

LELEC 1755

Compléments d'électricité

Partie 2 : Dispositifs électroniques
Prof. Denis Flandre
ICTEAM / ELEN (*microélectronique*)

Bâtiment Maxwell
E-mail : denis.flandre@uclouvain.be

2020-2021

D. Flandre

1

1

Table des matières

- introduction
- conduction dans les solides
- semi-conducteurs et dopage
- jonction PN
- Technologie ?
- transistor bipolaire à jonctions
- transistor MOS
- circuits intégrés ?

2020-2021

D. Flandre

2

2

La conduction dans les solides

une tension ou différence de potentiel va produire un courant, qui est le déplacement de charges sous l'action du champ électrique

- ☐ introduction
- ☒ conduction dans les solides
- ☐ semi-conducteurs et dopage
- ☐ jonction PN
- ☐ technologie
- ☐ transistor bipolaire
- ☐ transistor MOS
- ☐ circuits intégrés

ces charges sont :

- dans le vide : des électrons libres
- dans un gaz ionisé : des électrons libres + des ions chargés positivement
- dans un liquide : des ions positifs et négatifs
- dans un solide : grande variété de porteurs de diverses mobilités
 - conducteurs
 - isolants
 - semi-conducteurs

2020-2021

D. Flandre

3

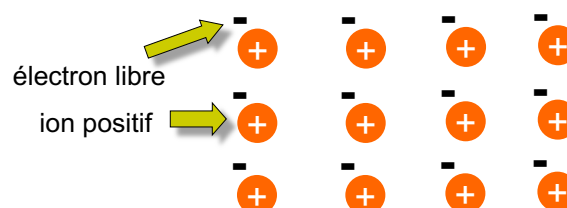
3

FSAB 1203 - Physique quantique

matériaux métalliques

Cu ou Al : atomes disposés régulièrement

⇒ cristal



atomes très proches les uns des autres

électrons de la couche externe : sous l'influence de **tous** ces noyaux, de façon indistincte

électrons non liés à **un** noyau particulier:

ils sont « **libres** »

2020-2021

D. Flandre

4

4

Porteurs libres dans un métal ?

$E_F = \mu$ (potentiel chimique)

$$(\mu - E_c)_0 = \frac{h^2}{8m_c} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}$$

Métal	Na	K	Ag	Cu
$(\mu - E_c)_0$ (eV)	3,1	2,1	5,5	7,2

Si la distance interatomique d d'un *métal monovalent* de structure cubique est connue (à l'aide de méthodes de diffraction de rayons X par exemple), alors $n = 1/d^3$

2020-2021

D. Flandre

5

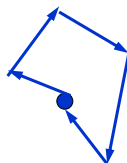
5

FSAB1201 Physique 1

mouvement des électrons (Brownien)

électrons libres = électrons de conduction

- zéro absolu : pas d'opposition au mouvement
⇒ résistance nulle (supra-conductivité)
- température ⇒ vibration des ions et mouvement des électrons + collisions (élastiques et non-élastiques) et échanges d'énergie :



à l'équilibre : déplacements aléatoires

⇒ mouvement moyen nul = pas de courant

2020-2021

D. Flandre

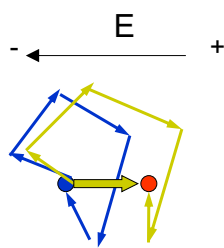
6

6

FSAB1201 Physique 1

vue microscopique : effet du champ électrique E

le champ électrique E (V/m) accélère les électrons entre les collisions \Rightarrow vitesse moyenne : $v = \mu (-E)$



