- $n_0 = N_D + p_0$

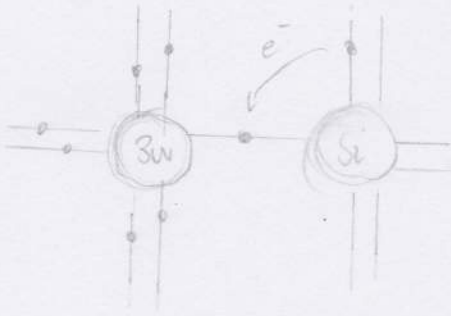
- \Rightarrow
- e^- in N-halfgeleider
 Meerderheidsdragers / Majoriteiten
 ladings
 - p_0 in N-halfgeleider
 minderheidsdragers / minoriteiten



op 2 manieren in cond. band:

- donorband
 In de donorband blijven g_n gaten achter!
- valentieband
 therm. gen.
 (bewegelijke) gaten achter

P-Halfgeleider



Doperen met een 3-waardig atoom:

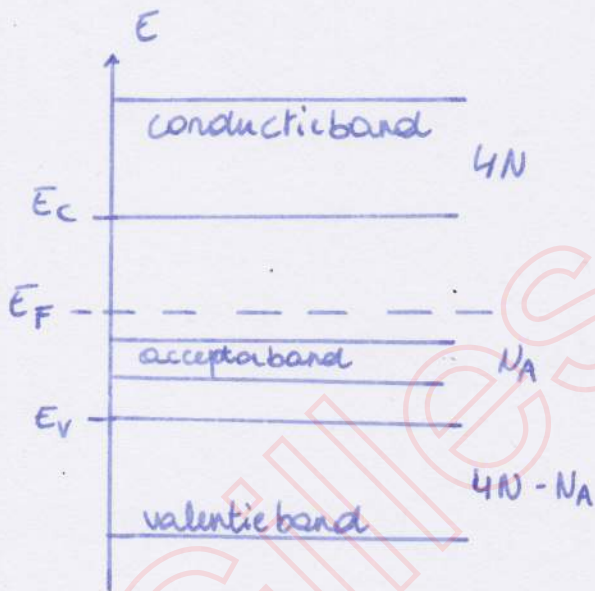
- 4 de paar vervullen
- ↳ aantrekken van e^-
- ↳ verbuiken covalentebinding

↓
ontstaan van gat

↳ ontstaan neg. ion

↓
geen bewegelijke lading
↳ acceptor

$$N_A = \# \text{ acceptors}$$



e^- valentie \rightarrow acceptor

↓
gat overblijven

↓
bijdragen tot geleiding

- N_A vaste, negatieve ionen

- n_0 e^- (therm. gen.)

- $p_0 = N_A + n_0$ (doping + therm. gen.)

⇒

- gaten in P-halfgeleider

meerderheidsladingsdragers / majoritairen

- elektronen in P-halfgeleider

mindereheidsladingsdragers / minoritairen

Aantal ladingdragers in exte. halfgeleider

door doping onderdrukt men het aantal minoritairen

therm. evenwicht:

generatie = recombinatie

$$G(T) = R(T) \rightarrow \bar{n}t \text{ beïnvloed door dopingsatomen}$$

$$G_{\text{ext}}(T) = G_{\text{in}}(T) \quad R_{\text{ext}}(T) = R_{\text{int}}(T)$$

$$\rightarrow R(T) = G(T) \cdot p_0 n_0$$

$R(T) \sim$ product aanwezig pos. & neg. vrij ladingdragers

want $p_0 n_0 T \rightarrow$ grader of kans of recombinatie

$$\rightarrow R_{\text{ext}}(T) = G(T) p_0 n_0$$

$$\rightarrow R_{\text{int}}(T) = G(T) n_i^2$$

$$\hookrightarrow p_0 n_0 = n_i^2$$

P-type

N-type

$$p_0 = N_A + n_0$$

$$n_0 = N_D + p_0$$

$$\downarrow$$
$$n_0 = \frac{n_i^2}{N_A + n_0} = \left(\frac{n_i}{N_A + n_0} \right) n_i$$

$$p_0 = \left(\frac{n_i}{N_D + p_0} \right) n_i$$

Dus. $n_0 \ll n_i$

$p_0 \ll n_i$

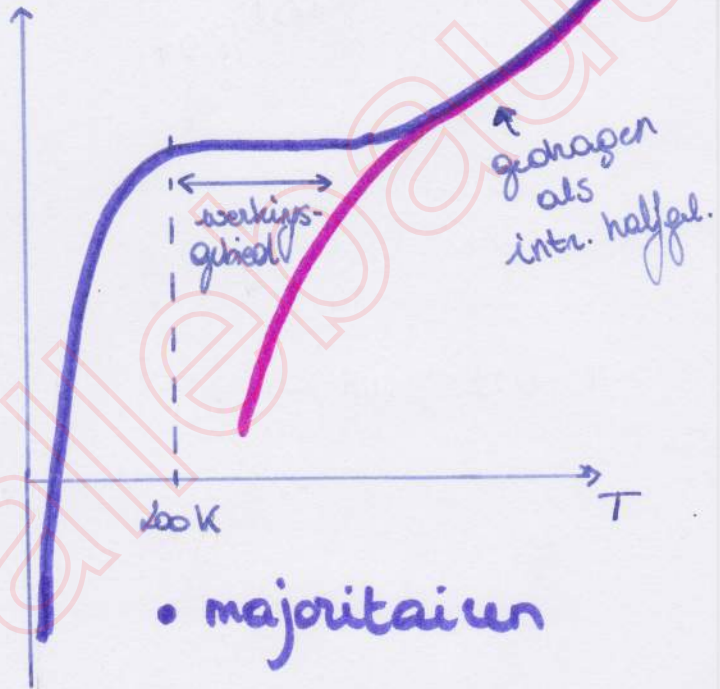
Het aantal minoritairen \ll intrinsieke ladingconc.

Invløed vd temp. op het aantal ladingsoverdragers



n_i sterk toeneemt met stijgende temp.

