

# 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:

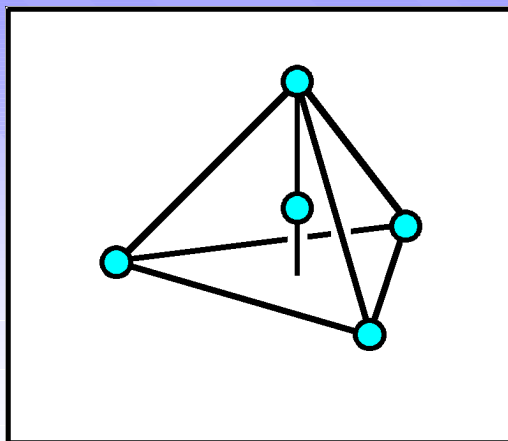
les métaux présentent une grande conductivité pratiquement indépendante de la température

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

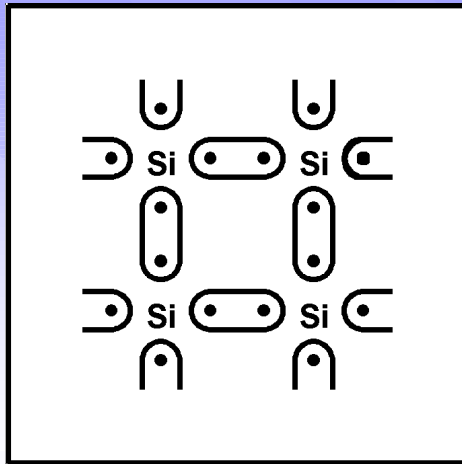
### Silicium pur: arrangement atomique



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

## Semi-conducteur

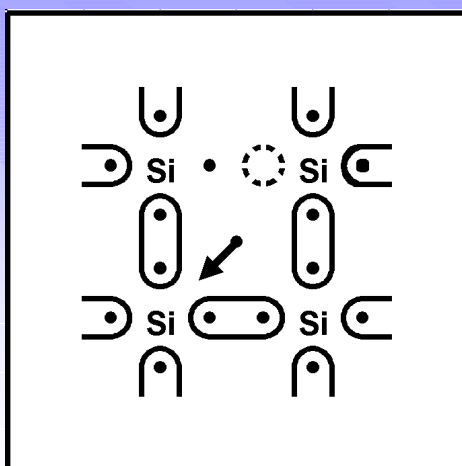
Silicium pur: atomes tétravalents



Le silicium (Si) possède quatre électrons de valence

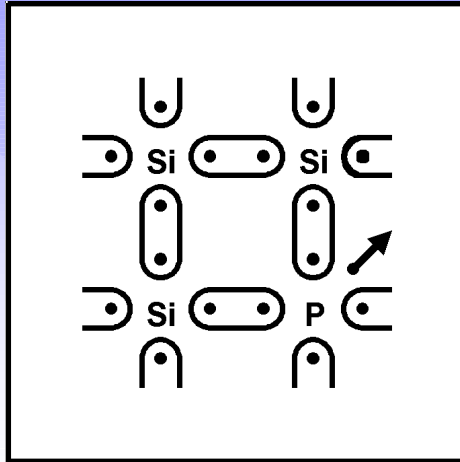
## Semi-conducteur

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



## Semi-conducteur

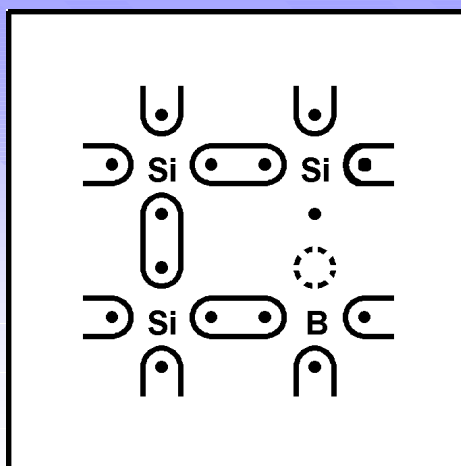
Silicium dopé de type n: atome pentavalent (0,1ev)



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

## Semi-conducteur

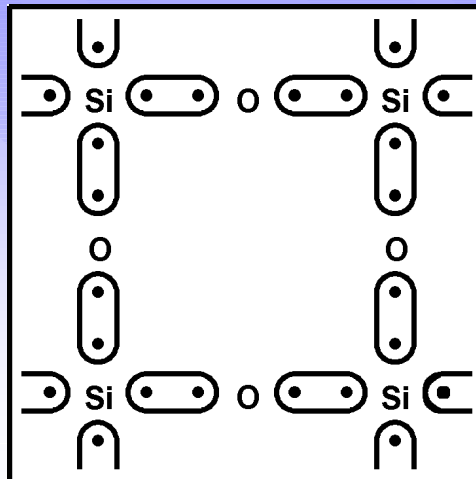
Silicium dopé de type p: atome trivalent



Adjonction d'atomes accepteurs: bore (B)