$E = \text{force d'accélération}$

$\mu = \text{mobilité (entre les collisions) en } m^2/V.s$

densité de courant

$$J = n(-q)v = nq\mu E = \sigma E$$

Conductivité (Ω^{-1}/m)

$$\sigma = nq\mu$$

$n = \text{nbre de porteurs libres par unité de volume}$

2020-2021

D. Flandre

7

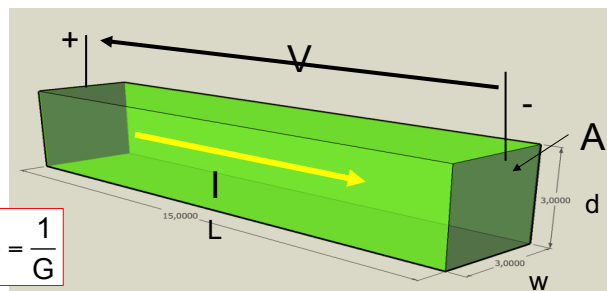
7

vue macroscopique : le courant dans un barreau

courant $I = J A$

avec $A = w \cdot d$

$$R = \frac{V}{I} = \sigma^{-1} \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{A} = \frac{1}{G}$$



- σ : conductivité du matériau [Ω^{-1}/m]
- $\rho = 1/\sigma$: résistivité du matériau [Ωm]

$$J = \sigma \frac{V}{L} = \sigma E \quad [A/m^2]$$

exemple de valeur : $\rho = \sigma^{-1} = 1.73 \cdot 10^{-8} \Omega m$ à $20^\circ C$ pour Cu

~ 1 électron libre (= porteur) / atome

$\sim 10^{23}$ atomes / cm^3

2020-2021

D. Flandre

8

8

effet de la température

si la température augmente :

- les électrons bougent de plus en plus facilement : leur mobilité peut augmenter
 - mais ils se cognent aussi plus aux autres, ce qui les freine : leur mobilité peut diminuer
- ⇒ la résistance peut augmenter ou diminuer, selon la gamme de températures et la nature du matériau.

2020-2021

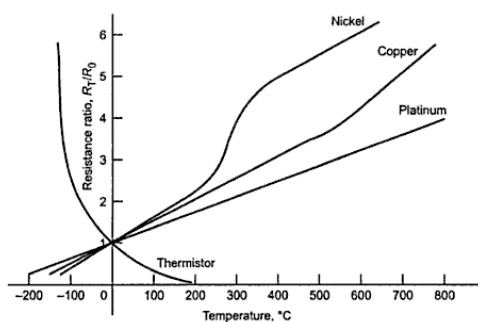
D. Flandre

9

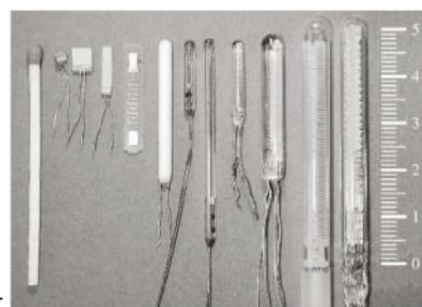
9

capteur de température : Pt-100

Résistivité (20 ° C) $\approx 100 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ ($\approx 6\text{x}$ plus que le Cu)



[PC-based Instrumentation: Concepts and Practice, Mathivanan, 2007]



[Springer handbook of materials measurement methods, Horst Czichos, Tetsuya Saito, Leslie Smith, 2006]

2020-2021

D. Flandre

10

10

Semi-conducteurs et dopage

- ☐ introduction
- ☐ conduction dans les solides
- ☒ semi-conducteurs et dopage
- ☐ jonction PN
- ☐ technologie
- ☐ transistor bipolaire à jonctions
- ☐ transistor MOS
- ☐ circuits intégrés

- structure du semi-conducteur
- dopage n et p
- génération et recombinaison
- émission de lumière
- concentration et potentiel
- flux de courant