(eeg)
 p_0, n_0



• majoritair

• minoritair

invloed v. therm. gen. n_t te verwaarlozen

Gilles

Driftstroom draaien en extr. halfgeleider

↳ beweging vd
meerderheidsladingsdragers

P- halfgeleider:

N- halfgeleider:

$$I = N_A \mu_p e \frac{A}{L} v$$

$$I = N_D \mu_n e \frac{A}{L} v$$

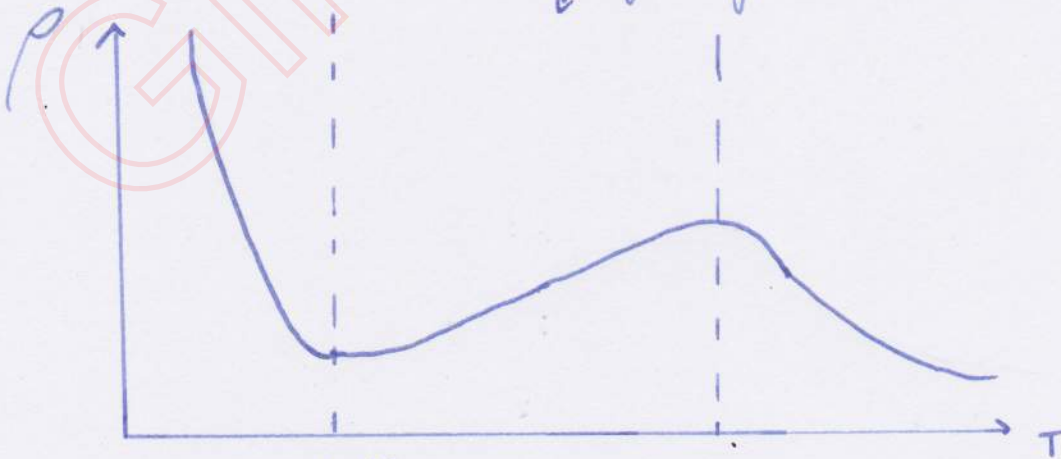
↓
mobilititeit

$$\rho_p = (N_A \mu_p e)^{-1}$$

$$\rho_n = (N_D \mu_n e)^{-1}$$

• invloed T → μ als T ↑ → μ ↓ → ρ ↑

↳ gedragen als PTC



dopings-
atomen
geïoniseerd is

vrije ladings-
dragers ≈ ct.
terwijl
mobilititeit ↓

gen. gat-elektron paren
zo groot

therm. gen. ladingsdragers

↳ dopingsgraad

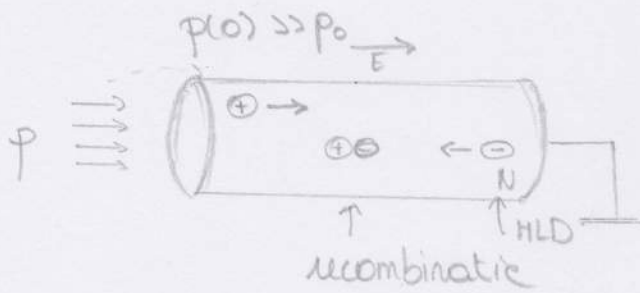
→ intr. halfgeleider
(gedragen)

ρ ↓ omdat vrije ladings-
dragers ↑

Diffusiestroom doorheen een extr. halfgeleider

↳ door elektrisch veld

↳ concentratiegradient



N-halfgeleider

Wet van Fick:

$$\tilde{J}_d = -D \nabla c$$

$$J = -Dq \nabla c$$

Labels for the first equation:

- \tilde{J}_d : dultjesstroom [$1/m^2 \cdot s$]
- D : diffusiecoëf. "geïntegreerd met de snelheid $\cdot (T)$
- ∇c : concentratie [$1/m^3$]
- Annotation: stroom van hoog naar laag (conc.)

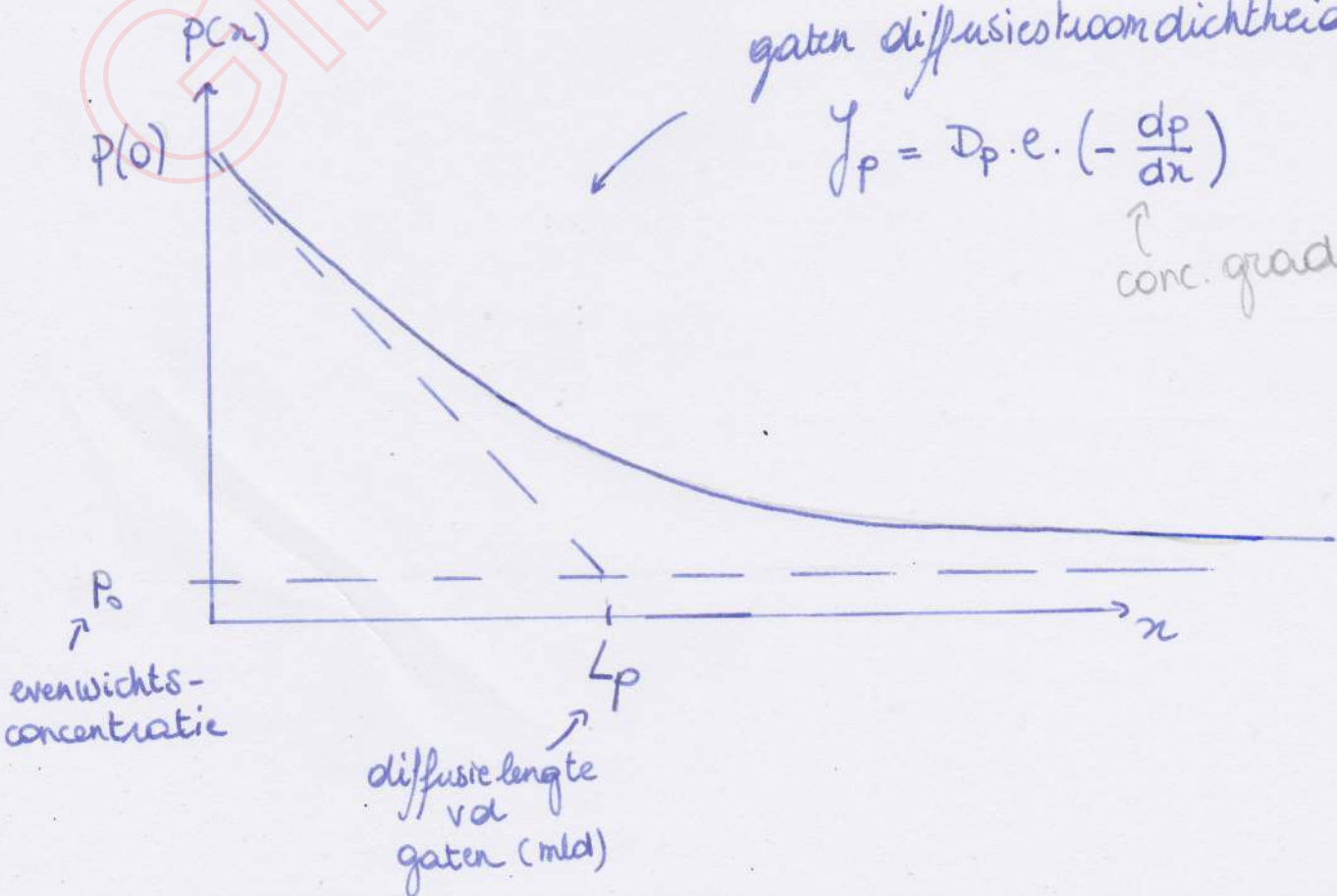
Labels for the second equation:

- J : ladingsstroom
- $Dq \nabla c$: diffusiestroom

gaten diffusiestroomdichtheid:

$$J_p = D_p \cdot e \cdot \left(-\frac{dp}{dx} \right)$$

↑ conc. gradient



De gatendiffusiestroom:

$$I_p = -A e D_p \frac{dp}{dx}$$

\nearrow grootst bij $x=0$
 \searrow $\bar{w} \approx 0$ bij $x \gg L_p$ (evenwichts conc)

bij $x \ll L_p$:

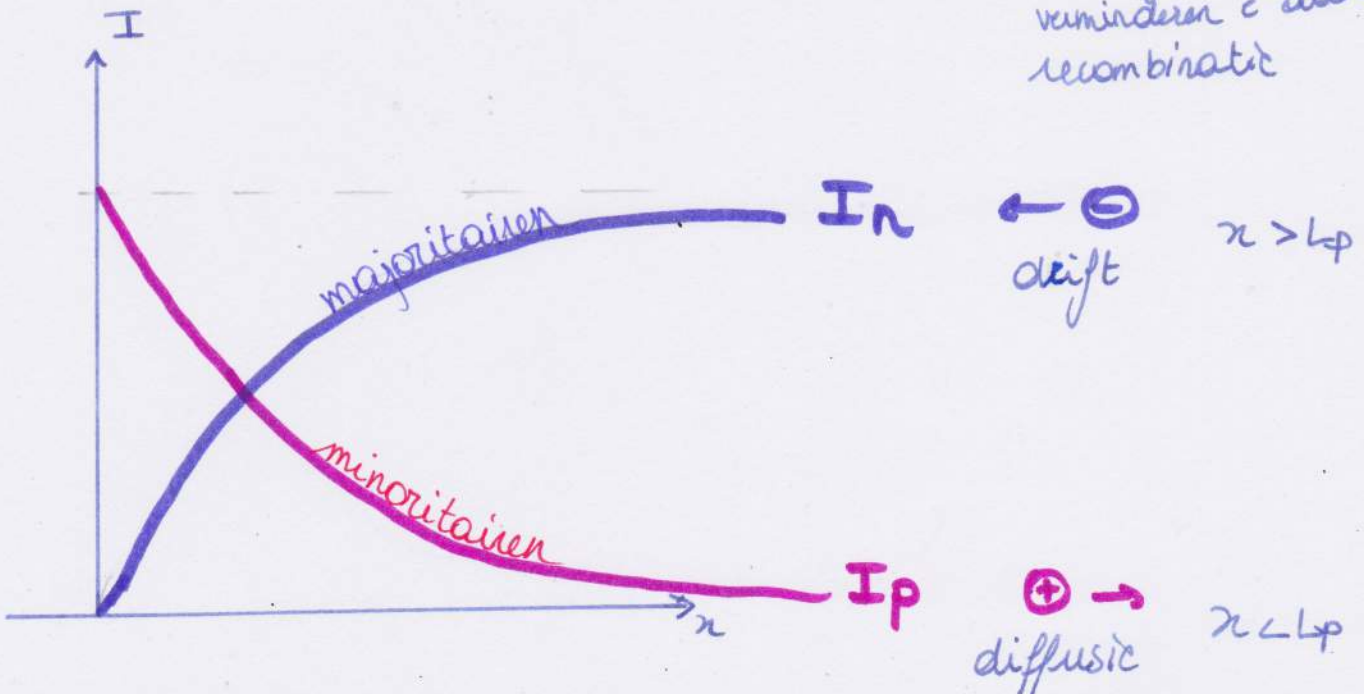
$$I_p = -A e D_p \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = A e D_p \frac{p(0) - p_0}{L_p} \approx A e D_p \frac{p(0)}{L_p}$$

in dit gebied: conc gaten \rightarrow door sterke recombinate \rightarrow therm. energie
 \downarrow
 conc. majoritairen \rightarrow

bij $x \gg L_p$:

\hookrightarrow praktisch $\bar{p} \approx$ diffusie door $p_0 = ct.$

driftstroom: $I_n = N_D e A \mu_n E$ \leftarrow door aanwezigheid E
 door neemt aan gaten \rightarrow verminderen \bar{c} door recombinate



Hoofdstuk 4

Beschouwingen ivm de energetische toestand van vrije ladingstraggers

De Fermi-Dirac distributie

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

energie Fermi-niveau $\rightarrow E = E_F \rightarrow F = 50\%$

gem. therm. energie van e^-

Fermi-factor
probabiliteit dat
een niveau met energie E
bezet is door een e^- .

$E \uparrow$ dan $F \downarrow$

Opmerking

$$E_G = e \cdot V_G$$

lading. potentiaal

\rightsquigarrow potentiaal kloof

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$V_T = \frac{kT}{e}$$

intr. lading.

$$n_i = K_H T^{3/2} e^{-\frac{eV_G}{2kT}} = K_H T^{3/2} e^{-\frac{V_G}{2V_T}}$$

bij kamertemp (300K): $kT = 4,14 \cdot 10^{-21} \text{ J} = 0,0258 \text{ eV}$

$$V_T = 0,0258 \text{ V} \approx 25 \text{ mV of } 26 \text{ mV}$$

Deel II

De PN-junctie

gilles allebaut

Hoofdstuk 5

P- en N- halfgeleiders

voornaamste eigenschappen:

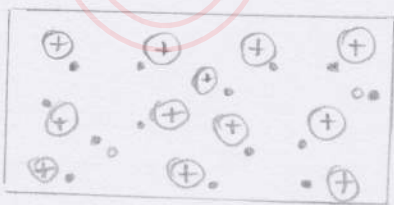
- Intrinsieke halfgeleider → zuiver
→ # gaten = # elektronen (vrije)
→ evenwicht: n_i
↳ sterk T-afh.

• P- halfgeleider



- doperen 3-waardige acceptors
- gaten zijn de MLD
vrije e^- zijn de mld
- acceptors, e^- opgenomen
↳ vaste neg. ionen N_A

• N- halfgeleider



- doperen 5-waardige donors
- vrije e^- MLD
gaten mld
- donors, gaten afgestaan
↳ vaste pos. ionen N_D

Er geldt nu:

$$p_0 n_0 = n_i^2$$

$$n_0 \approx N_D(N) \quad n_0 \approx N_A(P)$$

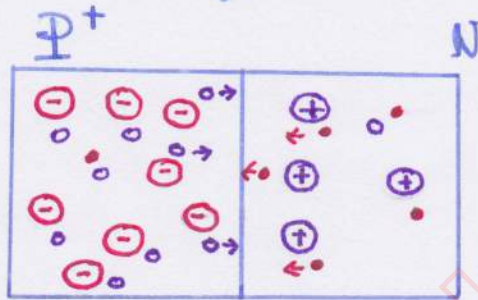
$$p_0 \approx \frac{n_i^2}{N_D} \ll N_D(N) \quad n_0 \approx \frac{n_i^2}{N_A} \ll N_A(P)$$