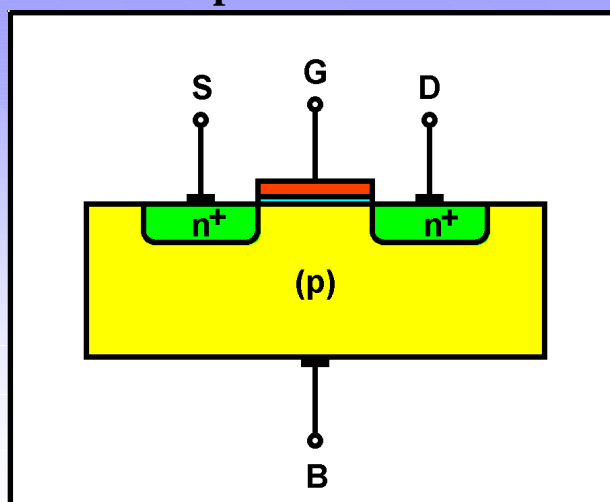
## Semi-conducteur

Oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ): couche isolante ( $0,1\mu$ )



## Transistor nMOS

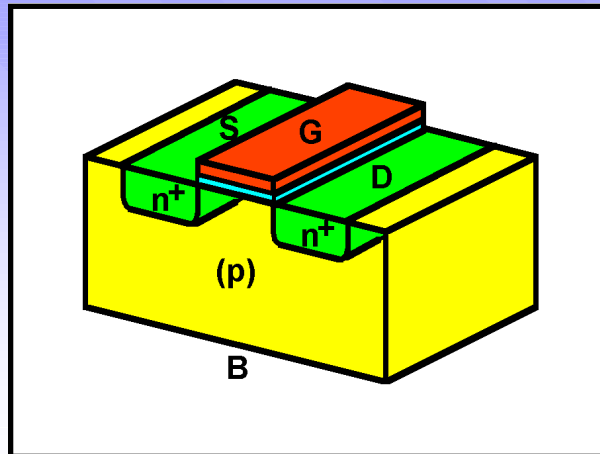
Coupe du transistor



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

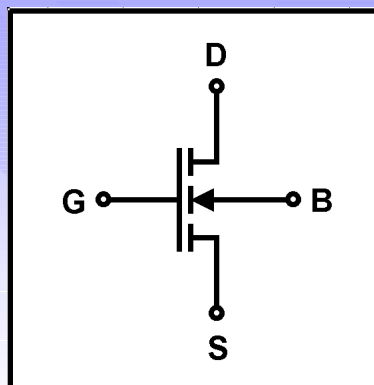
## Transistor nMOS

### Vue spatiale du transistor



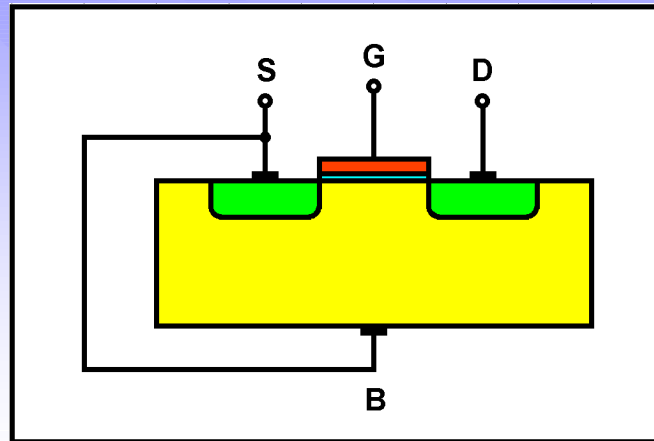
## Transistor nMOS

### Symbole du transistor

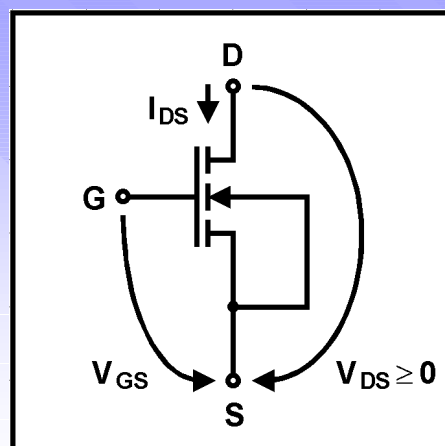


la diode symbolise les jonctions pn entre BD et BS

## Coupe du transistor utilisé en tripôle



## Symbole du transistor utilisé en tripôle



# Transistor nMOS

## Fonctionnement du transistor

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

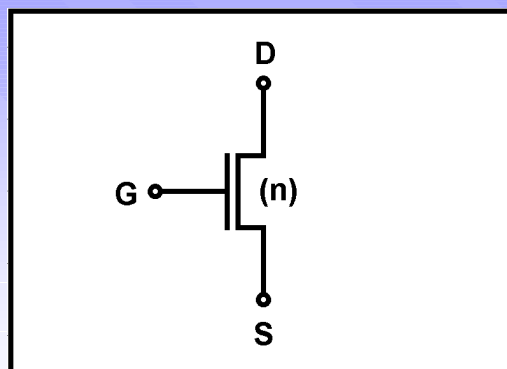
Le transistor est bloqué lorsque  $V_{GS} < V_T$