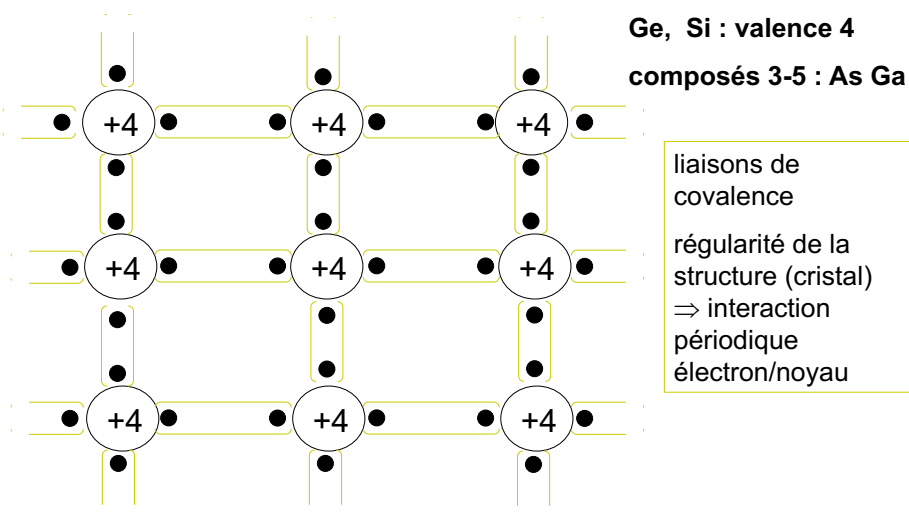
2020-2021

D. Flandre

11

11

structure des semi-conducteurs (intrinsèque)



2020-2021

D. Flandre

12

12

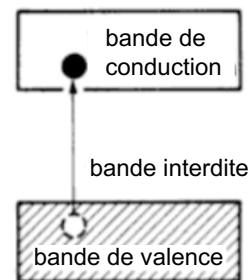
porteurs libres

seuls certains niveaux d'énergie sont permis pour les électrons : niveaux quantifiés

énergie nécessaire pour "sauter" :

$$E_g = 1.124 \text{ eV pour Si} \\ 0.67 \text{ eV pour Ge}$$

il existe 2 types de porteurs libres : **électrons** et **trous**



• génération G :

génération thermique

$$\Rightarrow \text{probabilité} = K \left(e^{\frac{-qV_g}{kT}} \right) \quad \phi_T = \frac{kT}{q} = 0.026 \frac{T}{300} [\text{V}]$$

influence de la lumière, du potentiel appliqué ...



2020-2021

D. Flandre

13

13

génération et recombinaison

• taux de recombinaison R :

dépend du nombre de porteurs actifs (libres) présents

même s'il y a peu de trous, mais beaucoup beaucoup d'électrons, le taux de recombinaison sera élevé

$$R = r n p \quad \text{avec } r = \text{constante du matériau}$$



équilibre des porteurs libres

à tout moment, il y a génération et recombinaison

à l'équilibre, c.-à-d. sans tension appliquée, ni apport externe de porteurs (courant), génération = recombinaison :

$$p n = n_i^2$$

valable à l'équilibre, quel que soit le dopage

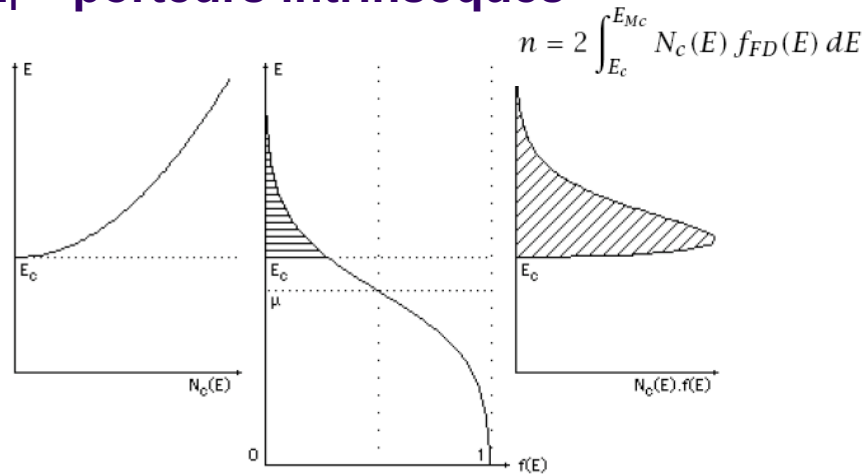
2020-2021

D. Flandre

14

14

n_i = porteurs intrinsèques



$p = n = n_i$ (intrinsèque) = $1.38 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à température ambiante pour le Si \Rightarrow **mauvais conducteur!**

