

Chap. 12: Fonderies et procédés

Traiter le silicium

12.1: Fonderies

- fonderie = usine de circuits intégrés
- spécificités
 - procédés physico-chimiques
 - pureté des matériaux quasi au niveau atomique
 - températures élevées et très précises
 - positionnement micrométrique et élimination des vibrations
- ex: Fab2 (Mietec, 1993): 100M€ pour 3000m²

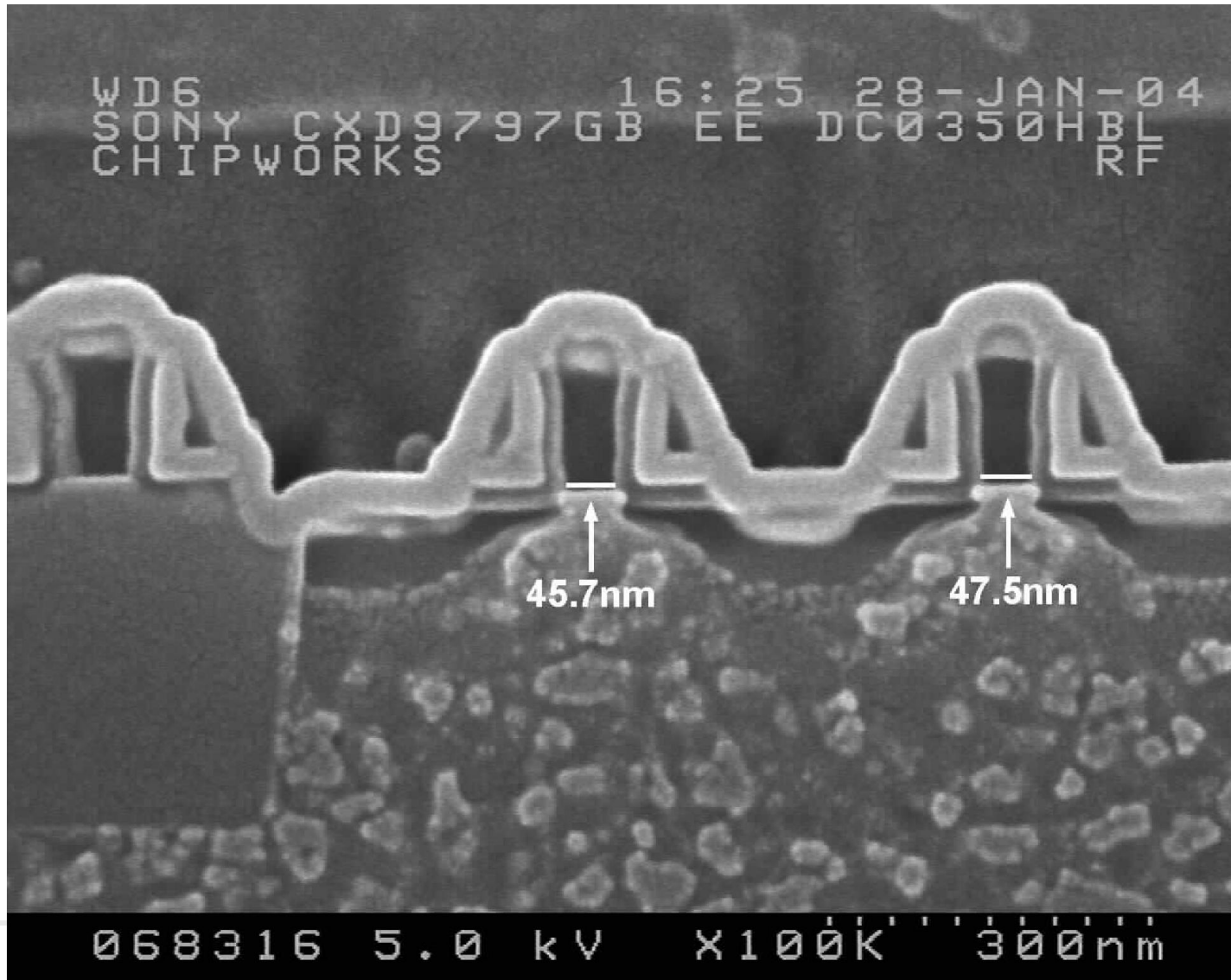
"Salles blanches"

