

Transistor MOS

- **Semi-conducteur**
- **Transistor nMOS**
- **Transistor pMOS**

andre.stauffer@epfl.ch

Transistor MOS

Types de transistors

La technologie CMOS (MOS complémentaire) utilisée dans ce cours comporte deux types de transistors:

le transistor MOS de type n ou simplement transistor nMOS

le transistor MOS de type p ou simplement transistor pMOS

L'appellation MOS des transistors en question découle de leur abréviation anglaise MOSFET qui désigne à la fois la structure et le fonctionnement du dispositif:

metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor

Transistor MOS

Classement des corps solides

Selon leur conductivité électrique les corps solides sont classés en trois groupes:

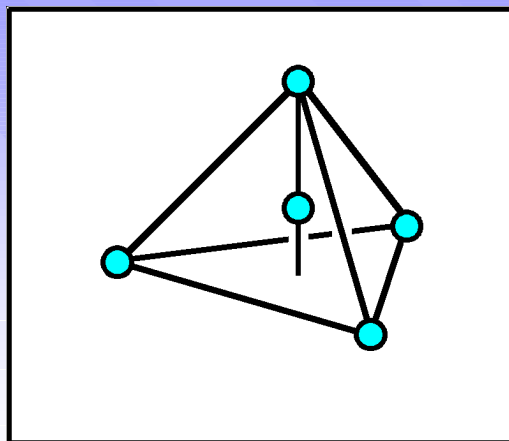
les métaux présentent une grande conductivité pratiquement indépendante de la température

les isolants ont une conductivité pratiquement nulle à toute température

les semi-conducteurs sont caractérisés par une conductivité qui augmente fortement avec la température, dépend fortement des impuretés se trouvant dans le matériau et peut varier en surface sous l'action d'un champ électrique

Semi-conducteur

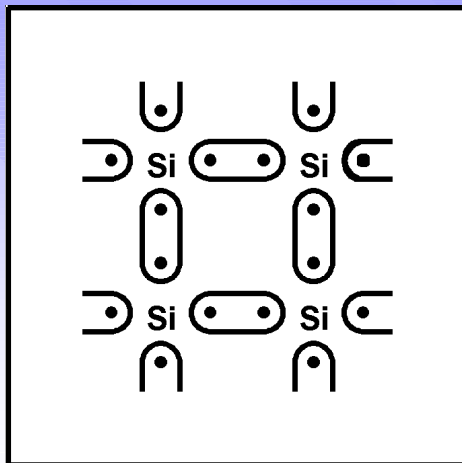
Silicium pur: arrangement atomique



Le silicium pur est le semi-conducteur de base pour le substrat

Semi-conducteur

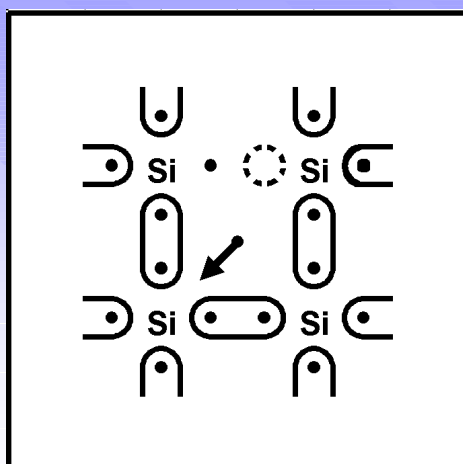
Silicium pur: atomes tétravalents



Le silicium (Si) possède quatre électrons de valence

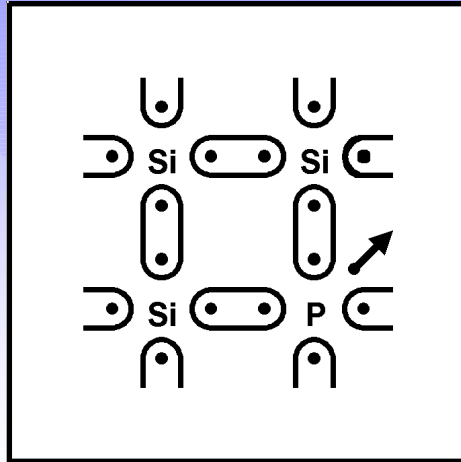
Semi-conducteur

Silicium pur: libération d'un électron (énergie=1eV)



Semi-conducteur

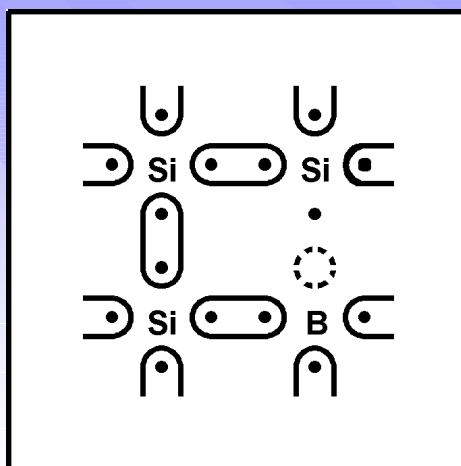
Silicium dopé de type n: atome pentavalent (0,1ev)



Adjonction d'atomes donneurs: phosphore (P) ou arsenic (As)

Semi-conducteur

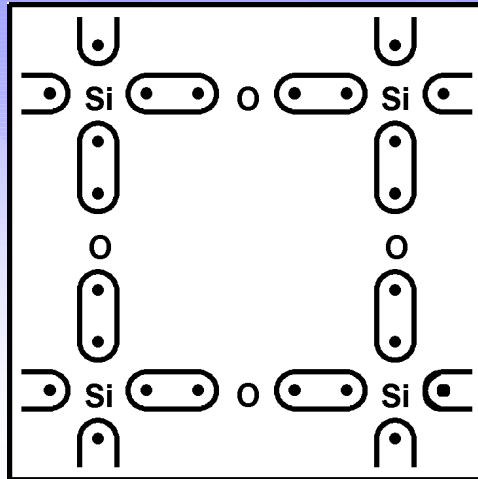
Silicium dopé de type p: atome trivalent