2020-2021

D. Flandre

15

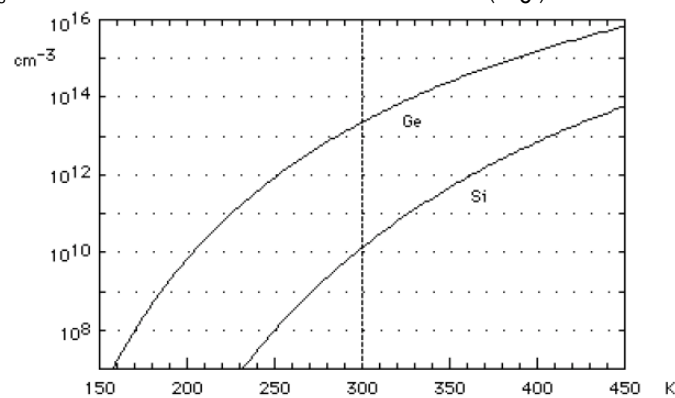
15

effet de la température (T) et du matériau ($E_g = q \cdot V_g$)

nombre de porteurs libres \uparrow

- Si $T \uparrow$
- Si $E_g \downarrow$

$$n_i(T) = n_i(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5} e^{-\frac{V_g}{2\phi_{T_0}} \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)}$$



2020-2021

D. Flandre

16

16

semi-conducteurs dopés

introduction d'éléments de valence 3 ou 5 dans la structure

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

on va ajouter des impuretés dans la structure, c'est-à-dire « doper » le silicium ...

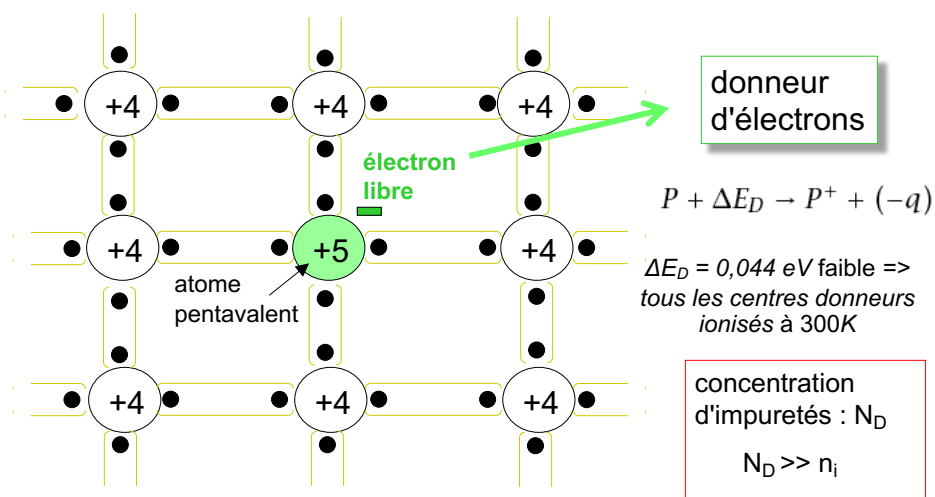
2020-2021

D. Flandre

17

17

dopage type n : valence 5



2020-2021

D. Flandre

18

18

dopage type p : valence 3

atome trivalent

liaison non satisfaite

accepteur d'électrons

en se fixant sur cette liaison, un électron produira une charge négative fixe

Électron manquant ⇒ Trou

$B + \Delta E_A \rightarrow B^- + (+q)$
0,045 eV

concentration d'impuretés : N_A

$N_A \gg n_i$ $p \approx N_A \gg n$

2020-2021

D. Flandre

19

19

majoritaires et minoritaires

- soit un semi-conducteur dopé n :
 $N_d \gg n_i$ et $n_n \approx N_d$
toutes les impuretés sont ionisées: les électrons sont les « **majoritaires** »

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d} \ll n_n$$

le courant sera principalement dû aux **électrons**

les trous sont les « **minoritaires** »
- soit un semi-conducteur dopé p : les trous sont les « **majoritaires** »
 $N_a \gg n_i$ et $p_p \approx N_a$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_a} \ll p_p$$

le courant sera principalement dû aux **trous**

les électrons sont les « **minoritaires** »