$V_T$  : tension de seuil du transistor

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

# Transistor nMOS

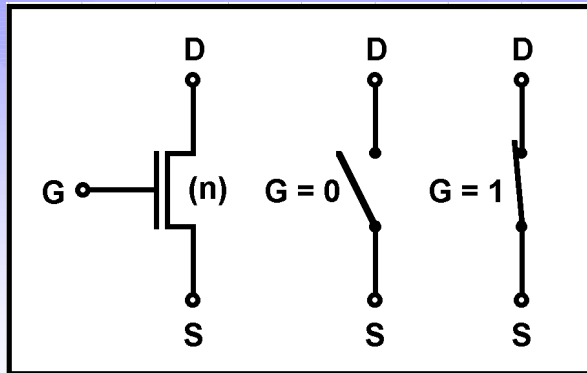
## Symbole simplifié du transistor





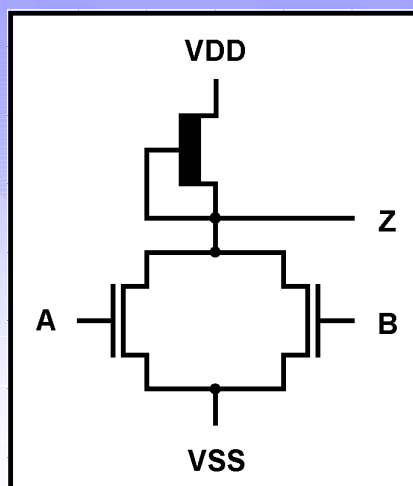
## Transistor nMOS

### Transistor utilisé en interrupteur



## Transistor nMOS

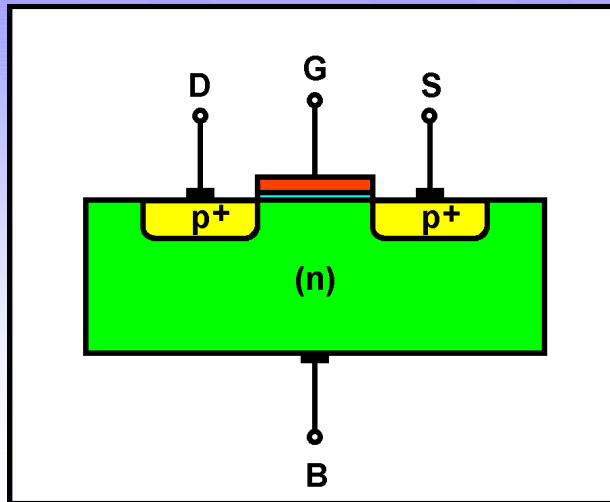
### Circuit nMOS



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

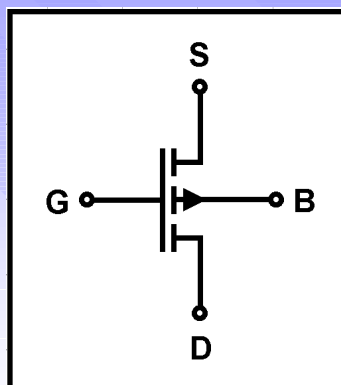
# Transistor pMOS

## Coupe du transistor



# Transistor pMOS

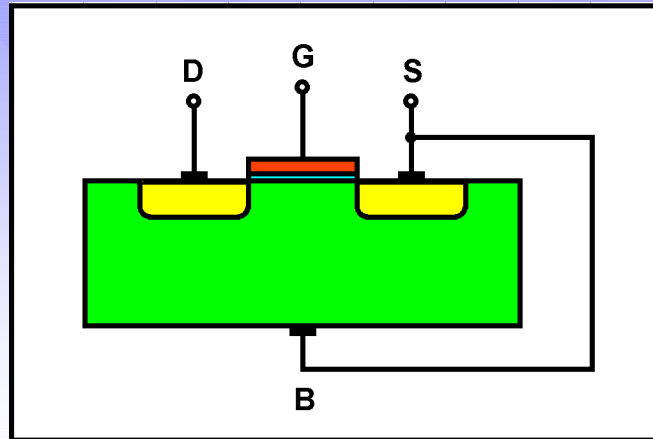
## Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre DB et SB

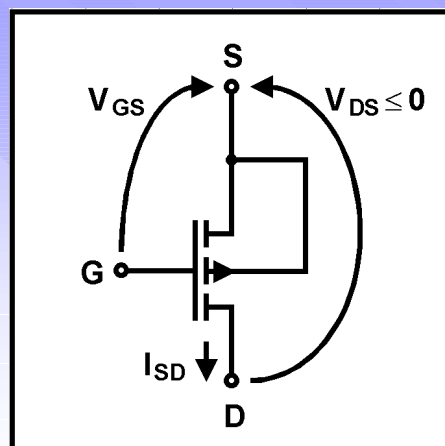
## Transistor pMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