Adjonction d'atomes accepteurs: bore (B)

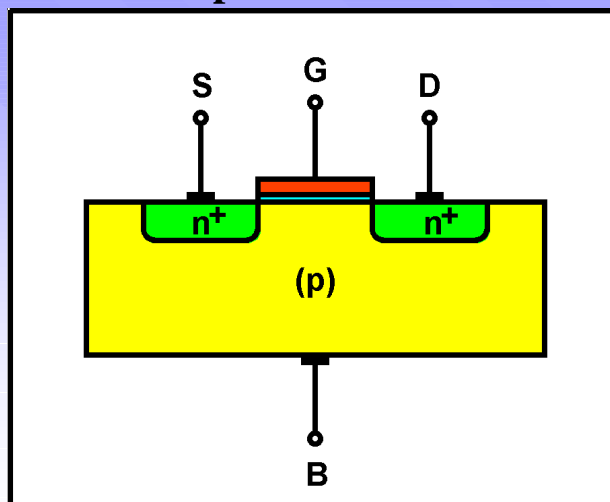
Semi-conducteur

Oxyde de silicium (SiO_2): couche isolante ($0,1\mu$)



Transistor nMOS

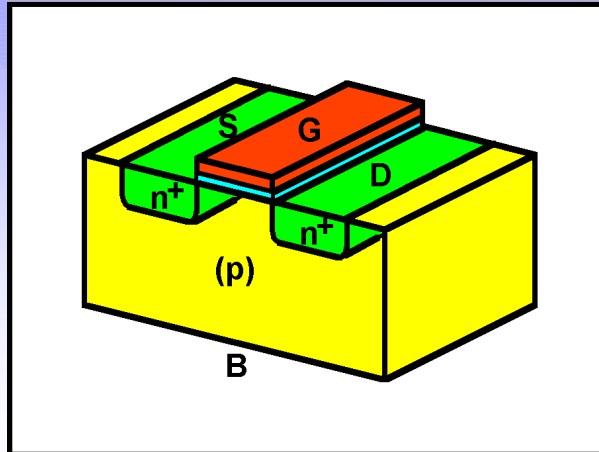
Coupe du transistor



S: source, G: grille, D: drain, B: substrat (en anglais: bulk)

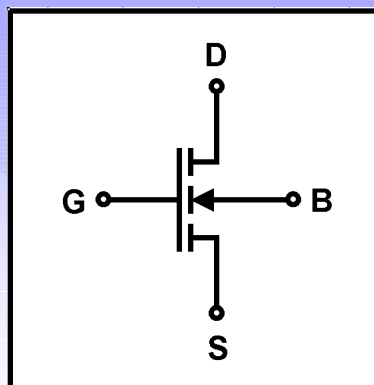
Transistor nMOS

Vue spatiale du transistor



Transistor nMOS

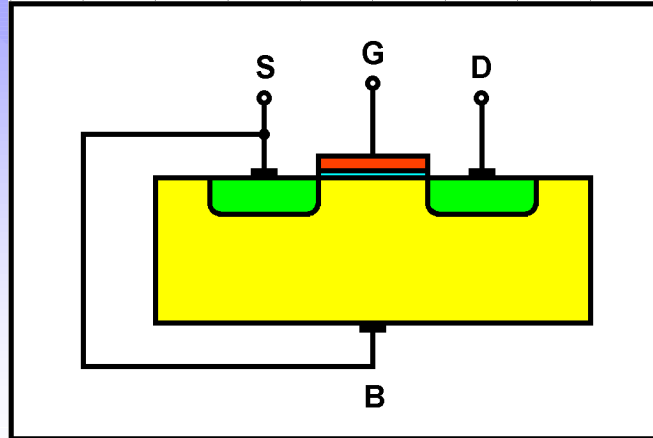
Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre BD et BS

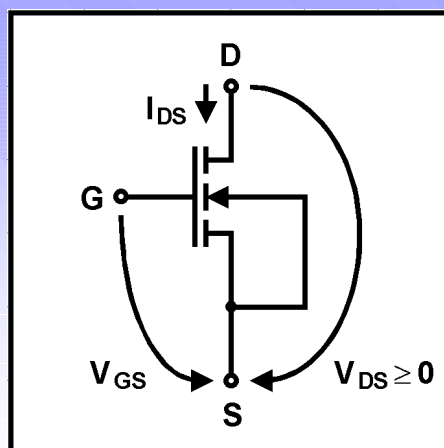
Transistor nMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



Transistor nMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



Transistor nMOS

Fonctionnement du transistor

Le transistor conduit lorsque $V_{GS} > V_T$

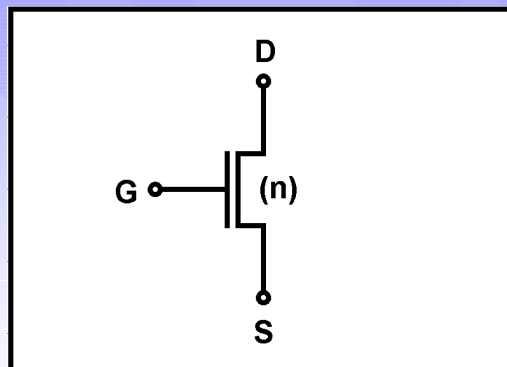
Le transistor est bloqué lorsque $V_{GS} < V_T$