2020-2021

D. Flandre

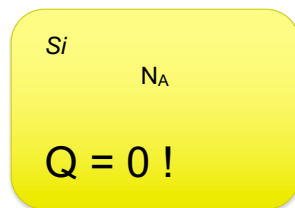
20

20

neutralité électrique globale à l'équilibre

Densité de charge d'espace $\rho(x) = q [p(x) - n(x) - N_A + N_D]$

Ex.: Bloc de semiconducteur homogène isolé dopé P ($N_A, N_D=0$)



en tout point :

$$p \approx N_A$$

$$n \approx 0$$

$$\rho(x) = 0 !!!$$

2020-2021

D. Flandre

21

21

niveau de Fermi

Semiconducteur intrinsèque :

$$\phi_F = (E_F - E_i)/q = 0$$



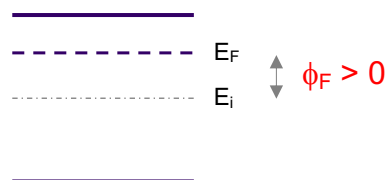
SC dopé N :

$$N_D^+ = N_D = n, \quad p = n_i^2 / N_D$$

$$E_F = E_i + kT \cdot \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$$\phi_F = \phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right), \quad \phi_T = \frac{kT}{q}$$

$$n_0 = N_D = n_i \cdot e^{\frac{\phi_F}{\phi_T}}$$



exemple: pour Si, $N_D = 10^{17} \text{cm}^{-3}$

$$\Rightarrow \phi_F = 410 \text{ mV}$$

2020-2021

D. Flandre

22

22

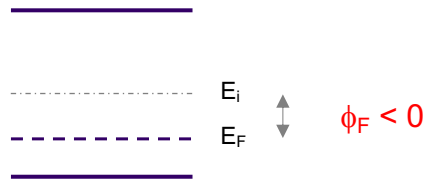
SC dopé P :

$$N_A^+ = N_A = p, \quad n = n_i^2 / N_A$$

$$E_F = E_i - kT \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

$$\phi_F = -\phi_T \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right), \quad \phi_T = \frac{kT}{q}$$

$$p_0 = N_A = n_i \cdot e^{-\phi_F / \phi_T}$$



$$N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

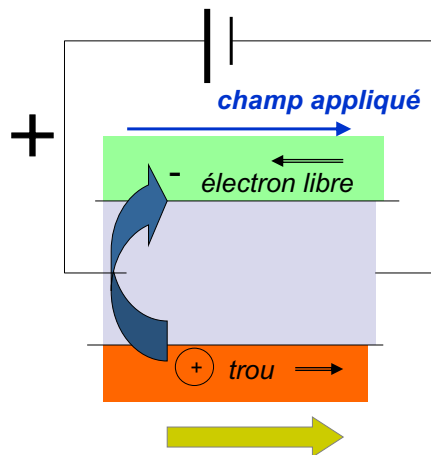
$$\Rightarrow \phi_F = -351 \text{ mV}$$

2020-2021

D. Flandre

23

23

courant produit

les 2 types de porteurs
conduisent en même
temps !

*courant résultant =
courant trous + courant
électrons*

$$J = (n \mu_n + p \mu_p) q E$$

$$= \sigma E$$

$$\sigma = (n \mu_n + p \mu_p) q$$

Avec n et p , les concentrations de porteurs [cm^{-3}]
 μ_n et μ_p , leurs mobilités [$\text{cm}^2/(\text{V.s})$]