## Transistor pMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



# Transistor pMOS

## Fonctionnement du transistor

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

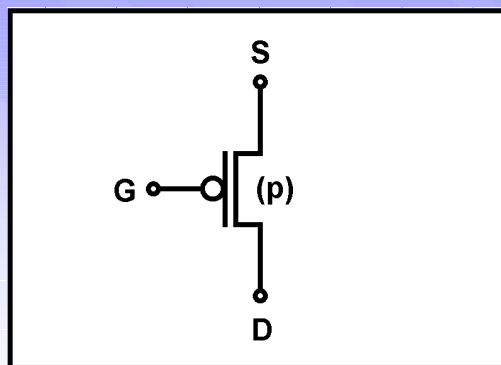
Le transistor est bloqué lorsque  $V_{GS} > V_T$

$V_T$  : tension de seuil du transistor

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

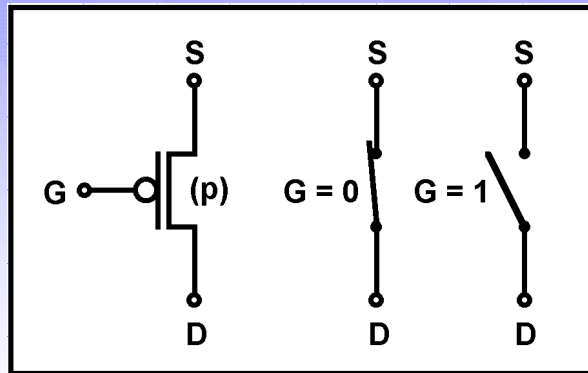
# Transistor pMOS

## Symbole simplifié du transistor

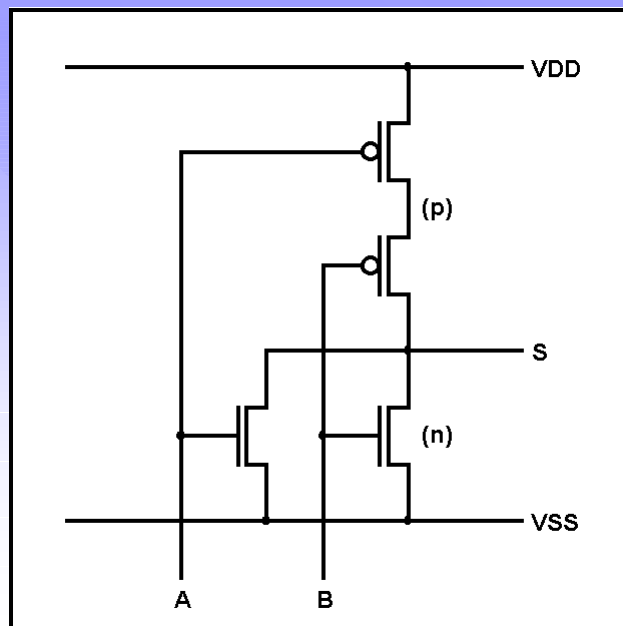


# Transistor pMOS

## Transistor utilisé en interrupteur

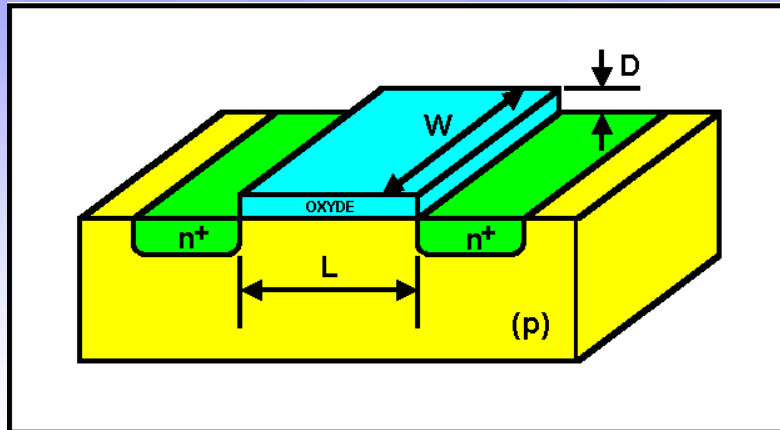


## Circuit CMOS



# 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  $\beta$  est le facteur de gain du transistor:

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

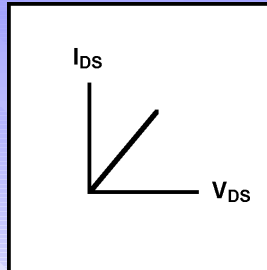
Le facteur technologique  $\epsilon \mu / D$  introduit la constante diélectrique de l'oxyde ( $\epsilon$ ) et la mobilité des électrons ( $\mu_n$ ) ou des trous ( $\mu_p$ ) avec:

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

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:

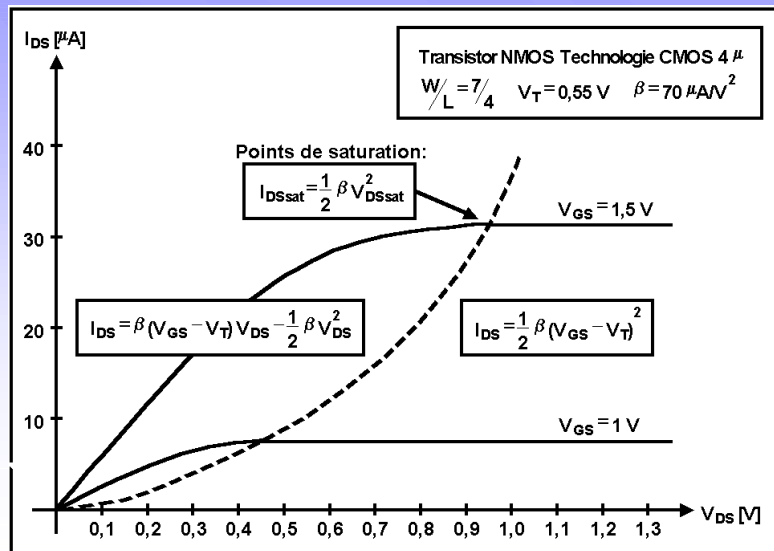
$$V_{DSsat} = V_{GS} - V_T$$

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:

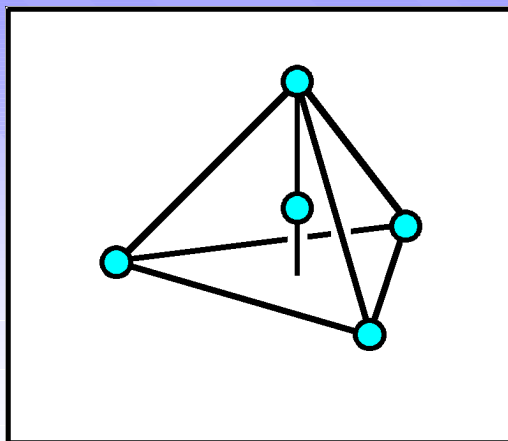
les métaux présentent une grande conductivité pratiquement indépendante de la température

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

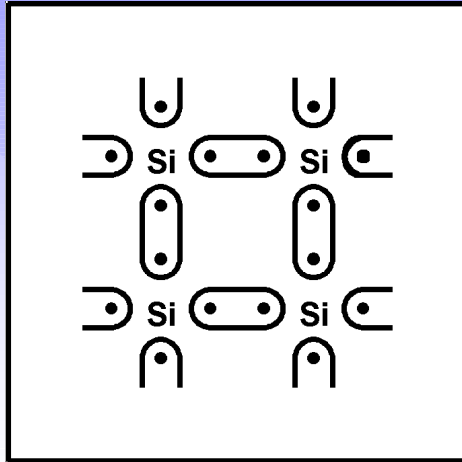
### Silicium pur: arrangement atomique



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

## Semi-conducteur

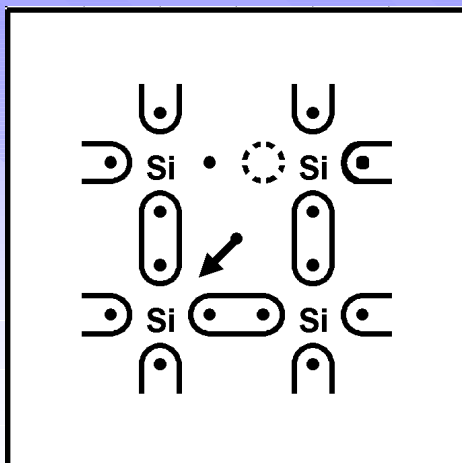
Silicium pur: atomes tétravalents



Le silicium (Si) possède quatre électrons de valence

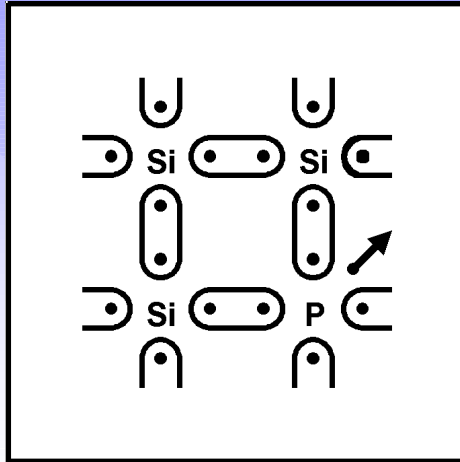
## Semi-conducteur

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



## Semi-conducteur

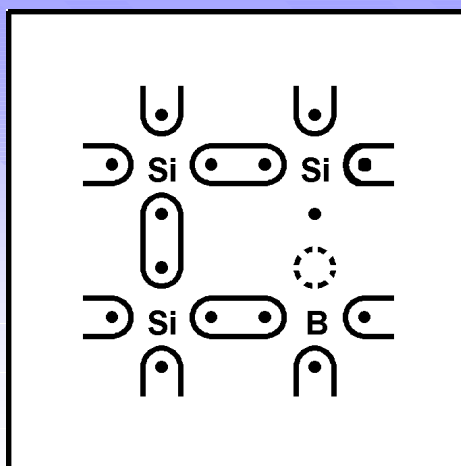
Silicium dopé de type n: atome pentavalent (0,1ev)