- but: pureté de l'air
- classe 1 = moins de 1 particule de $0,1\mu\text{m}$ par pied³
- hôpital = classe 10000



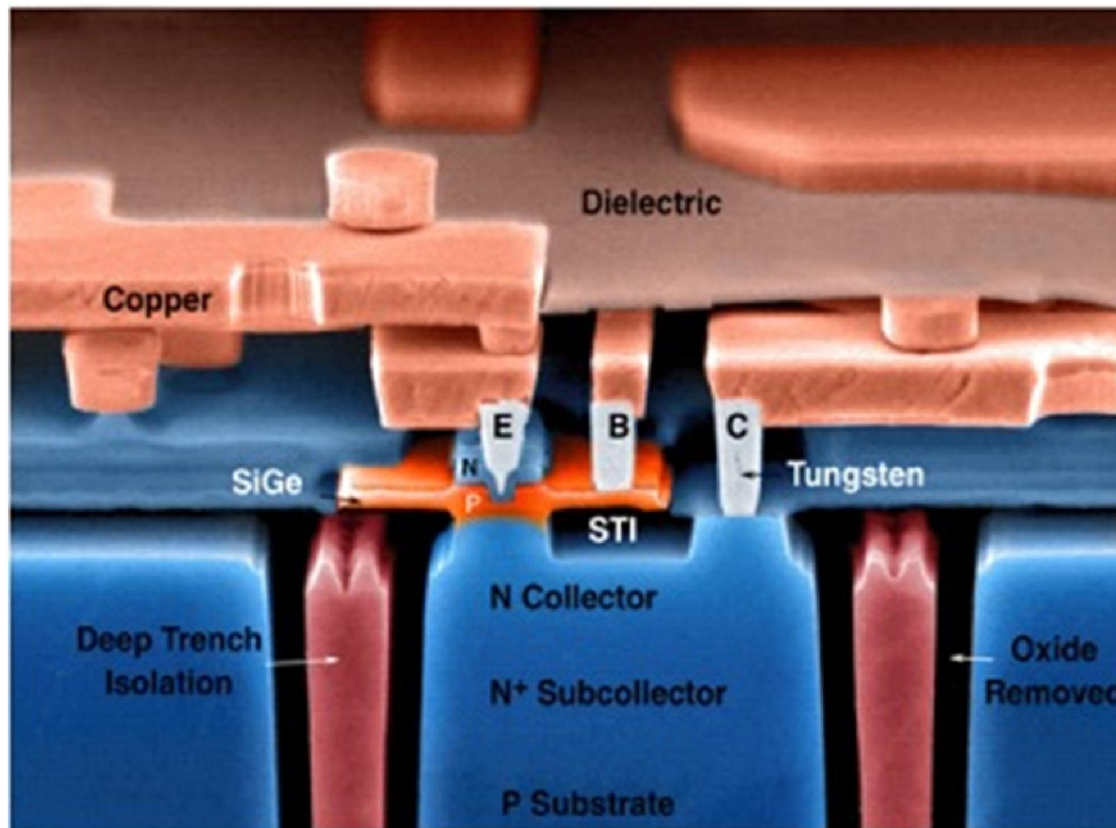
12.2: Principales opérations de fonderie (aperçu)