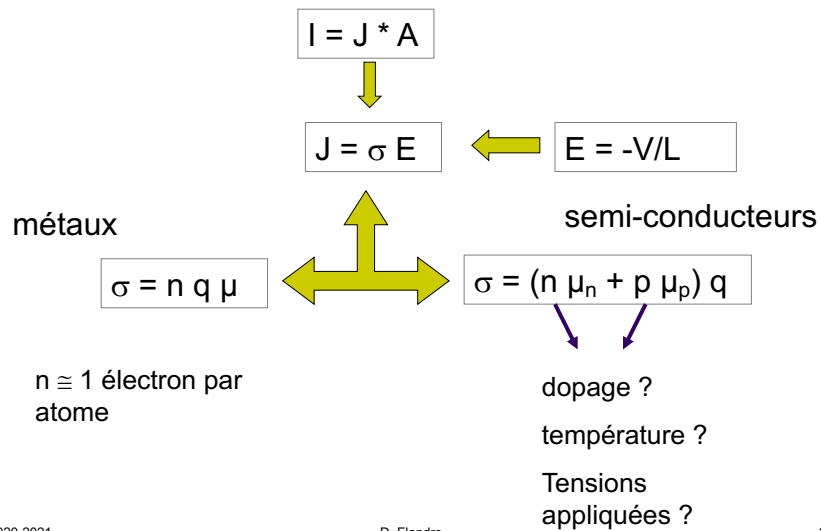
2020-2021

D. Flandre

24

24

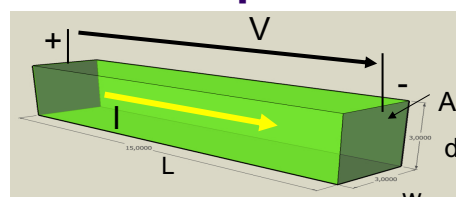
nature du courant



25

résistance d'un barreau dopé

$$R = \frac{V}{I} = \sigma^{-1} \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{A} = \frac{1}{G}$$



$\sigma = n q \mu$
← ou →
 $\sigma = (n \mu_n + p \mu_p) q$

- dopage ?
- majoritaire ou minoritaire ?
- mobilité ?

2020-2021

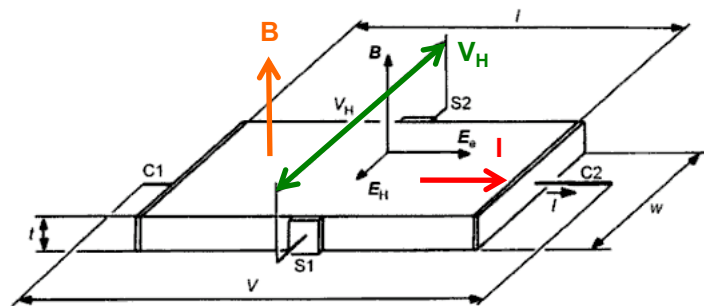
D. Flandre

26

26

Capteur magnétique à effet Hall

Courant électrique I x Champ magnétique perpendiculaire B
 \Rightarrow Force électromotrice ou tension V_H dans la direction normale
 (observé par E.H. Hall en 1879 pour les semiconducteurs)



[Hall effect devices, R. S. Popović, 2004]

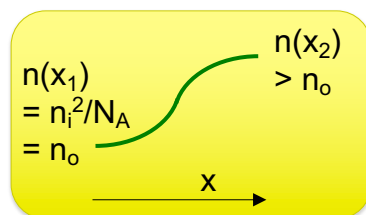
2020-2021

D. Flandre

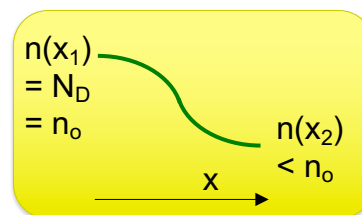
27

27

effet du potentiel sur électrons



Excès de minoritaires
(déficit existe aussi)



Déficit (déplétion) de majoritaires
(excès (accumulation) existe aussi)

$n(x_2)$ dépend du potentiel selon une loi de type Boltzman (similaire au dopage)

$$n = n_0 e^{\frac{\Delta\phi(x)}{\phi_T}} \Rightarrow n' = n - n_0 = n_0 \left[e^{\frac{\Delta\phi(x)}{\phi_T}} - 1 \right]$$

$\phi(x)$ positif : *augmente* la concentration locale d'électrons

($\phi(x)$ négatif \rightarrow n diminue)

