

PHY6505: Physique de la matière condensée

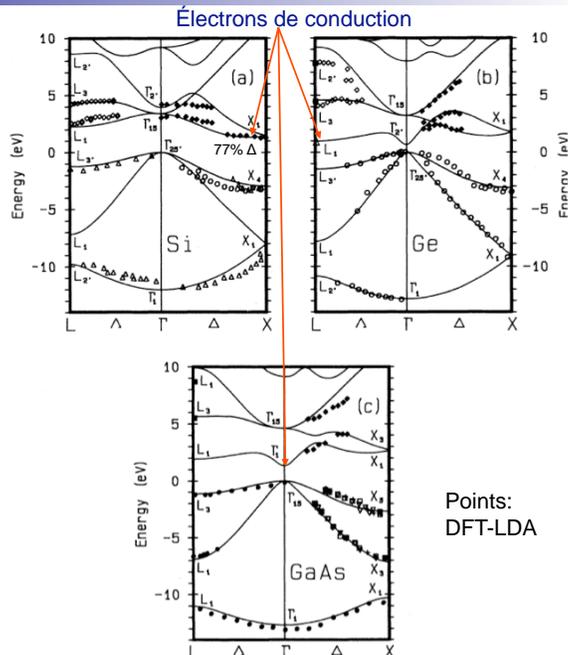
Cours 19 Défauts

François Schiettekatte
Université de Montréal
Automne 2010

1

Schéma de bande

- Gap
 - si $E_g = 2 \text{ eV}$
 $e^{-\beta E_g/2} \sim 10^{-10}$
- indirect
 - phonon impliqué
 - Si (1.11 eV)
 - Ge (0.74 eV)
 - SiC (2.2 eV)
- direct
 - GaAs (1.43 eV)
 - InP (1.34 eV)



Source: M. Rohlfing, P. Krüger, J. Pollmann, Phys. Rev. **B48** (1993) 17791

Complications

- Particularités qui compliquent les choses
 - Gap indirect
 - Conservation de l'énergie et du « crystal momentum »
 - L'émission/absorption d'un phonon diminue la probabilité de transition
 - Excitons, pics excitoniques d'absorption
 - Décroissance exponentiellement de l'absorption de la lumière sous E_g
 - impuretés
 - fluctuations

3

Énergie

- Énergie près de la bande de valence
$$\varepsilon_{\vec{k}} = \varepsilon_v - \frac{\hbar^2}{2} \vec{k}^T \cdot \vec{M}^{-1} \cdot \vec{k}$$
- Énergie près de la bande de conduction
$$\varepsilon_{\vec{k}} = \varepsilon_c + \frac{\hbar^2}{2} \vec{k}^T \cdot \vec{M}^{-1} \cdot \vec{k}$$
- \vec{M} : tenseur de masse effective
 - maximum de la bande de valence:
 - devrait être triplement dégénéré pour Si, Ge au point Γ
 - le couplage spin-orbite lève une dégénérescence: -0.3 meV
 - les deux autres ont une courbure de bande différente
 - trous lourds, trous légers **tableau**

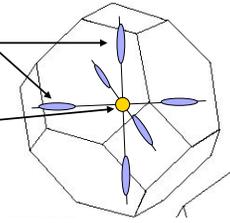
4

Surface d'énergie

■ Surface d'isoénergie du silicium

□ Électrons de conduction

□ Trous



5

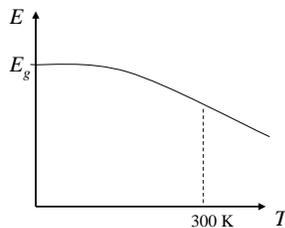
Semi-conducteurs à l'équilibre

□ *Tableau*

6

Évolution du gap en fonction de T

- Diminution de ~10% de la valeur du gap entre 0 K et 300 K
 - Expansion thermique
 - Effet des phonons sur le niveau de Fermi: changement du taux d'excitation



7

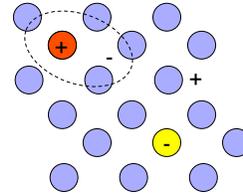
Dopage

- certaines impuretés influencent considérablement la conductivité
 - e.g. 10^{-5} B/Si $\Leftrightarrow \sigma \times 1000$ (à RT)
- 2 types d'impuretés
 - Donneurs: e^- de conduction supplémentaires
 - typiquement P, As: donneurs peu profonds
 - Accepteurs:
 - capture d' e^-
 - trous supplémentaires
 - typiquement B : accepteur peu profond

8

Dopage

- n : e^- délocalisé – ion +
- p : e^- capturé: trou – ion -
- comportement style atome d'H, mais avec ϵ élevé