V_T : tension de seuil du transistor

$$V_T \approx 0,5 - 1 \text{ [V]}$$

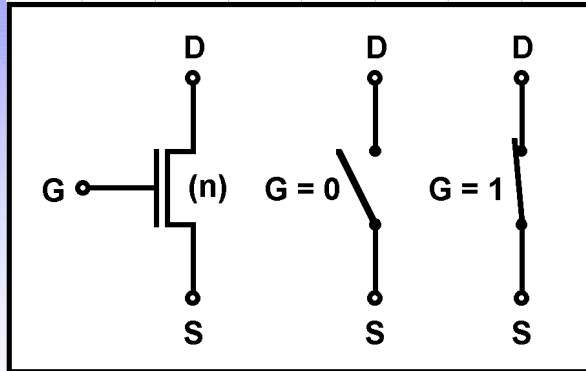
Transistor nMOS

Symbole simplifié du transistor



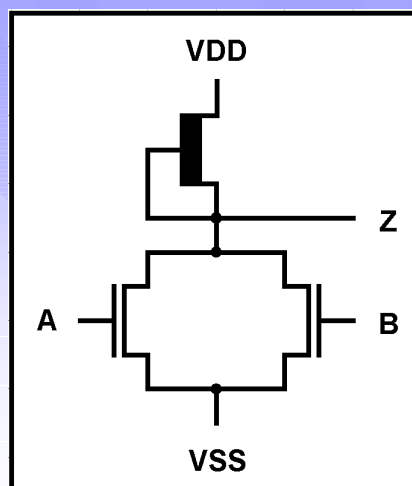
Transistor nMOS

Transistor utilisé en interrupteur



Transistor nMOS

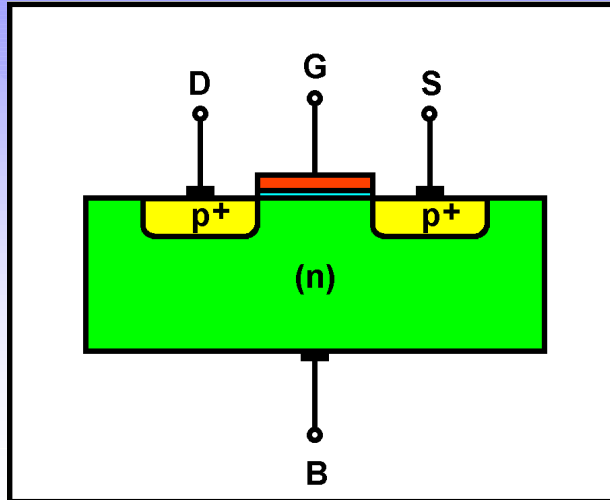
Circuit nMOS



MOS à déplétion: transistor à canal n implanté avec $V_T < 0$

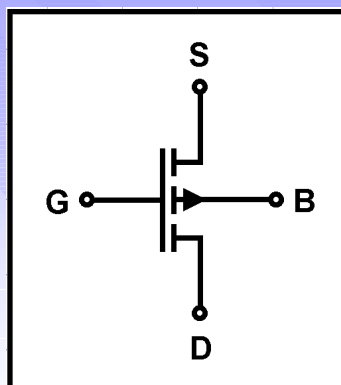
Transistor pMOS

Coupe du transistor



Transistor pMOS

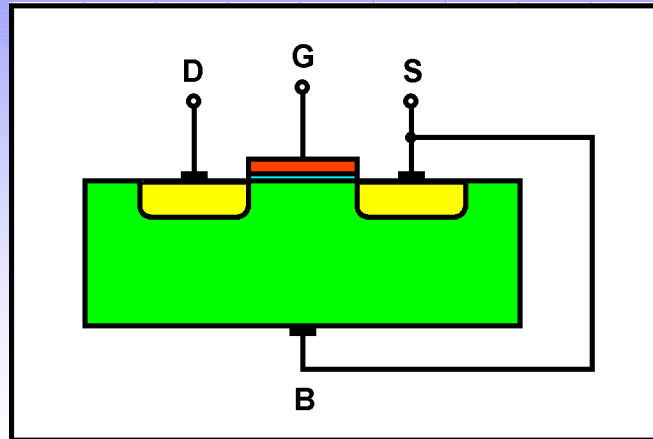
Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre DB et SB

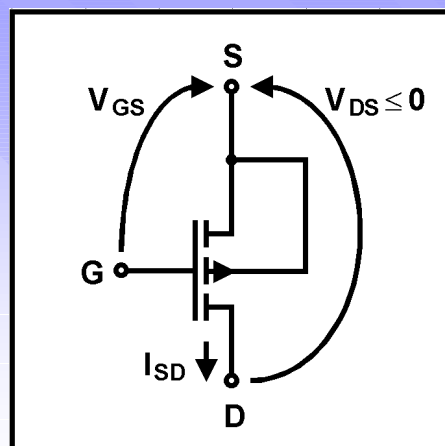
Transistor pMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



Transistor pMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



Transistor pMOS

Fonctionnement du transistor

Le transistor conduit lorsque $V_{GS} < V_T$

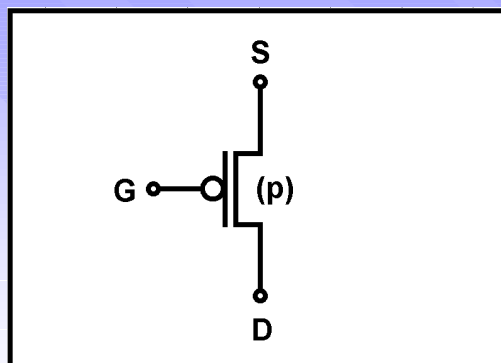
Le transistor est bloqué lorsque $V_{GS} > V_T$