2020-2021

D. Flandre

28

28

idem pour les trous

$\Delta\phi(x)$ positif (*négatif*) :

diminue (*augmente*) la concentration locale de **trous**

$$p = p_0 e^{\frac{-\Delta\phi(x)}{\phi_T}} \Rightarrow p' = p - p_0 = p_0 \left[e^{\frac{-\Delta\phi(x)}{\phi_T}} - 1 \right]$$

même une légère tension peut modifier considérablement la concentration en porteurs

Ex.: $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\Delta\phi(x) = -120 \text{ mV}$

$$\Rightarrow n \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$p \approx 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

2020-2021

D. Flandre

29

29

équation de Poisson cas unidimensionnel

$$\rho(x) = q [p(x) - n(x) - N_A + N_D]$$

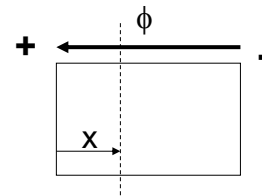
Relation entre ϕ et charge :

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

champ électrique

$$E(x) = -\frac{d\phi(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon_s} \int^x \rho(x) dx$$

Neutralité électrique globale conservée si $E(x_2) - E(x_1) = 0$!



ϵ_s = permittivité diélectrique
 $\approx 1 \text{ pF/cm pour Si}$

2020-2021

D. Flandre

30

30

dopage inhomogène à l'équilibre:

$$J = 0$$

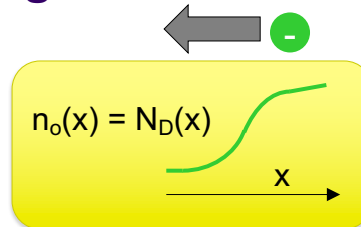
Gradient des porteurs

⇒ courants de diffusion
(première loi de Fick
d'un processus de diffusion)

$$J_{\text{diffusion}} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn_o(x)}{dx}$$

Coefficient de diffusion

$$D_n = \mu_n \phi_T$$



$$\phi_o(x)$$

$$E_o(x) = -d\phi_o/dx$$

$$J_{\text{dérive}} = q \cdot n_o(x) \cdot \mu_n \cdot E_o(x)$$

$$J_n = q \cdot \left(n_o \cdot \mu_n \cdot E_o + D_n \cdot \frac{dn_o}{dx} \right) = 0$$

2020-2021

D. Flandre

31

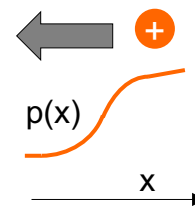
31

idem pour les trous

soit un profil non homogène :

$$J_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

définition du
coefficient de diffusion



par la relation d' Einstein :

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{q}{kT} = \frac{1}{\phi_T}$$

$$\text{ou } D_p = \mu_p \phi_T$$

$$J_p = q \cdot \left(p_o \cdot \mu_p \cdot E_o - D_p \cdot \frac{dp_o}{dx} \right) = 0$$

2020-2021

D. Flandre

32

32

équations de base des semi-conducteurs

*statique et dynamique des porteurs
sous l'effet de champs externes*

- équations de la densité de courant (dérive-diffusion)
- équations de Maxwell pour les milieux homogènes et isotropiques
 - ici l'équation de Poisson : $\nabla \times \mathcal{D} = \rho(x,y,z)$
- équation de continuité

2020-2021

D. Flandre

33

33

convention de signe : $I > 0$ pour $x > 0$, mais $V < 0$ pour $x > 0$!

forces appliquées à l'électron

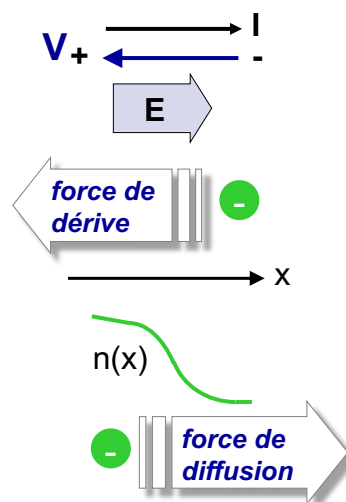
potentiel → déplacement selon le champ
et le signe de la charge

$$J = n(-q)u = nq\mu E$$

$$J_{n \text{ dérive}}(x) = -q\mu_n \left[n(x) \frac{d\phi(x)}{dx} \right]$$

variation de concentration → chasse
les porteurs vers faibles concentrations

$$J_{n \text{ diffusion}}(x) = -q\mu_n \left[-\phi_T \frac{dn(x)}{dx} \right] \\ = q\mu_n \phi_T \frac{dn(x)}{dx}$$