- rayon $r = \frac{\epsilon_r}{m^*/m} a_0$
- $\epsilon = \frac{m^*}{m} \frac{1}{\epsilon^2} 13.6 \text{ eV}$
- niveau d'énergie quelques dizaines de meV au dessus de la bande de valence (accepteurs) ou en dessous de la bande de conduction (donneurs)
 - cf. tableau 28.8 A&M
- e^- délocalisés si $kT \gg \epsilon_c - \epsilon_d$ ou $kT \gg \epsilon_a - \epsilon_v$

9

dopage

- Différence de concentration n, p

$$n - p = \Delta n = N_d - N_a \neq 0 \quad np = n_i^2$$

$$\Rightarrow n^2 - np = n\Delta n$$

$$\Rightarrow n^2 - n\Delta n - n_i^2 = 0$$

$$\Rightarrow \begin{cases} n \\ p \end{cases} = \frac{\sqrt{(\Delta n)^2 + 4n_i^2} \pm \Delta n}{2}$$

$$n = n_i e^{-\beta(\mu_i - \mu)}, \quad p = n_i e^{-\beta(\mu - \mu_i)}$$

$$\Rightarrow n - p = 2n_i \sinh \beta(\mu - \mu_i)$$

$$\Rightarrow \mu = \mu_i + k_B T \sinh^{-1}((N_d - N_a) / 2n_i)$$

$$N_d \gg N_a : n \approx N_d, p = n_i^2 / N_a \text{ et inversement}$$

10

dopage

□ moyenne T

- Variation de la densité de porteurs intrinsèques

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\epsilon_g / 2kT}$$

□ Basse T

- Stabilisation à la conc. du dopage
 - même, augmentation car mobilité \uparrow avec $T \downarrow$

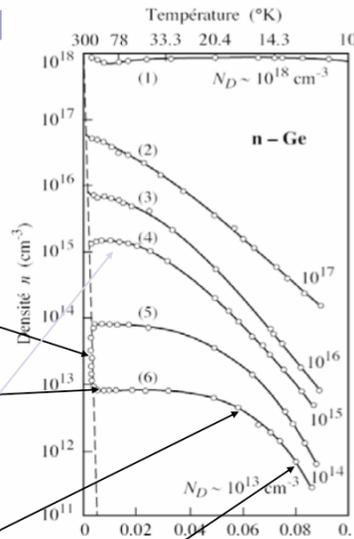
□ Très basse T

- Les impuretés cessent d'être ionisées

$$n_d = \frac{N_d}{\frac{1}{2} e^{\beta(\epsilon_d - \mu)} + 1} \approx \frac{1}{2} e^{-\beta(\epsilon_d - \mu)} \approx \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_c - \epsilon_d}{kT} \right)$$

□ Très très basse T

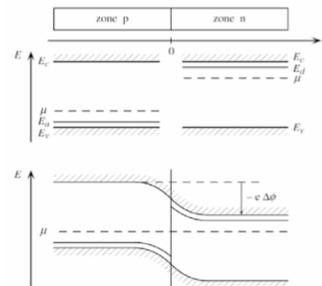
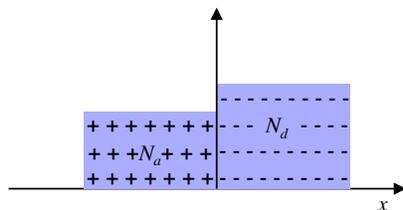
- excitation e^- de leur piège: $n_d \approx e^{-\beta(\epsilon_c - \epsilon_d)} \approx \left(1 - \frac{\epsilon_c - \epsilon_d}{kT} \right)$



Source: sph.epfl.ch/cours/solideII.html

semi-conducteurs hétérogènes

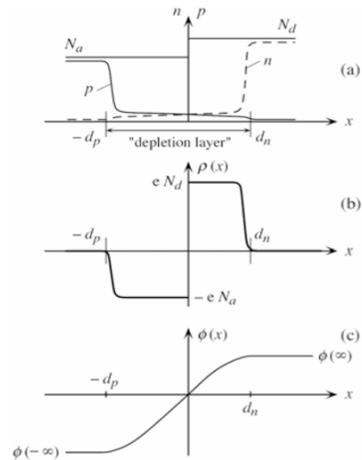
- Jonctions p-n
- Potentiel chimique doit être le même



Source: sph.epfl.ch/cours/solideII.html 12

Jonctions p-n

- Zone de déplétion
 - diffusion thermique des porteurs de charge
 - formation d'une densité de charge: champ électrique
 - potentiel résultant
 - équilibre entre
 - diffusion thermique
 - injection liée au champ



Source: sph.epfl.ch/cours/solidell.html