- vrij gat
- vrij elektron
- ⊖ vast neg. ion
- ⊕ vast pos. ion

Hoofdstuk 6

Vorming van de PN-junctie

Diffusie
↳ HLD

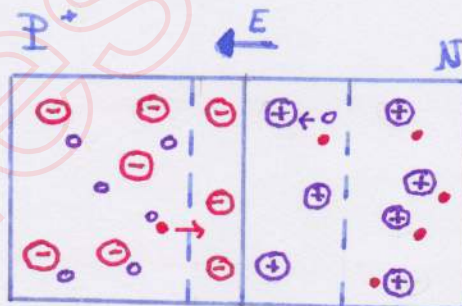


de HLD diffunderen naar het ander gebied
ontstaan door een zeer sterke concentratiegraadient

↳ HLD in ander gebied med

↳ verdwijnen door
recombinatie

Drift
med



uitputtings-
gebied

vaste ladingdragers → ontstaan elektrisch veld

↓
afremmen diffusie

→ E bevordert de
drift beweging vd mld

Hoofdstuk 7

Eigenschappen van de PN-junctie

Beschouwingen in verband met de
breedte van het uitputtingsgebied

uitdrukking elektrische neutraliteit
i.h. uitputtingsgebied:

$$N_A |OA| (-e) S + N_D |OB| (+e) S = 0$$



$$\Rightarrow N_A |OA| = N_D |OB|$$

↳ uitputtingsgebied
diepste uitstrekt in
minst gedopeerd gebied

E-veld veroorzaakt door de vaste ionen

↓

elektrisch potentiaal verschil

elektrisch veld:

$$\nabla \cdot D(r) = \rho(r)$$

met

$$D(r) = \epsilon_0 \epsilon_r E(r)$$

↓

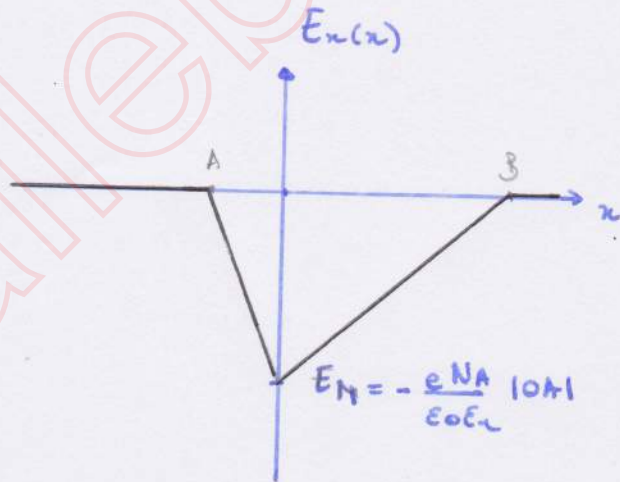
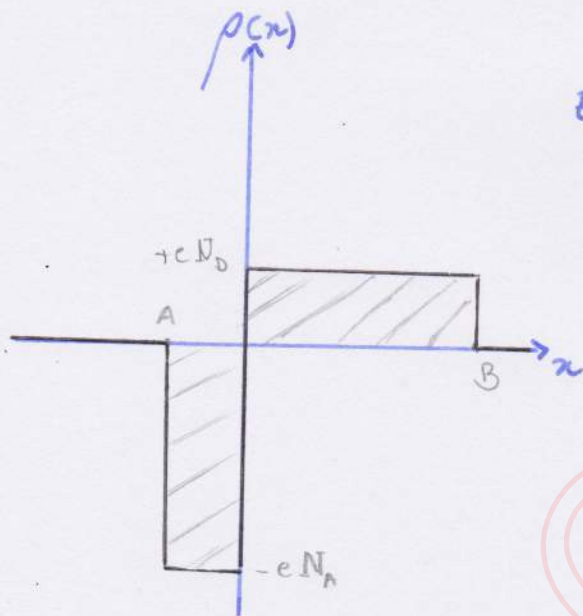
$$\nabla \cdot E(r) = \frac{\rho(r)}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Halbleiterkristall perfect zylindrisch:

$$\nabla \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0 \epsilon_r} \rightarrow \frac{dE_x(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

ladungsdichte

$$E_x(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_r} dx$$



Vor $x < -|0A|$: $E_x(x) = 0$

Vor $x \in [-|0A|, 0]$: $E_x = \int_{-|0A|}^x -\frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} dx \rightarrow E_x = -\frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} (x + |0A|)$

Vor $x \in [0, |0B|]$: $E_x = \int_0^x \frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} dx - \frac{eN_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} |0A|$

$$\rightarrow E_x = e \frac{N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} x - e \frac{N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} |0A|$$

Vor $x = |0B|$:

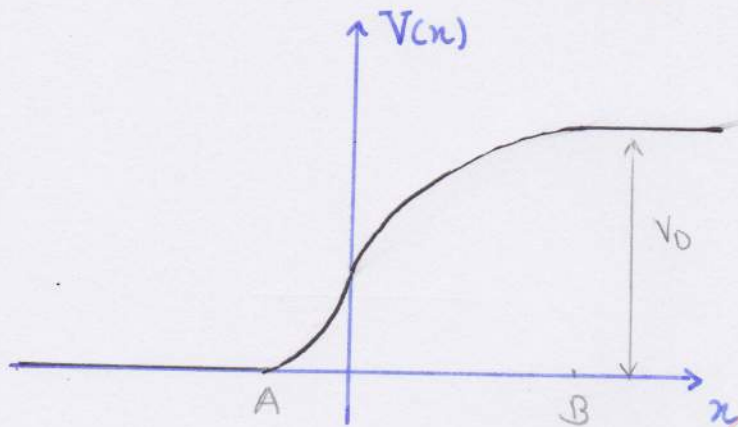
$$0 = e \frac{N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} |0B| - e \frac{N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} |0A|$$

↓

$$N_D |0B| = N_A |0A|$$

Potentiaal

$$\vec{E} = -\nabla V \rightarrow V(x) = -\int E_x(x) dx + cte.$$



voor $x < -|OA|$: $V(x) = 0$ of x bij conventie

voor $x \in [-|OA|, 0]$:
$$V(x) = \int_{-|OA|}^x \frac{e N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} (x + |OA|) dx$$

$$\rightarrow V(x) = \frac{e N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} \left[\frac{x^2}{2} + |OA|x + \frac{|OA|^2}{2} \right]$$

voor $x \in [0, |OB|]$:
$$V(x) = -\frac{e N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \int_0^x x dx + \frac{e N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} |OA| \int_0^x dx + \frac{e N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{|OA|^2}{2}$$

$$V(x) = -\frac{e N_D}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{x^2}{2} + \frac{e N_A}{\epsilon_0 \epsilon_r} |OA| \left(x + \frac{|OA|}{2} \right)$$

voor $x > |OB|$:

$$\left(N_A |OA| = N_D |OB| \right)$$

$E=0 \rightarrow V=cte.$
diffusie-
potentiaal

$$\rightarrow V_D = \frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon_r} \left[N_A |OA|^2 + N_D |OB|^2 \right]$$

$$b = |OA| + |OB|$$

$$N_A \cdot b = N_A |OA| + N_D |OB|$$

$$V_D = \frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon_r} b^2 \frac{1}{\left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}$$