V_T : tension de seuil du transistor

$$V_T \approx -1 \text{ [V]}$$

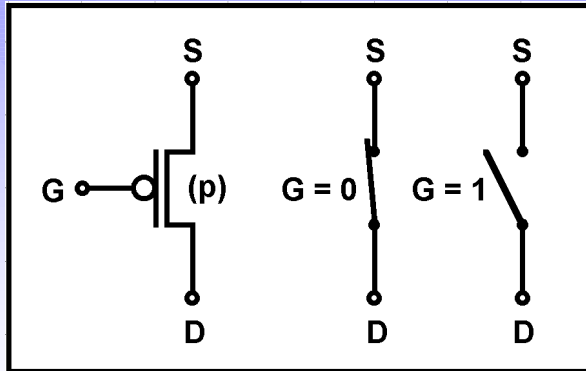
Transistor pMOS

Symbole simplifié du transistor

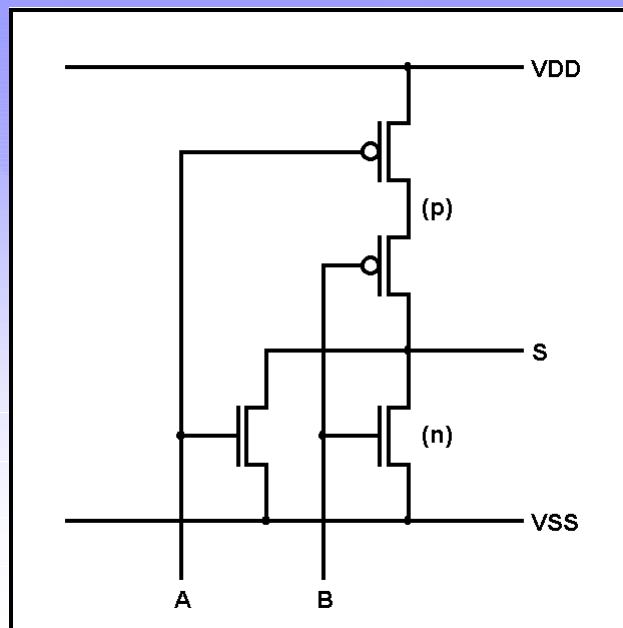


Transistor pMOS

Transistor utilisé en interrupteur

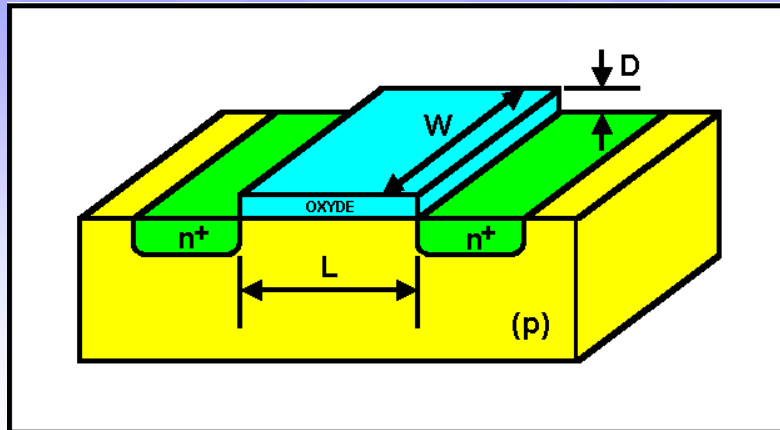


Circuit CMOS



Transistor nMOS

Paramètres géométriques et technologiques



W: largeur du canal, L: longueur du canal, D: épaisseur de l'oxyde

Transistor nMOS

Modèle linéaire

Le modèle linéaire du transistor est valable pour V_{DS} petit:

$$I_{DS} = \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

Dans ce modèle β est le facteur de gain du transistor:

$$\beta = \epsilon\mu/D \cdot W/L$$

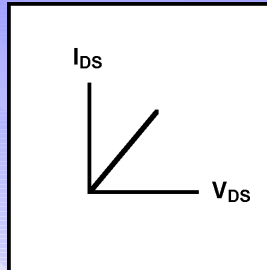
Le facteur technologique $\epsilon\mu/D$ introduit la constante diélectrique de l'oxyde (ϵ) et la mobilité des électrons (μ_n) ou des trous (μ_p) avec:

$$\mu_n \approx 1,6 \mu_p$$

Le facteur géométrique correspond à W/L

Transistor nMOS

Modèle linéaire



Près de l'origine des axes V_{DS} et I_{DS} , le transistor se comporte comme une résistance:

$$I_{DS} = 1/R V_{DS}$$

Dans cette relation, la conductance $1/R$ satisfait la relation:

$$1/R = \beta (V_{GS} - V_T)$$

Transistor nMOS

Modèle quadratique

Le modèle quadratique du transistor s'applique lorsque V_{DS} augmente:

$$I_{DS} = \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS} - 1/2 \beta V_{DS}^2$$

La valeur limite s'obtient par dérivation:

$$dI_{DS} / dV_{DS} = 0$$

$$\beta (V_{GS} - V_T) - \beta V_{DS} = 0$$

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

Il s'agit de la tension de saturation:

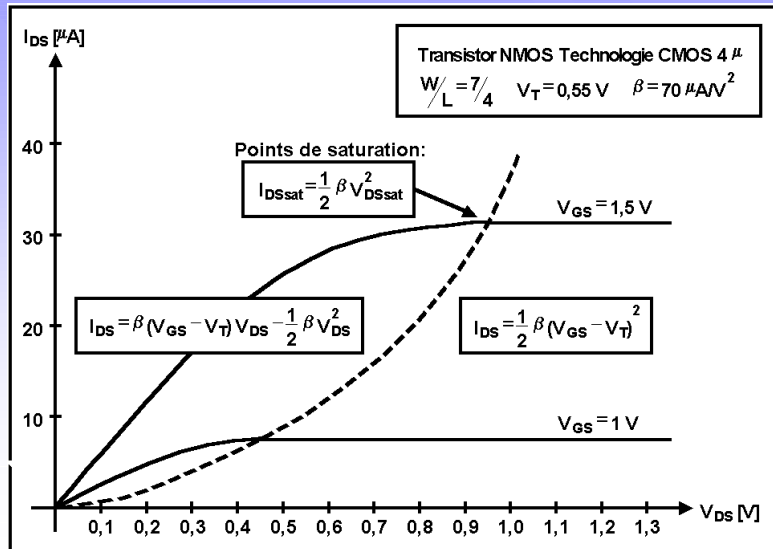
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

