

La logique binaire et l'électronique

M. Combacau
combacau@laas.fr



November 7, 2024



東北大學
NORTHEASTERN UNIVERSITY

Objectif

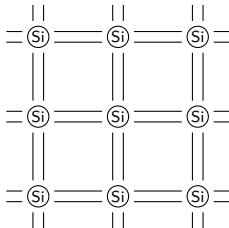
Le transistor metal-oxyde-silicium (MOS)

Le silicium

- Élément de numéro atomique 14 (14 P, 14 N, 14 e)
- Couche de valence à 4 électrons
- Abondant sur terre (27% de la croute terrestre) sous différentes formes
- Purifié à 10^{-12} impureté par atome de silicium très bon isolant car chaque atome se lie à 4 autres (pas d'électron libre)
- Matériau principal pour la réalisation des composants électroniques
- Création de matériaux semi-conducteurs par **dopage**

semi-conducteurs et silicium

Liaisons de valence dans un cristal de silicium

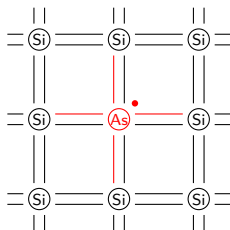


Chaque couche périphérique d'électron est complète \Rightarrow Pas d'électron libre pouvant permettre la conduction

Semi-conducteurs et silicium

Dopage N d'un cristal de silicium

Certains atomes sont remplacés par un autre élément chimique comportant 5 atomes sur sa couche de valence (Arsenic ou phosphore par exemple)

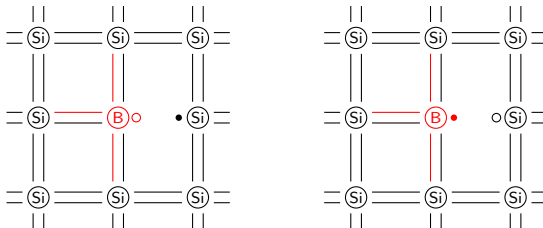


Le point rouge symbolise l'électron de l'atome d'arsenic non lié à un atome de silicium (il peut donc se déplacer \Rightarrow semi-conduction)

Semi-conducteurs et silicium

Dopage P d'un cristal de silicium

Certains atomes sont remplacés par un autre élément chimique comportant 3 atomes sur sa couche de valence (Bore par exemple)



- Le point noir représente l'électron de l'atome de silicium non lié à l'atome de bore
- Le cercle rouge représente le **trou** susceptible de capter un électron pour tendre à compléter la couche de valence du bore
- A droite, on dit alors que "le trou s'est déplacé", mais ceci correspond bien au déplacement de l'électron libre du silicium (courant électrique)

Semi-conducteurs et silicium

Résumé

- Le silicium est isolant à l'état pur (cristallin)
- le dopage de type N(égatif) apporte, grâce à des atomes dopants ayant 5 électrons sur la couche de valence, une conductivité par déplacement des électrons de l'élément dopant non liés aux atomes de silicium

Il y a un excès d'électron dans ce semi-conducteur

- le dopage de type P(ositif) apporte, grâce à des atomes dopants ayant 3 électrons sur la couche de valence, une conductivité par déplacement des électrons des atomes de silicium vers les "trous" de l'élément dopant.

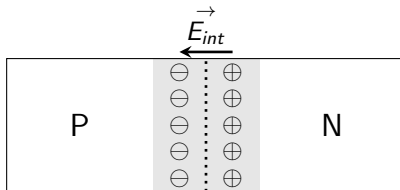
Il y a un manque d'électron dans ce semi-conducteur

-

La jonction PN et ses propriétés macroscopiques

Zone de charge d'espace (ou de déplétion)

Sans polarisation d'une jonction PN, une zone apparaît liée à la combinaison des électrons libre de N et des trous de P (création d'ions).

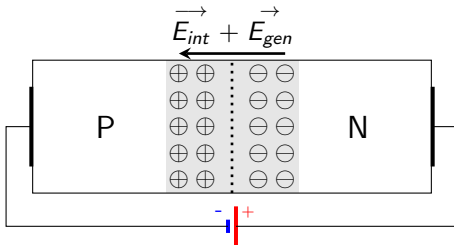


Cette zone de charge d'espace est le siège d'un champ électrique \vec{E}_{int} interdisant la présence de charges libres et qui est donc isolante (pas de charges libres).

La jonction PN et ses propriétés macroscopiques

Polarisation inverse d'une jonction PN

Ajoutons une différence de potentiel extérieure grâce à un générateur en connectant son pôle positif à la zone N. Il rajoute sur la jonction en champ électrique E_{gen} de même sens que E_{int} .

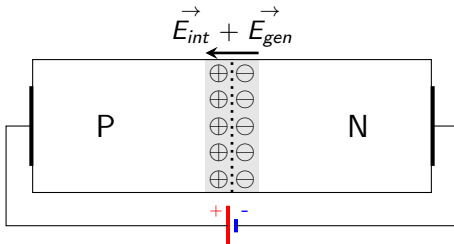


Les champs électriques s'additionnent et la zone de champ d'espace s'élargit (jonction toujours isolante)

La jonction PN et ses propriétés macroscopiques

Polarisation directe d'une jonction PN

Ajoutons une différence de potentiel extérieure grâce à un générateur en connectant son pôle positif à la zone P. Il rajoute sur la jonction en champ électrique E_{gen} de sens contraire à E_{int} .