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

## Semi-conducteur

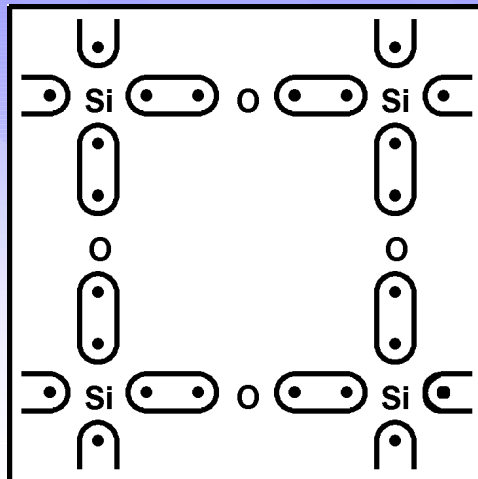
Silicium dopé de type p: atome trivalent



Adjonction d'atomes accepteurs: bore (B)

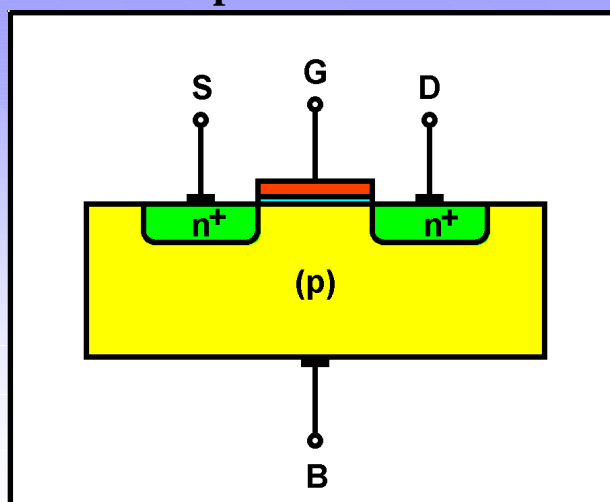
## Semi-conducteur

Oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ): couche isolante ( $0,1\mu$ )



## Transistor nMOS

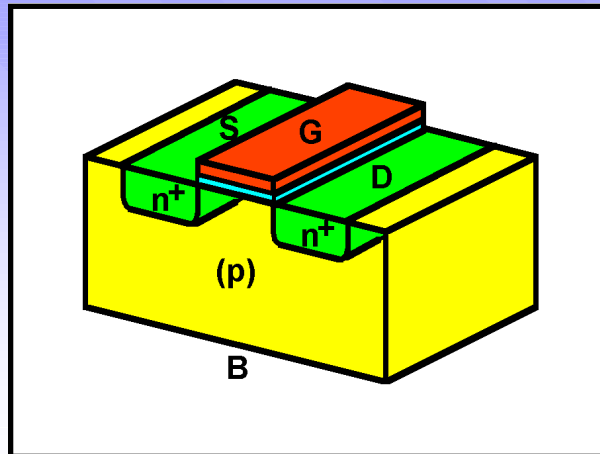
Coupe du transistor



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

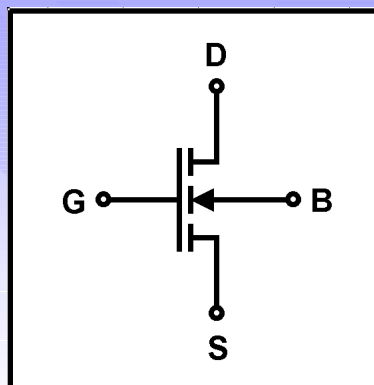
## Transistor nMOS

### Vue spatiale du transistor



## Transistor nMOS

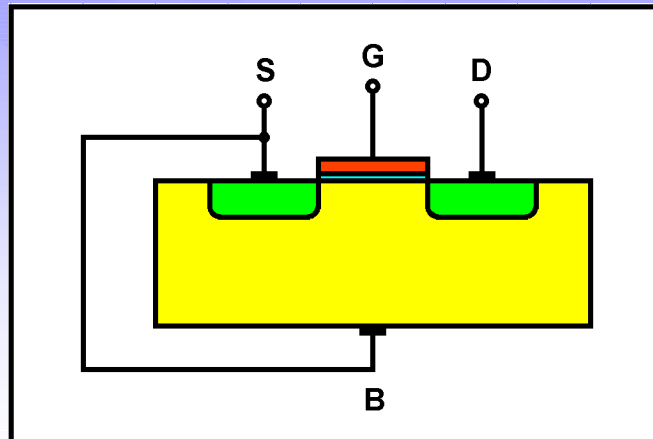
### Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre BD et BS

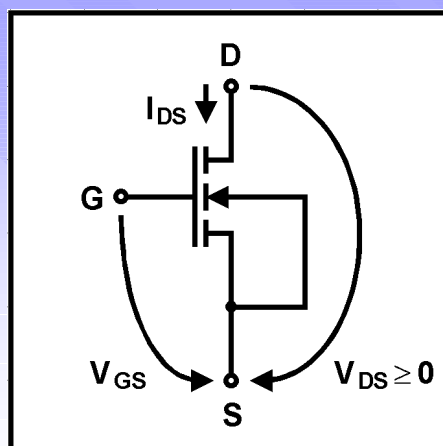
## Transistor nMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