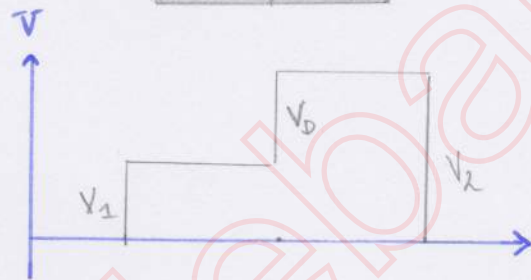
$$|OA| = \frac{N_D \cdot b}{N_A + N_D} \quad |OB| = \frac{N_A \cdot b}{N_A + N_D}$$

Polarisatie van een PN-junctie

Ingepolariseerde junctie

verbinden via Ohmse contacten

↓
contactpotential
(onafh. stroom)



1) diffusiestroom HLD $P \rightarrow N$

2) driftstroom mbd $N \rightarrow P$

↳ netto geen stroom

Voorwaarts gepolariseerde junctie

P-gebied op hogere potentiaal

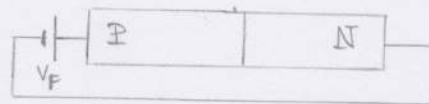
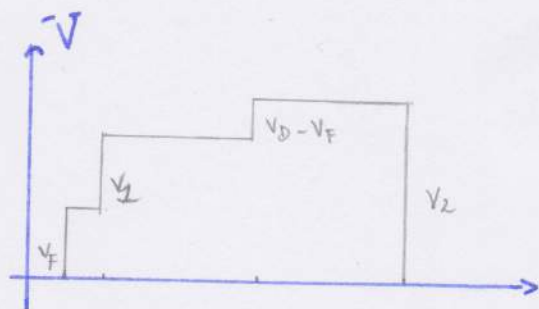
potentiaal junctie: $V_0 - V_F$

↑ nooit groot is

potentiaal sprong is kleiner

↳ diffusie HLD minder afgeremd

↳ voorwaartse stroom:



gaten $P \rightarrow N$

e^- $P \leftarrow N$

→ diffusiestroom $P \rightarrow N$

Invers gepolariseerde junctie

P-gebied op lagere potentiaal dan het N-gebied

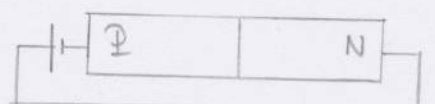
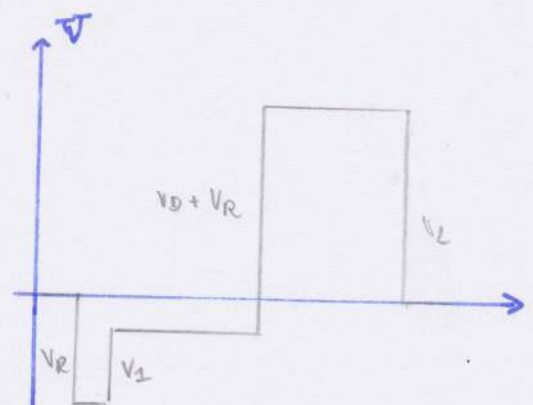
potentiaal junctie: $V_0 + V_R$

potentiaal sprong \gg diffusie potentiaal

↳ enkel nog driftstroom mbd

→ driftstroom $P \leftarrow N$

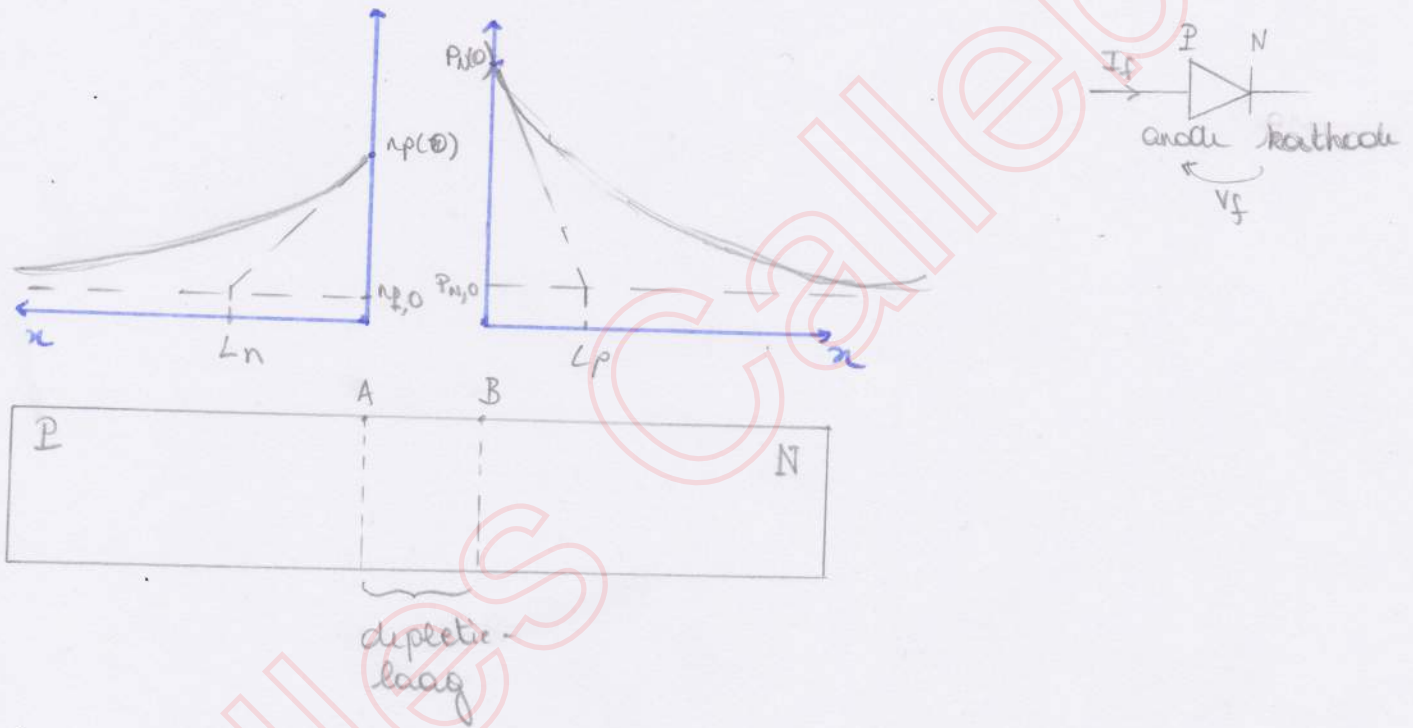
zeer klein.