Chip= structure 3D à l'échelle du $\mu\text{m}/\text{nm}$



Chip= structure 3D à l'échelle du $\mu\text{m}/\text{nm}$

- ...obtenue par des processus 2D successifs



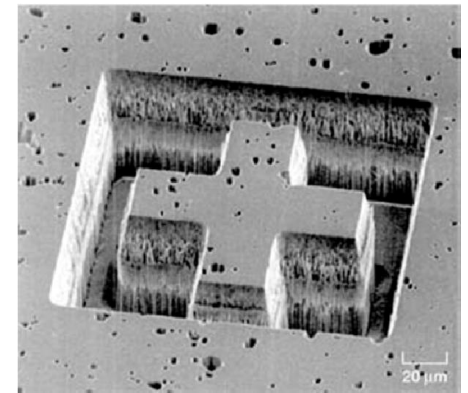
La base de tout: la tranche de silicium

- diamètre: 5 à 50cm / épaisseur: 500 μ m



La tranche subit une succession de procédés physico-chimiques

- graver un motif
 - photolithographie + gravure
- modifier les propriétés électriques du Si
 - dopage par diffusion
 - dopage par implantation ionique
- déposer ou faire croître un matériau
 - oxydation
 - épitaxie
 - dépôt de couches minces
 - métallisation



Préparation du substrat: rappels

- **semiconducteurs (Si)**
 - 2 types de charges mobiles
 - conductivité modulable par **dopage** => zones P et N
 - => diodes et transistors
- **cristal**
 - solide constitué d'un arrangement périodique 3D d'atomes
 - tranche = Si monocristallin
 - densité atomique: $5 \cdot 10^{22}$ at/cm³
 - ne pas confondre avec le Si polycristallin ("polysilicium«)

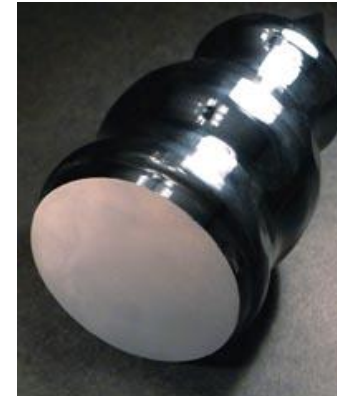
Préparation du substrat: silicium EGS

- matériau de départ: **silice**
- => Si **MGS** (metallurgical grade)
 - impuretés: qqes dizaines ppm
- => Si **EGS** (electrical grade)
 - impuretés $\ll 0,002\text{ppm}$



Préparation du substrat: tranches de Si

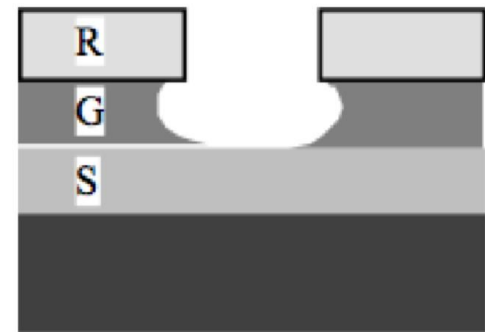
- croissance d'un **monocristal** à partir d'un germe
- découpage
- protection par oxyde



La gravure (*etching*)

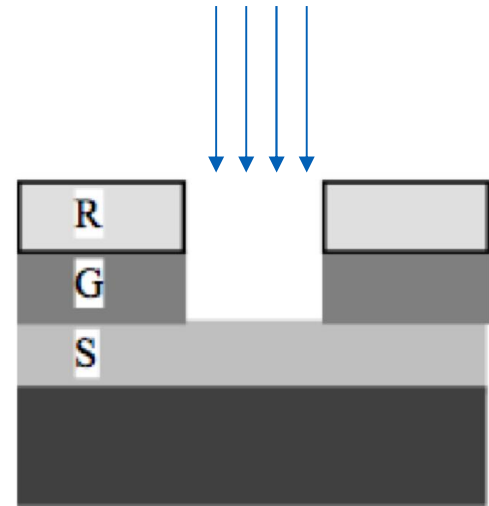
gravure chimique

- principe
 - graver = enlever une couche de matière de manière sélective (suivant un motif)
 - zones protégées par un film (*resist*)
- 1) gravure chimique
 - agent chimique attaquant le Si
 - motifs deviennent trop petits
 - inconvénient: attaque isotrope



La gravure (*etching*): gravure par effet de plasma

- 2) gravure par plasma
 - plasma = gaz ionisé (ions + e^- libres)
 - action physique (bombardement d'ions) + chimique
 - +: attaque anisotrope, meilleur respect du motif