2020-2021

D. Flandre

34

34

équations dérive-diffusion



force résultante = dérive + diffusion

$$J_n(x) = -q \mu_n \left[n(x) \frac{d\phi(x)}{dx} - \phi_T \frac{dn(x)}{dx} \right]$$

électrons

$$J_p(x) = q \mu_p \left[-p(x) \frac{d\phi(x)}{dx} - \phi_T \frac{dp(x)}{dx} \right]$$

trous

mobilité des trous et des électrons: $\mu_n \approx 3 \mu_p$ (pour Si)
diminue quand dopage augmente, autour de T_0 : $\propto T^{2.5}$

courant = déséquilibre des forces

courant total :



$$I = A (J_n + J_p)$$

↑
surface

2020-2021

D. Flandre

35

35

équation de continuité

$$\nabla \cdot \vec{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

déséquilibre \Rightarrow génération &/ou recombinaison \Rightarrow équilibre

recombinaison ou génération \div (excès de porteurs)/(temps de vie)

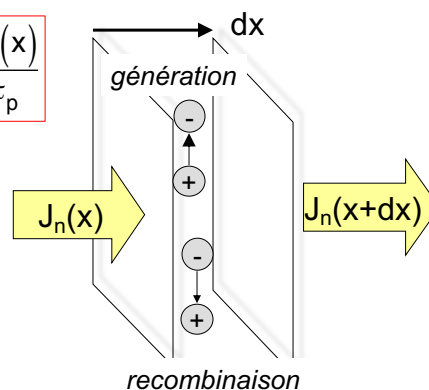
\Rightarrow

$$\frac{dJ_n(x)}{dx} = q \frac{n'(x)}{\tau_n}$$

$$\frac{dJ_p(x)}{dx} = -q \frac{p'(x)}{\tau_p}$$

pas de génération et recombinaison
(négligeable = temps de vie infini) :

$$\frac{dJ(x)}{dx} = 0$$



2020-2021

D. Flandre

36

36

génération extérieure

(lumière, radiations...)

⇒ termes G_n et G_p

+ temps

⇒

$$\frac{\partial n}{\partial t} = + \frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_n}{dx} + G_n - U_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_p}{dx} + G_p - U_p$$

$$U_n = \frac{n(x) - n_o}{\tau_n}, \quad U_p = \frac{p(x) - p_o}{\tau_p}$$

2020-2021

D. Flandre

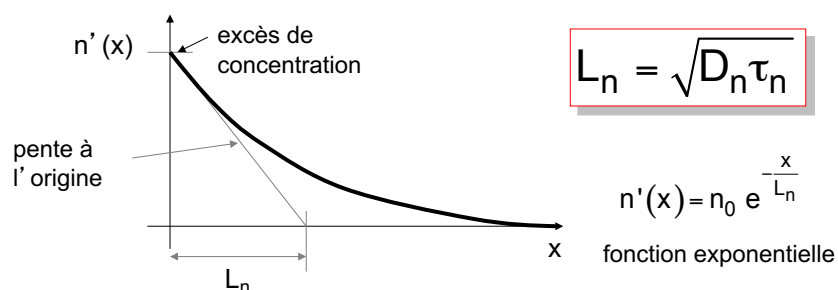
37

37

temps de vie et longueur de diffusion

si, dans une portion de silicium, la recombinaison est négligeable, le temps de vie est infini

si la recombinaison n' est pas négligeable, on définit une **longueur de diffusion**, sous l'effet de l'excès de concentration :



2020-2021

D. Flandre

38

38