Hoofdstuk 8

Stroomdoorgang doorheen de PN-junctie

Verloop van het aantal minoritairen in P- en N-gebieden



$$n(A) = n_p(0) = n_{p,0} e^{\frac{V_f}{V_T}}$$

met evenw. conc. med

$$n_{p,0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$p(B) = p_n(0) = p_{n,0} e^{\frac{V_f}{V_T}}$$

$$p_{n,0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

- De minority carriers diffunderen doorheen het gebied waarin ze geïnjecteerd \bar{w} → hun # neemt exp. af.
- dicht bij uitputtingsgebied → diffusiestroom v. med

Stroom door de P-N-junctie en de diodevergelijking

Stromen door een voorwaarts gepolariseerde junctie

- binnen uitputtingsgebied: $\left. \begin{array}{l} \text{elektronenstroom} = ct. \\ \text{gatenstroom} = ct. \end{array} \right\} \text{g\u00e9n recombinatie}$

• N-gebied:

- gatenstroom $I_{p,N} = \text{diffusiestroom v. gaten}$

- elektronenstroom $I_{n,N}$

→ $I_n(0)$ elektronenstroom door uitputtingsgebied

P ← N door bron

→ exp. verlopend

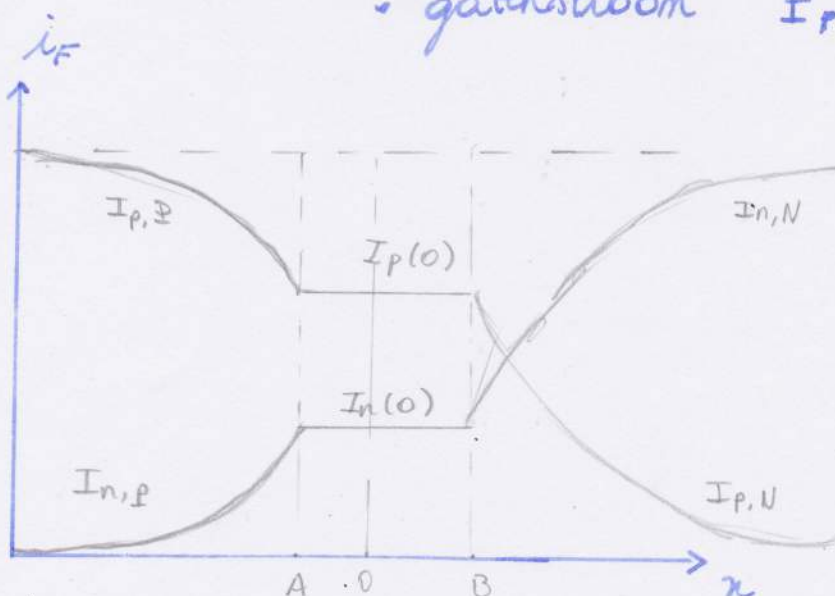
beweging e^- om verdwijning door recombinatie met de geïnjecteerde gaten aan te vullen.

• P-gebied:

- elektronenstroom $I_{n,P} = \text{diffusiestroom v. } e^-$

P → N door bron

- gatenstroom $I_{p,P}$ (analoog e^- -stroom N)



links van A:

$$I_{p,P} + I_{n,P} = i_F$$

rechts van B:

$$I_{p,N} + I_{n,N} = i_F$$

binnen uitp. gebied:

$$I_p(0) + I_n(0) = i_F$$

Berekening van de diodevergelijking

deelstromen aan rand:

- $I_p(0)$: diffusiestroom v. gaten = $I_{p,N}(B)$
- $I_n(0)$: diffusiestroom v. e^- = $I_{n,P}(A)$

stroomdoorgang door halfgeleider (deel I):

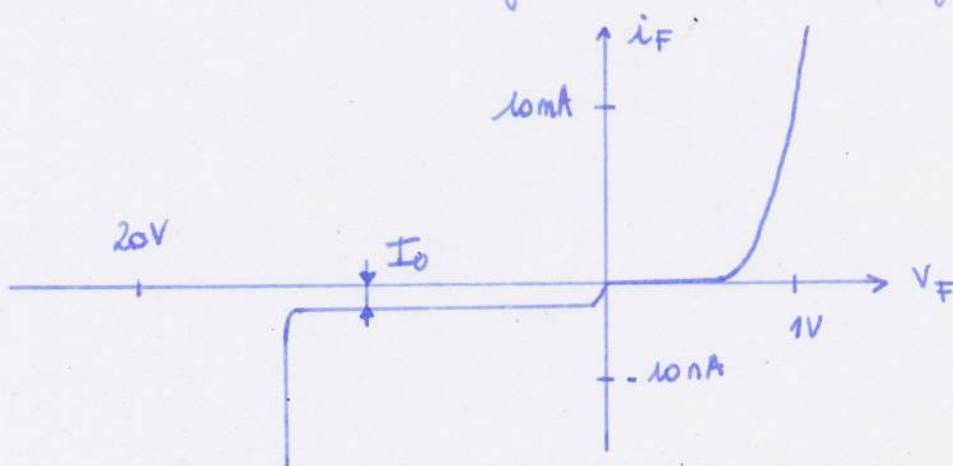
$$\bullet I_{p,N}(B) = A e D_p \frac{p_N(0) - p_{N,0}}{L_p} = A e \frac{D_p p_{N,0}}{L_p} \left\{ e^{\frac{V_F}{kT}} - 1 \right\}$$

$$\bullet I_{n,P}(A) = A e \frac{D_n}{L_n} n_{P,0} \left\{ e^{\frac{V_F}{kT}} - 1 \right\}$$

$$\Rightarrow i_F = I_0 \left\{ e^{\frac{V_F}{kT}} - 1 \right\} \quad \text{met } I_0 = A e \left[\frac{D_p}{L_p} p_{N,0} + \frac{D_n}{L_n} n_{P,0} \right]$$

↑
inverse
saturatiestroom

met instelling: breedte P-N-gebied > resp. diffusielengtes



state van polarisatie
($V_F > 0,1\text{ V}$)

$$\downarrow$$
$$i_F = I_0 e^{\frac{V_F}{V_T}}$$

De inverse saturatiestroom

$$\hookrightarrow i_f = -I_0$$

$$\text{met } I_0 = A_e \left[\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right] n_i^2$$

intrinsieke
ladingsschegescalc.
↳ sterk T afh.

Opmerkingen

1. de Ohm'se spanningsval buiten de uitputtingslaag, en de afwijkingen van toestand van lage injectie: belangrijk bij hoge stromen.
 - de combinatie α de therm. gen. binnen uitputtingslaag
 - opp. stromen, die parallel met de stroom doorheen de uitputtingslaag vloeien

↳ afwijkingen van beschreven diodevergelijking

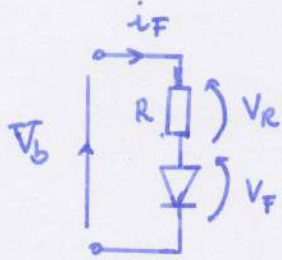
2. als $p_{i,0} \gg n_{p,0} \rightarrow$ stroom getrokken door gaten
de sterkst gedopeerde zijde injecteert naar majoritairen in de minst gedopeerde zijde.