## Transistor nMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



# Transistor nMOS

## Fonctionnement du transistor

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

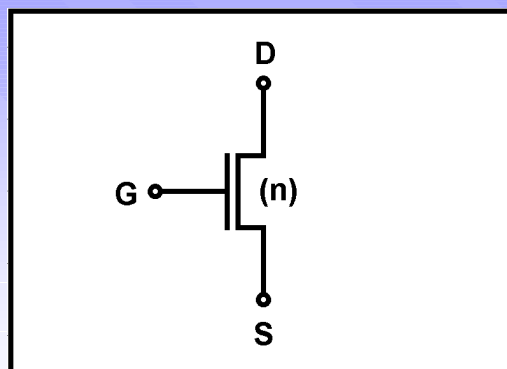
Le transistor est bloqué lorsque  $V_{GS} < V_T$

$V_T$  : tension de seuil du transistor

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

# Transistor nMOS

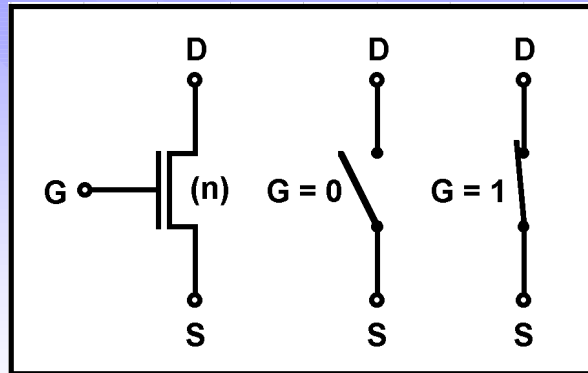
## Symbole simplifié du transistor





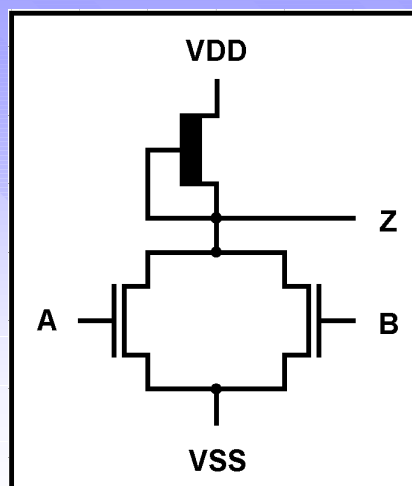
## Transistor nMOS

### Transistor utilisé en interrupteur



## Transistor nMOS

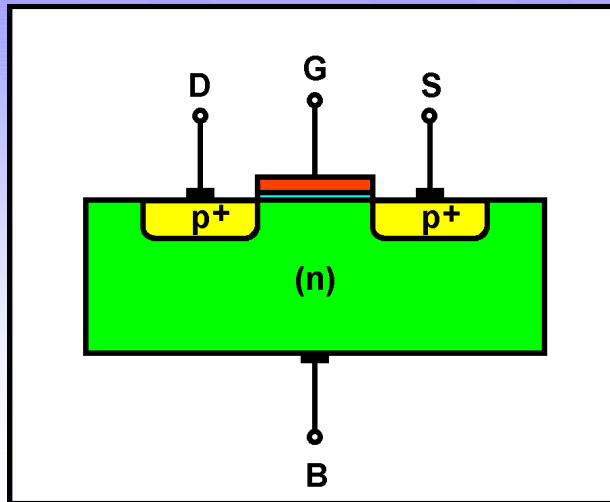
### Circuit nMOS



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

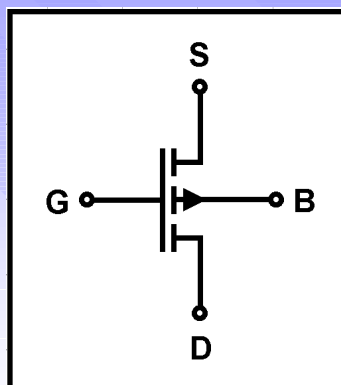
# Transistor pMOS

## Coupe du transistor



# Transistor pMOS

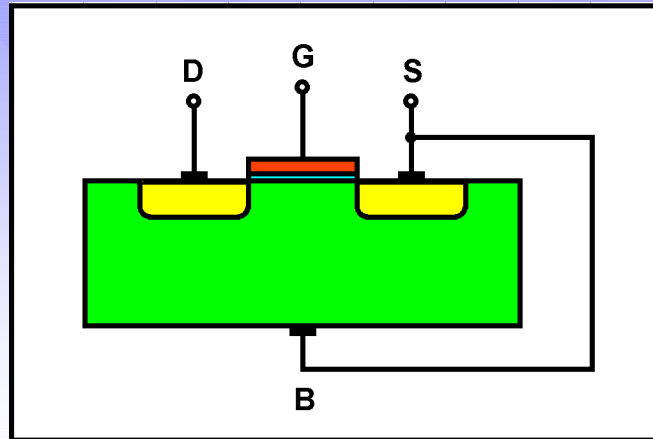
## Symbole du transistor



la diode symbolise les jonctions pn entre DB et SB

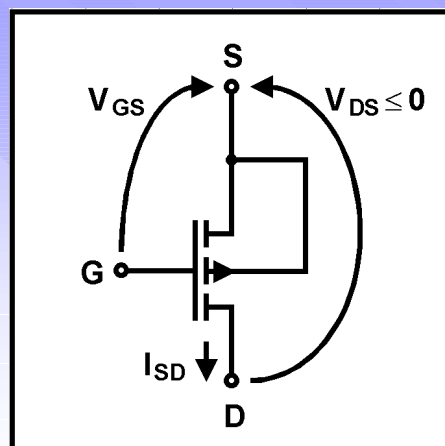
## Transistor pMOS

Coupe du transistor utilisé en tripôle



## Transistor pMOS

Symbole du transistor utilisé en tripôle