Les champs électriques se soustraient et la zone de champ d'espace se rétrécit. Pour $|E_{int}| \leq |E_{gen}|$ elle disparaît et la jonction devient passante.

La jonction PN et ses propriétés macroscopiques

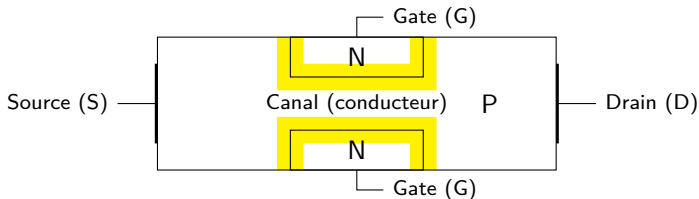
Résumé - jonction PN - Effet de champ

- Une jonction PN induit une **zone de charge d'espace** non conductrice
- La largeur de cette zone de charge d'espace augmente avec une polarisation inverse
- La zone de charge d'espace n'est pas conductrice
- Ce phénomène s'appelle **l'effet de champ**
- Il est utilisé dans la constitution des transistors FET (Field Effect Transistor)
- Un phénomène similaire est utilisé dans les technologies MOS (Metal Oxyde Silicium)

Les transistors à effet de champ

Principe d'un FET canal P (très simplifié !)

Constitué par deux jonctions PN symétriques sur un barreau de semi-conducteur (principe uniquement)



En jaune : les zones de charges d'espace.

Si la polarisation inverse V_{GS} est suffisante, la largeur du canal devient nulle et le drain et la source sont isolés.

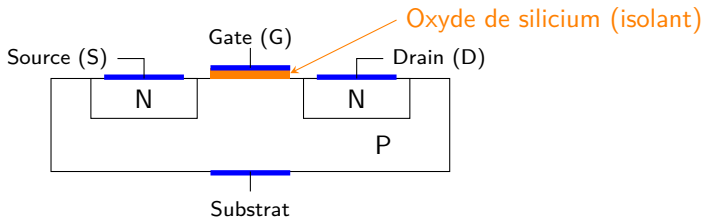
Les transistors à effet de champ

A retenir sur le principe d'un FET

- Il existe des FET canal N (seule la polarisation change)
- Il existe une valeur seuil V_{th} pour laquelle le canal se ferme (on dit qu'il est "pincé")
- $V_{GS} > V_{th}$ isolant entre Source et Drain
- $V_{GS} = 0V$ conducteur entre Source et Drain
- Il s'agit d'un interrupteur électronique commandé en tension
- ++ consommation faible
- – effet capacitif entre G et S, temps de commutation non négligeable

Les transistors à effet de champ

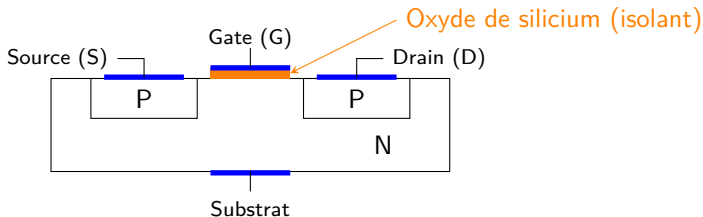
Principe d'un NMOS



- Substrat et Gate constituent un condensateur
- Substrat et Source sont reliés électriquement (à la masse : 0v)
- $V_{GS} = 0$ la jonction Source-Substrat est isolante (pas de canal conducteur Source-Drain)
- $V_{GS} > V_{th}$ les électrons libres du substrat sont attirés vers la Gate (les trous sont repoussés) et créent un canal conducteur Source - Drain.

Les transistors à effet de champ

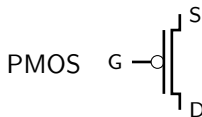
Principe d'un PMOS



- Dopage P pour Source et Drain, N pour le substrat
- Source et Substrat sont reliés électriquement (souvent à $+V_{cc}$)
- $V_{GS} < -V_{th}$ les trous du substrat sont attirés vers la Gate (les électrons sont repoussés) et créent un canal conducteur Source - Drain.
- $V_{GS} = 0$ la jonction Source-Substrat est non conductrice (pas de canal conducteur Source-Drain)

Les transistors à effet de champ

Utilisation et symboles en conception électronique

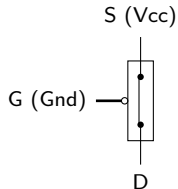
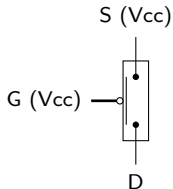


- Utilisation de deux transistors pour éviter que le drain soit connecté à une sortie isolée (impédance très grande \Rightarrow tension incertaine)
- Des résistances de polarisation sont toujours présentes dans les montages, nous les ignorerons dans la suite (seul le principe des montages nous intéresse ici)

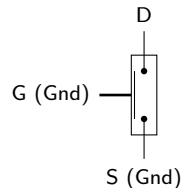
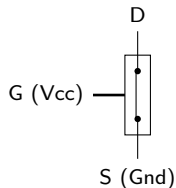
Les transistors à effet de champ

Principe de fonctionnement en logique binaire

- PMOS



- NMOS



Merci pour votre attention

Quelques remarques et conseils

- Ce cours n'est pas un cours de matériaux, ni de structure des semi-conducteurs. Des approximations ont été faites dans cette partie, mais les principes de fonctionnement donnés, s'ils ne sont pas détaillés, sont tout de même corrects !
- Voir sur moodle pour les slides de cette présentation
- Sur moodle également un test sur cette partie.