Le courant de saturation correspondant vaut:

$$I_{DSsat} = 1/2 \beta (V_{GS} - V_T)^2 = 1/2 \beta V_{DSsat}^2$$

Transistor nMOS

Courbes du transistor



Transistor MOS

- **Semi-conducteur**
- **Transistor nMOS**
- **Transistor pMOS**

andre.stauffer@epfl.ch

Transistor MOS

Types de transistors

La technologie CMOS (MOS complémentaire) utilisée dans ce cours comporte deux types de transistors:

le transistor MOS de type n ou simplement transistor nMOS

le transistor MOS de type p ou simplement transistor pMOS

L'appellation MOS des transistors en question découle de leur abréviation anglaise MOSFET qui désigne à la fois la structure et le fonctionnement du dispositif:

metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor

Transistor MOS

Classement des corps solides

Selon leur conductivité électrique les corps solides sont classés en trois groupes:

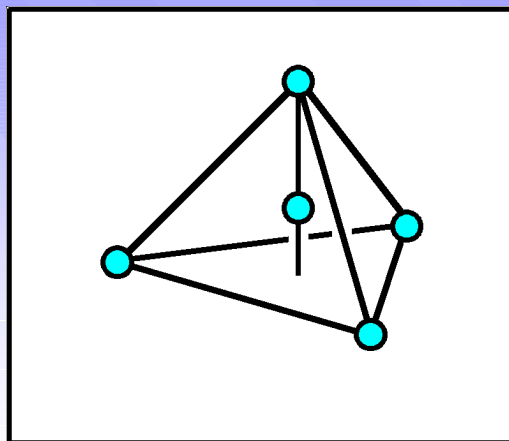
les métaux présentent une grande conductivité pratiquement indépendante de la température

les isolants ont une conductivité pratiquement nulle à toute température

les semi-conducteurs sont caractérisés par une conductivité qui augmente fortement avec la température, dépend fortement des impuretés se trouvant dans le matériau et peut varier en surface sous l'action d'un champ électrique

Semi-conducteur

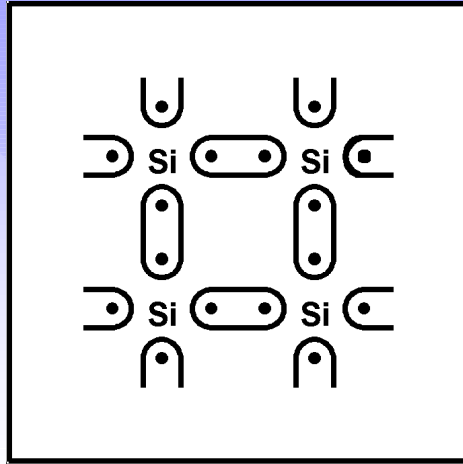
Silicium pur: arrangement atomique



Le silicium pur est le semi-conducteur de base pour le substrat

Semi-conducteur

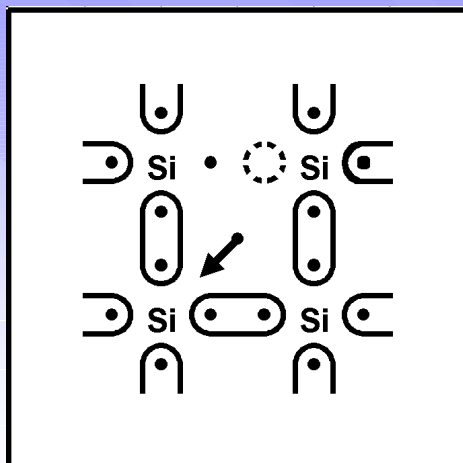
Silicium pur: atomes tétravalents



Le silicium (Si) possède quatre électrons de valence

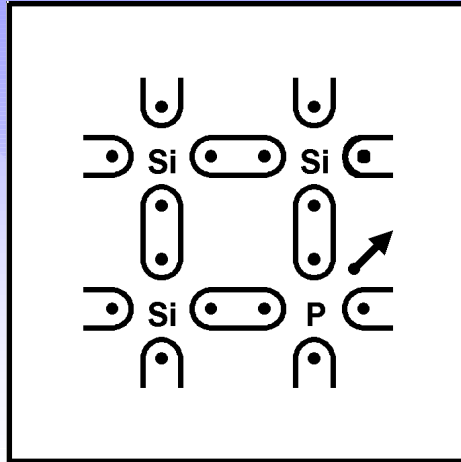
Semi-conducteur

Silicium pur: libération d'un électron (énergie=1eV)



Semi-conducteur

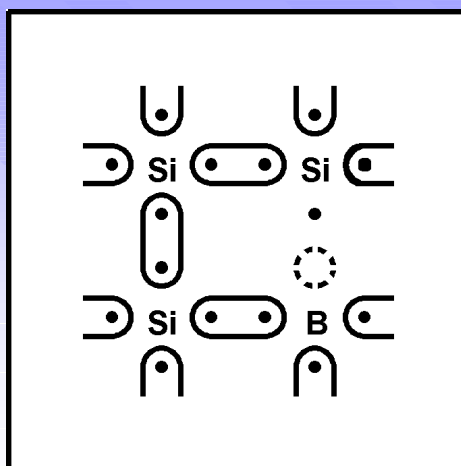
Silicium dopé de type n: atome pentavalent (0,1ev)