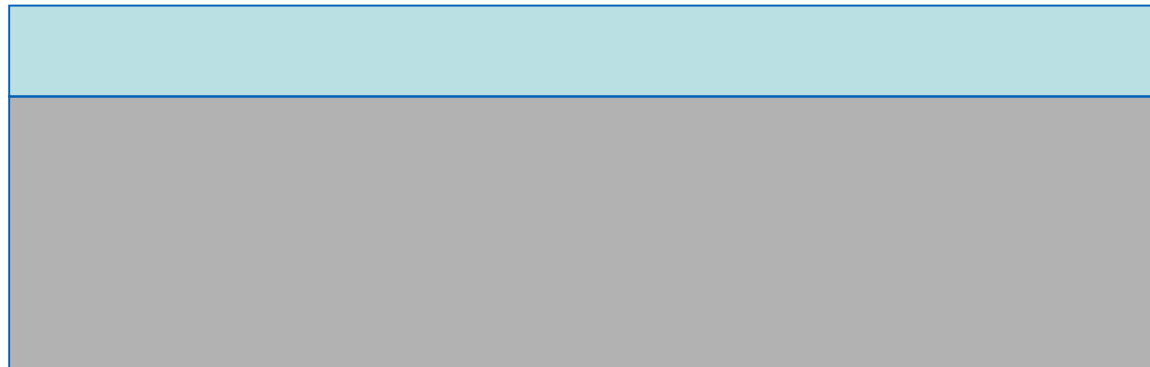


- principe
 - dépôt d'un motif sur la tranche (sous forme d'un film de résine) en vue d'une opération de gravure ou de croissance d'un matériau
 - intervient de manière répétée dans la fabrication
- étapes
 - 1) dépôt d'un film de résine uniforme
 - 2) exposition aux UV au travers d'un masque => modification chimique des zones exposées
 - 3) lavage au solvant => enlèvement des zones exposées
 - 4) application d'un processus (ex. gravure)
 - 5) nettoyage de la résine restante