3. spanning over diode : $V_D - V_f$

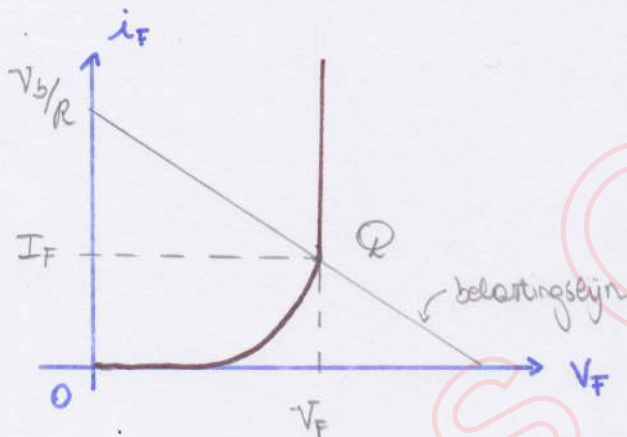
↳ inverse pol. $\rightarrow V_f < 0$

$\rightarrow V_f \gg 0 \rightarrow$ uitputtingsgebied \leftrightarrow

Studie van eenvoudige netwerkjes met één diode



Grafische bepaling vd diodestroom



$$V_b = V_R + V_f$$

$$V_b = R I_f + V_f$$

$$i_f = I_0 \left\{ e^{\frac{V_f}{V_T}} - 1 \right\}$$

Gebuijk van een gelineariseerd model



$$\begin{cases} V_f = V_{TH} + R_i i_f & (\text{vw gepol.}) \\ V_b = R I_f + V_f \end{cases}$$

$$\rightarrow i_f = \frac{V_b - V_{TH}}{R + R_i} \approx \frac{V_b}{R} \quad \text{vermits } \begin{matrix} V_{TH} \ll V_b \\ R_i \ll R \end{matrix}$$

Conductantie van een diode bij kleine signalen

$$i_f = g v_f \quad \text{mits } v_f \text{ kleine spanningsschommelingen}$$

↑ conductantie

$$i_F = I_F + i_f = I_0 \left\{ e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right\} = I_0 \left\{ e^{\frac{V_F + v_f}{V_T}} - 1 \right\}$$

↓ Taylor-reeks van V_F

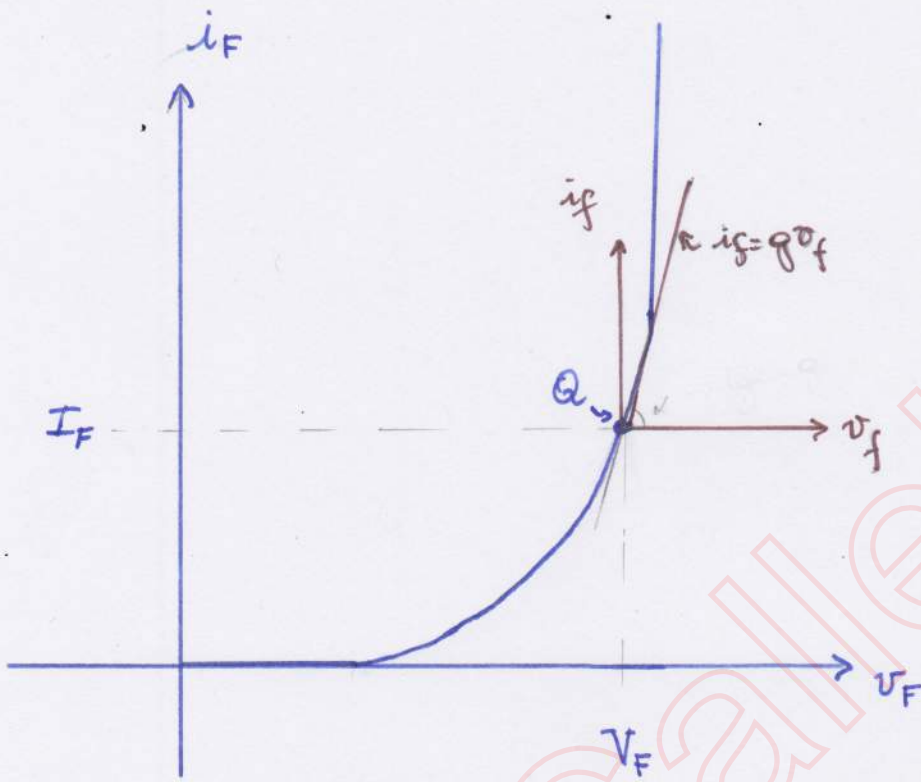
$$i_F(V_F + v_f) = i_F(V_F) + \sum_{n=1}^{+\infty} \left. \frac{d^n i_F}{dV_F^n} \right|_{V_F=V_F} \cdot \frac{(v_f)^n}{n!}$$

$(V_F + v_f - V_F)$
↑
 $(v_f)^n$

$$i_F \approx \overset{I_F}{i_F(V_F)} + \underbrace{I_0 e^{\frac{V_F}{V_T}}}_{i_f} \cdot \frac{v_f}{V_T}$$

naauwkeurig als $\frac{v_f}{V_T} \gg \left(\frac{v_f}{V_T}\right)^2 \frac{1}{2} + \left(\frac{v_f}{V_T}\right)^3 \frac{1}{3!} + \dots$
($v_f \ll$)

$$\hookrightarrow g = \frac{i_f}{v_f} = \frac{I_0 e^{\frac{V_F}{V_T}}}{V_T} = \frac{1}{V_T} \{ I_F + I_0 \} \approx \frac{I_F}{V_T}$$



- gelykspanningsbron \rightarrow instelpunt (Q)
- wisselspanningsbron \rightarrow via g
- totale spanning & stroom \rightarrow

$$\begin{cases} i_F = I_F + i_f \\ v_F = V_F + v_f \end{cases}$$

Hoofdstuk 9

Doorslag van de PN-junctie

Oorzaken van doorslag

- lawine doorslag:
(hogere spanningen)
> 8V

sterke inverse polarisatie

↳ dreedte sperslaap ↑ → n_t meer verwaad.
t.o.v. de vrije
weglengte vd
ladingdrogers

• bewegende ladingdrager

↓ botsen
vastzittende deeltjes

vorming gat-elektronpaar

↓
lawine-effect

- Zener doorslag:
(lage inverse spanningen)
< 4V

• zeer sterke doping vd gebieden

↓ te hoge veldsterkte vd uitp. laag

e^- losrukken

temp: ↑

Zener doorslag ↓ (doorslag spanning daalt)