Adjonction d'atomes donneurs: phosphore (P) ou arsenic (As)

Semi-conducteur

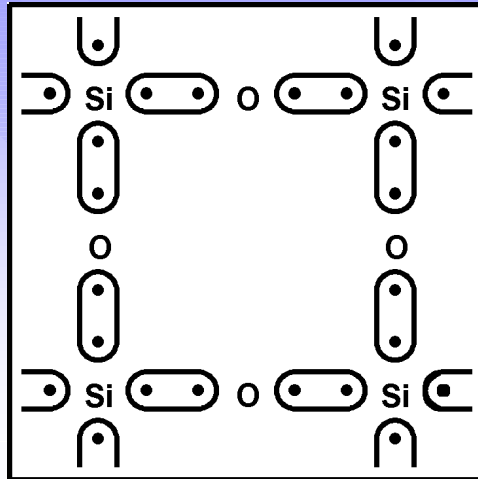
Silicium dopé de type p: atome trivalent



Adjonction d'atomes accepteurs: bore (B)

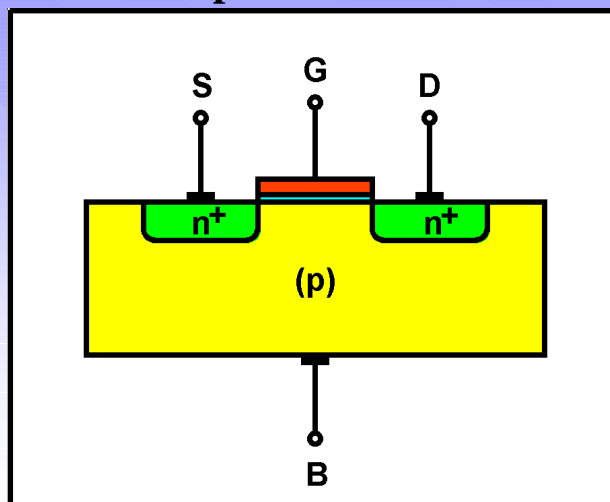
Semi-conducteur

Oxyde de silicium (SiO_2): couche isolante ($0,1\mu$)



Transistor nMOS

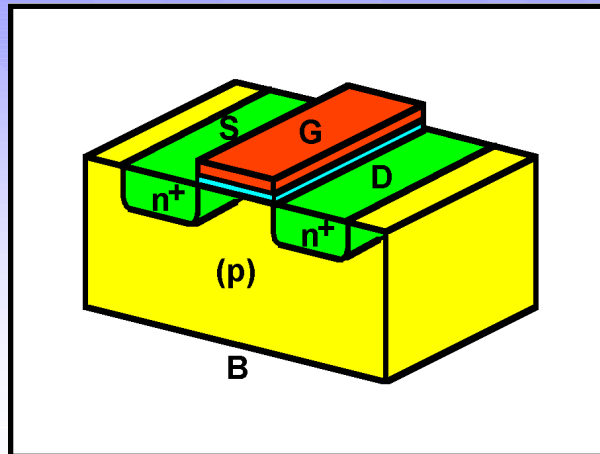
Coupe du transistor



S: source, G: grille, D: drain, B: substrat (en anglais: bulk)

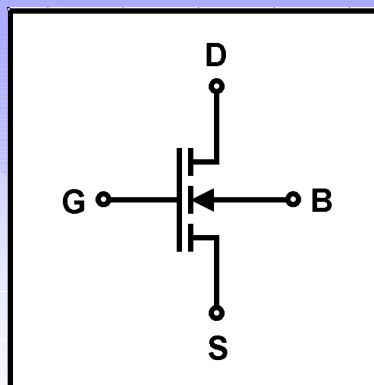
Transistor nMOS

Vue spatiale du transistor



Transistor nMOS

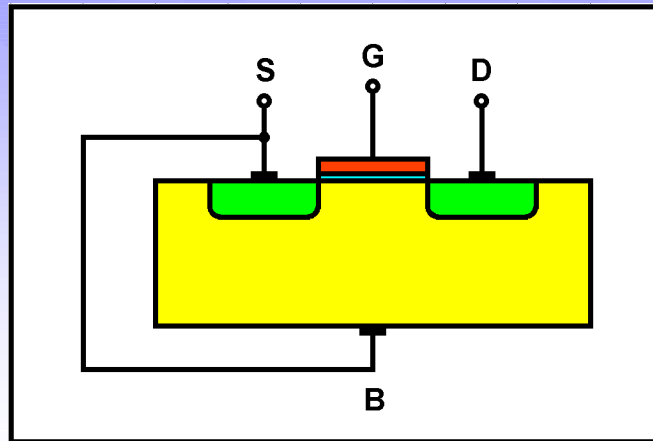
Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre BD et BS

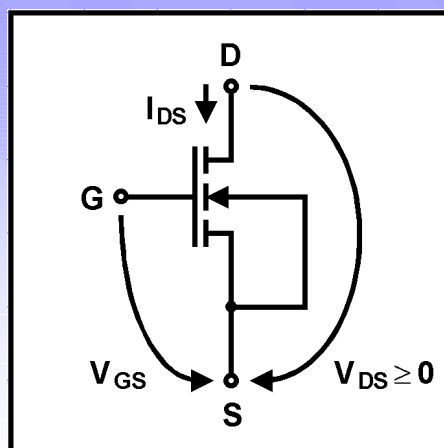
Transistor nMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



Transistor nMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



Transistor nMOS

Fonctionnement du transistor

Le transistor conduit lorsque $V_{GS} > V_T$

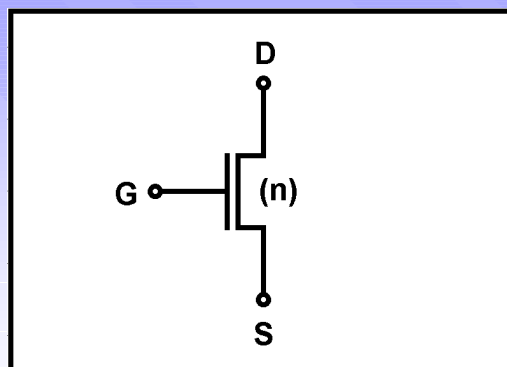
Le transistor est bloqué lorsque $V_{GS} < V_T$