# Transistor pMOS

## Fonctionnement du transistor

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

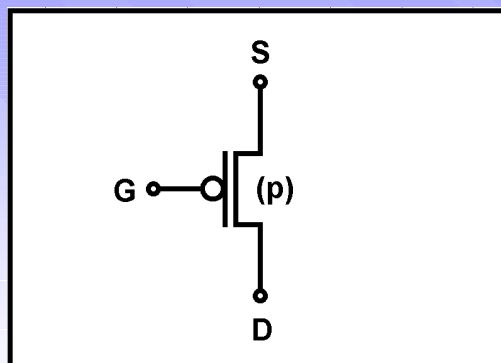
Le transistor est bloqué lorsque  $V_{GS} > V_T$

$V_T$  : tension de seuil du transistor

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

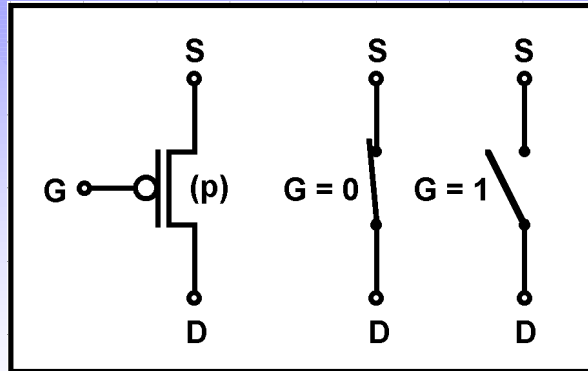
# Transistor pMOS

## Symbole simplifié du transistor

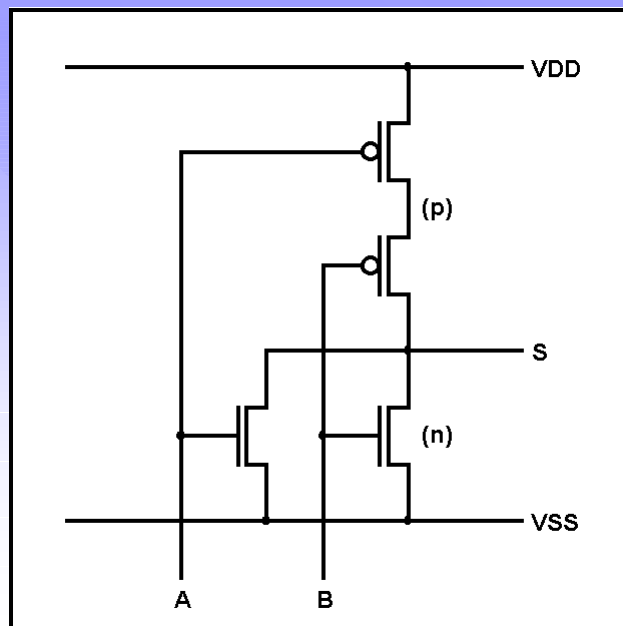


# Transistor pMOS

## Transistor utilisé en interrupteur

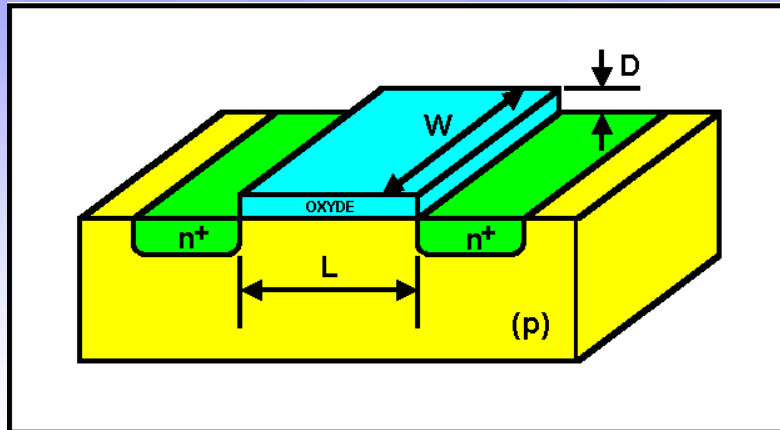


## Circuit CMOS



# 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  $\beta$  est le facteur de gain du transistor:

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

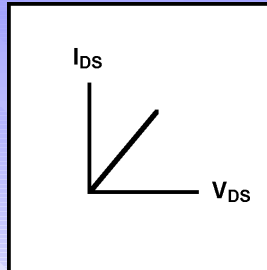
Le facteur technologique  $\epsilon \mu / D$  introduit la constante diélectrique de l'oxyde ( $\epsilon$ ) et la mobilité des électrons ( $\mu_n$ ) ou des trous ( $\mu_p$ ) avec:

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

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