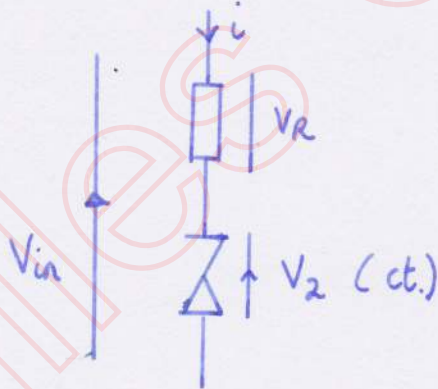
lawine doorslag ↑ (doorslagspanning stijgt)

maximale veldsterkte: $|E_M| = \sqrt{\frac{2\epsilon}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} (V_D + V_R)}$

inverse spanning
positief
bij inverts

Zenerdiodes

- zenerdiode \rightarrow beperkt vermogen dissiperen
- kleine klemspanning \rightarrow voldoende stroom (stabiele deelvreespanning)
- grootste ingangsspanning \rightarrow stroom \ll toelaatbare stroom



Hoofdstuk 10

Foto-elektrische effecten

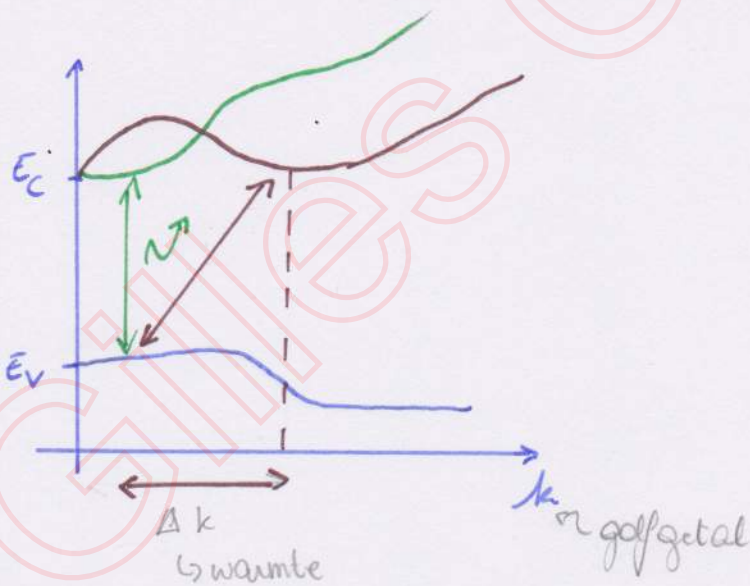
Light-Emitterende-Diodes - LEDs

diode $VW \rightarrow$ veel minder in P-N-gebied geïnjecteerd.

\hookrightarrow recombineren met de majoriteiten

\hookrightarrow terugval in conductieband \rightarrow valentieband

\hookrightarrow Energie vrijkomen



• indirecte-kloof materialen

$E_n \rightarrow$ kristalrooster
= warmte (ok)

• directe-kloof materialen

$E_n \rightarrow$ fotonen

1) behoud v. energie

2) behoud v. impulsmoment \rightarrow direct
 \searrow indirect

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

Fotodiode

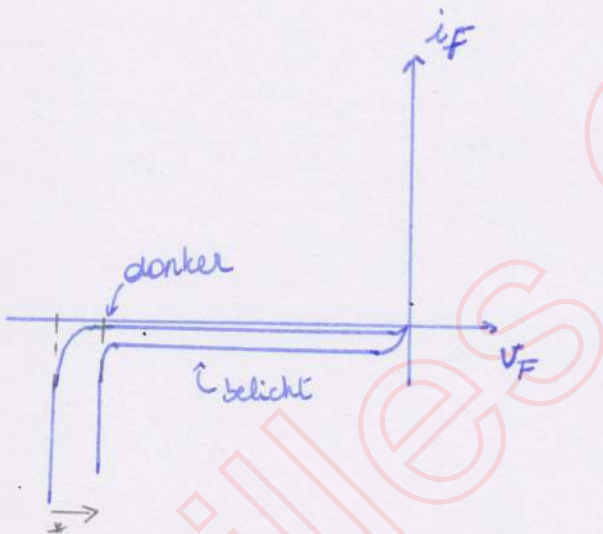
λ (kort)
PN-junctie

→ covalente binding breken
door absorptie foton

→ i.d. buurt of in
uitputtingsgebied

↓ zoals de minoritairen
afroepen door het E

invers gepolariseerd: → I_0 (driftstroom minoritairen)



• ver beneden naar doorslagspanning

$I_0 \approx$ invallend licht

nadelen: - $I_0 \approx$ lichtsterkte \approx lineair

- temp. variaties ook
invloed

- zeer kleine stromen

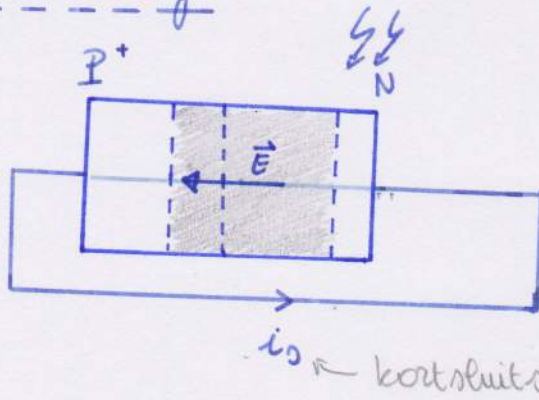
• dicht bij doorslagspanning
(donker - toestand)

licht → $I_0 \uparrow$ → doorslagspanning*
verminderen

⇒ meten & detecteren van lichtintensiteiten & lichtpulsen

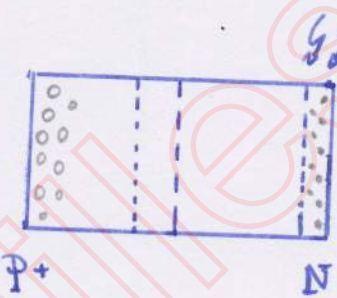
Fotovoltaïsche cellen

Kortsluiting



← gaten
elektronen →
driftstroom v. minoritairen ↑
i.f.v. invallend licht

Open kring



evenwicht → drift
→ diffusie

↳ nulllastspanning over PN-junctie
↷ i.f.v. lichtintensiteit

drift foto-elektr. gegenereerde
ladingdragen

↳ extra gaten → P
e → N

vanuit uitputtingsgebied

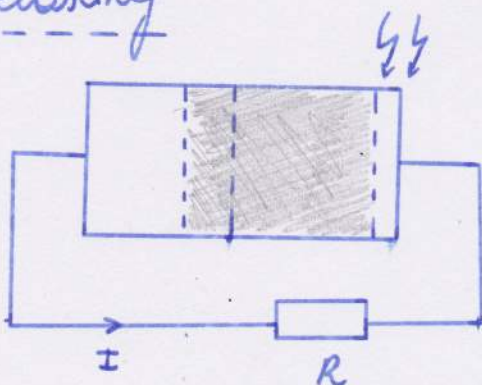
→ \bar{n} naar buiten

↳ Potentialaverschil

$V_P > V_N \rightarrow$ verkleinen \vec{E} i.h.
uitputtingsgebied

↳ diffusie stroom ↑

Belasting



$I < I_s$

$V_R <$ nulllastspanning

$P_R \nearrow$ i.f.v. intensiteit licht ↑