V_T : tension de seuil du transistor

$$V_T \approx 0,5 - 1 \text{ [V]}$$

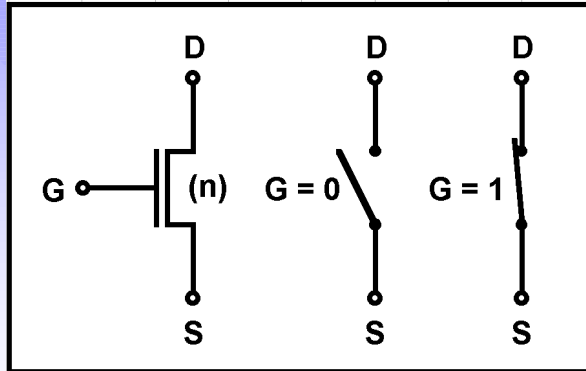
Transistor nMOS

Symbole simplifié du transistor



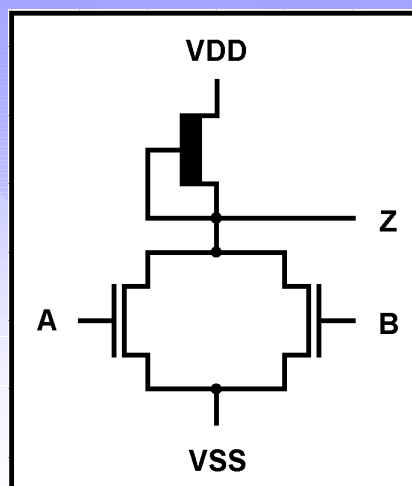
Transistor nMOS

Transistor utilisé en interrupteur



Transistor nMOS

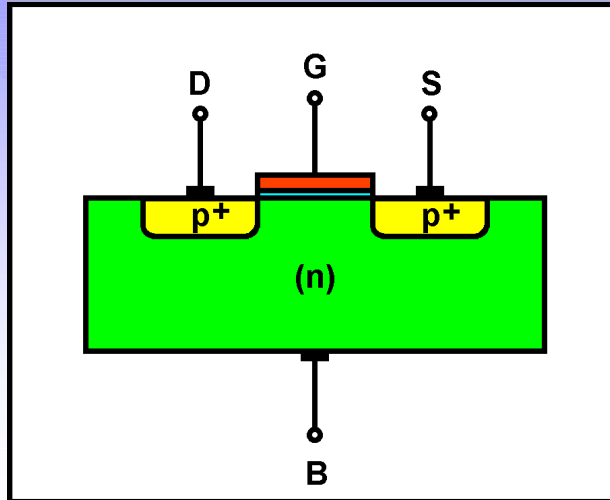
Circuit nMOS



MOS à déplétion: transistor à canal n implanté avec $V_T < 0$

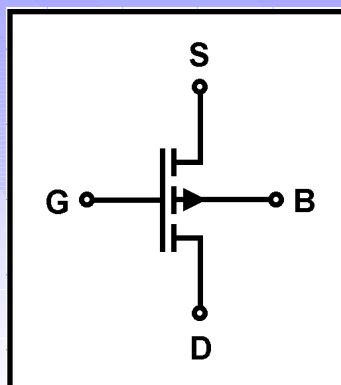
Transistor pMOS

Coupe du transistor



Transistor pMOS

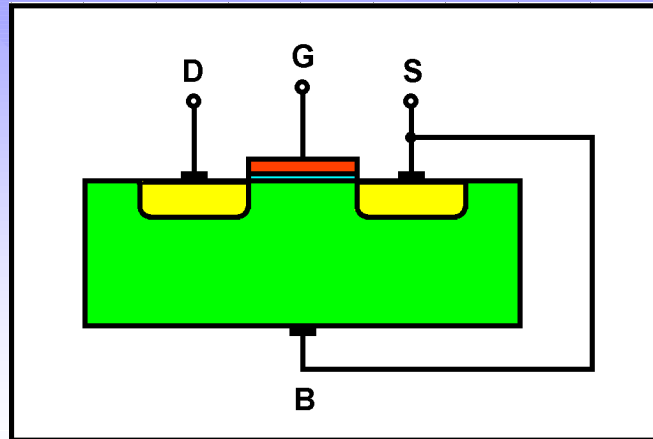
Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre DB et SB

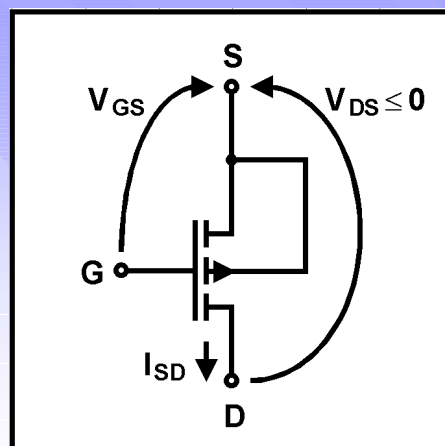
Transistor pMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



Transistor pMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



Transistor pMOS

Fonctionnement du transistor

Le transistor conduit lorsque $V_{GS} < V_T$

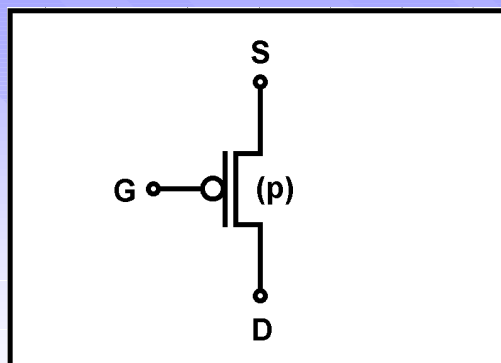
Le transistor est bloqué lorsque $V_{GS} > V_T$

V_T : tension de seuil du transistor

$$V_T \approx -1 \text{ [V]}$$

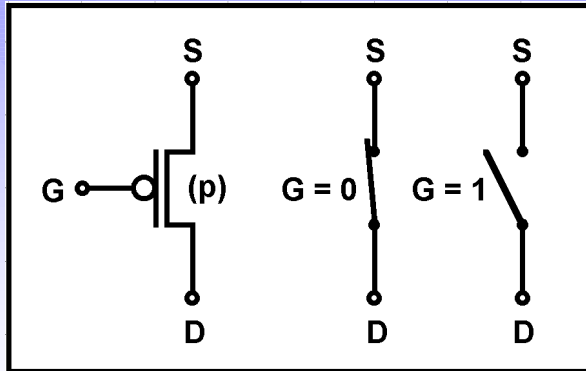
Transistor pMOS

Symbole simplifié du transistor

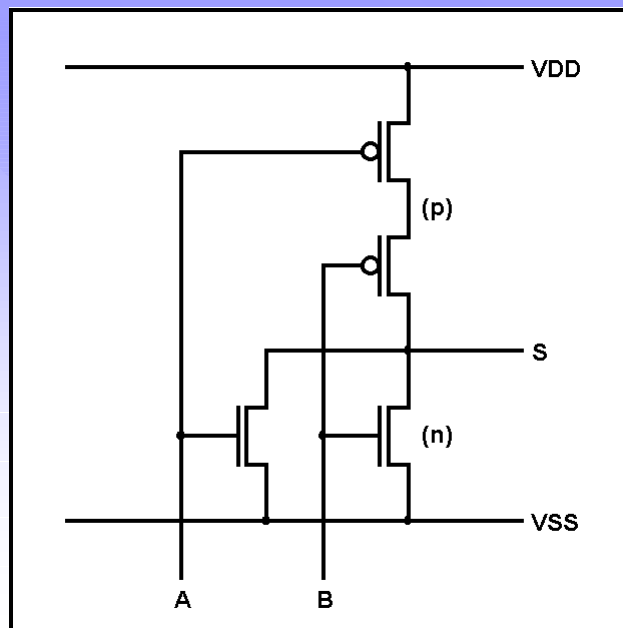


Transistor pMOS

Transistor utilisé en interrupteur

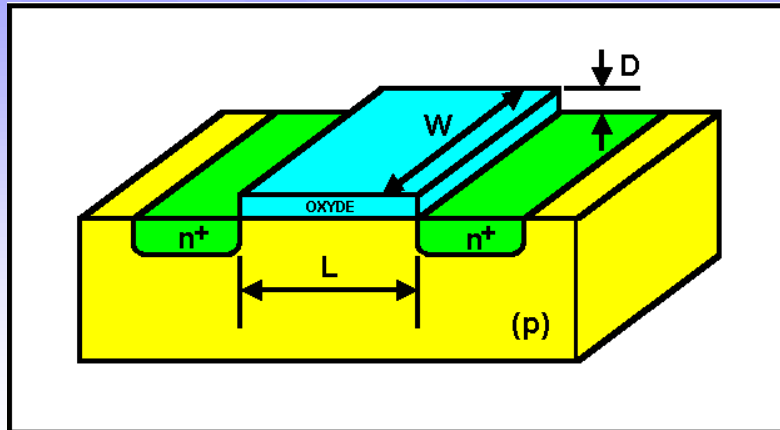


Circuit CMOS



Transistor nMOS

Paramètres géométriques et technologiques



W: largeur du canal, L: longueur du canal, D: épaisseur de l'oxyde

Transistor nMOS

Modèle linéaire

Le modèle linéaire du transistor est valable pour V_{DS} petit:

$$I_{DS} = \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

Dans ce modèle β est le facteur de gain du transistor:

$$\beta = \epsilon\mu/D \cdot W/L$$

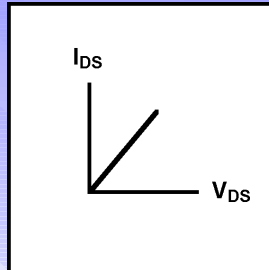
Le facteur technologique $\epsilon\mu/D$ introduit la constante diélectrique de l'oxyde (ϵ) et la mobilité des électrons (μ_n) ou des trous (μ_p) avec:

$$\mu_n \approx 1,6 \mu_p$$

Le facteur géométrique correspond à W/L

Transistor nMOS

Modèle linéaire



Près de l'origine des axes V_{DS} et I_{DS} , le transistor se comporte comme une résistance:

$$I_{DS} = 1/R V_{DS}$$

Dans cette relation, la conductance $1/R$ satisfait la relation:

$$1/R = \beta (V_{GS} - V_T)$$

Transistor nMOS

Modèle quadratique

Le modèle quadratique du transistor s'applique lorsque V_{DS} augmente:

$$I_{DS} = \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS} - 1/2 \beta V_{DS}^2$$

La valeur limite s'obtient par dérivation:

$$dI_{DS} / dV_{DS} = 0$$

$$\beta (V_{GS} - V_T) - \beta V_{DS} = 0$$

$$V_{DS} = V_{GS} - V_T$$

Il s'agit de la tension de saturation:

$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

Le courant de saturation correspondant vaut:

$$I_{DSsat} = 1/2 \beta (V_{GS} - V_T)^2 = 1/2 \beta V_{DSsat}^2$$

Transistor nMOS

Courbes du transistor