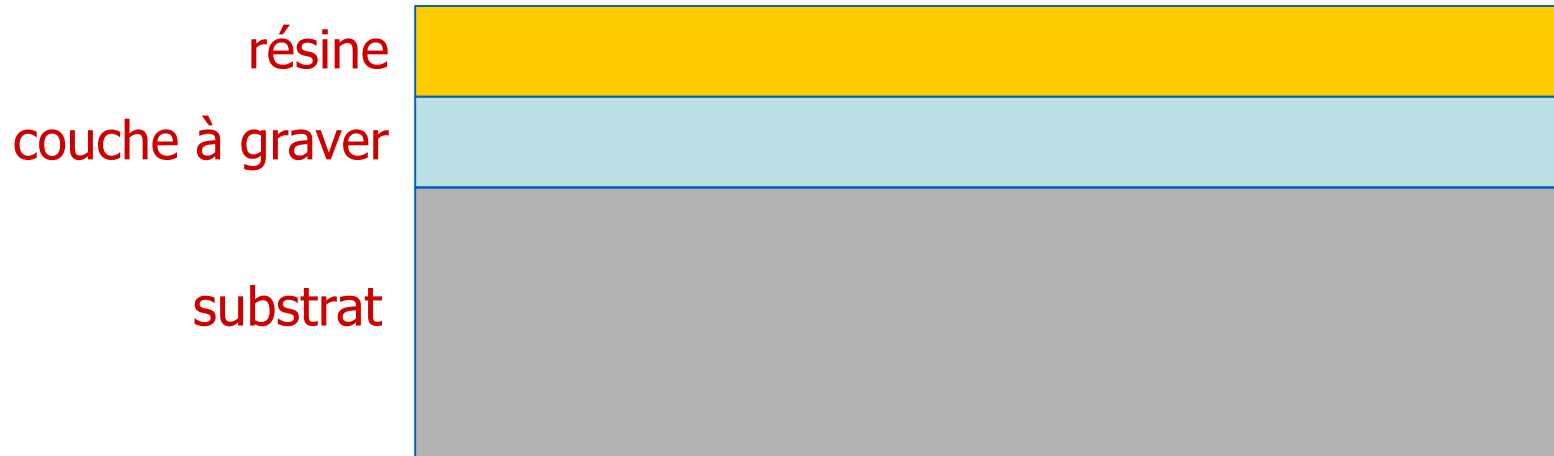
- 0) situation de départ

couche à graver

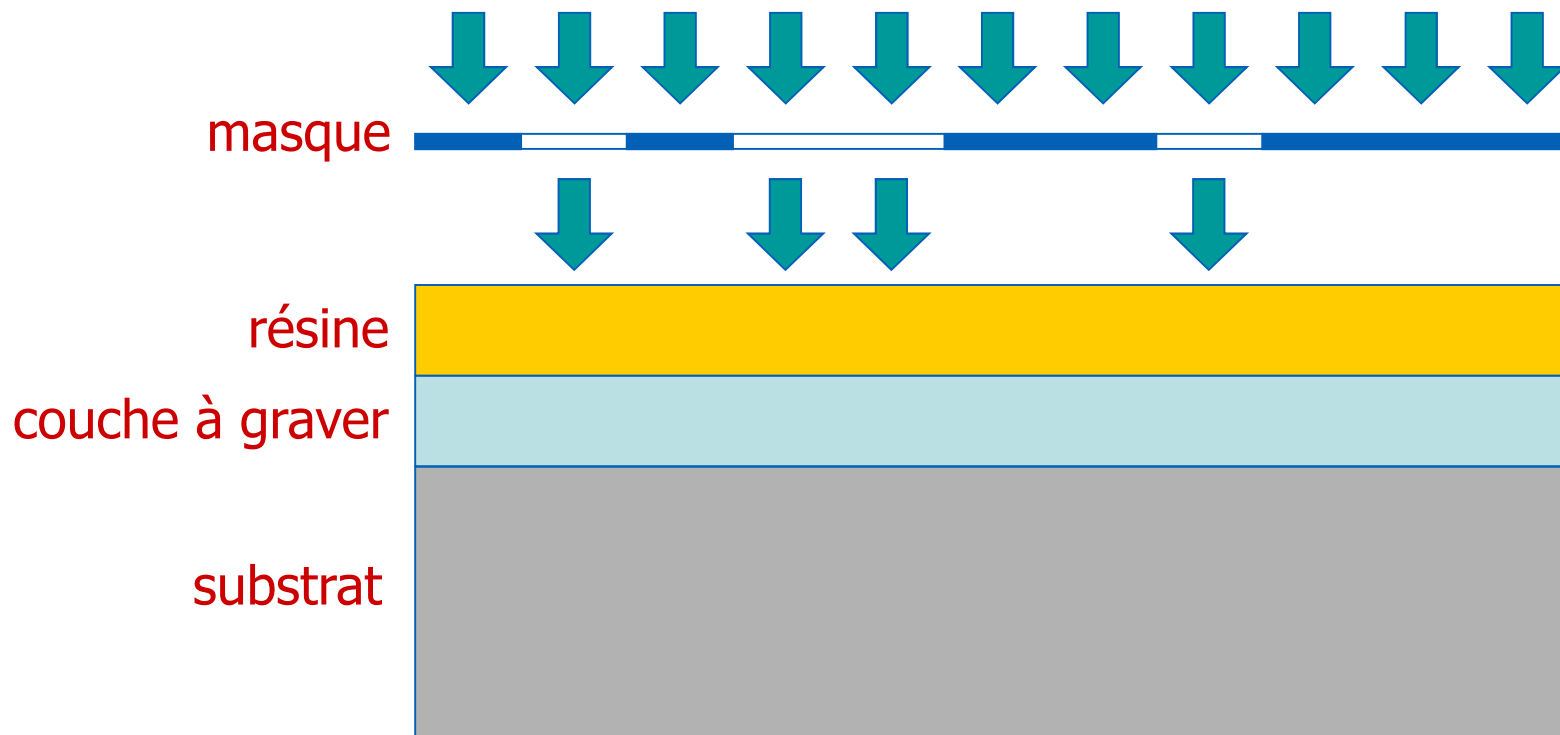
substrat



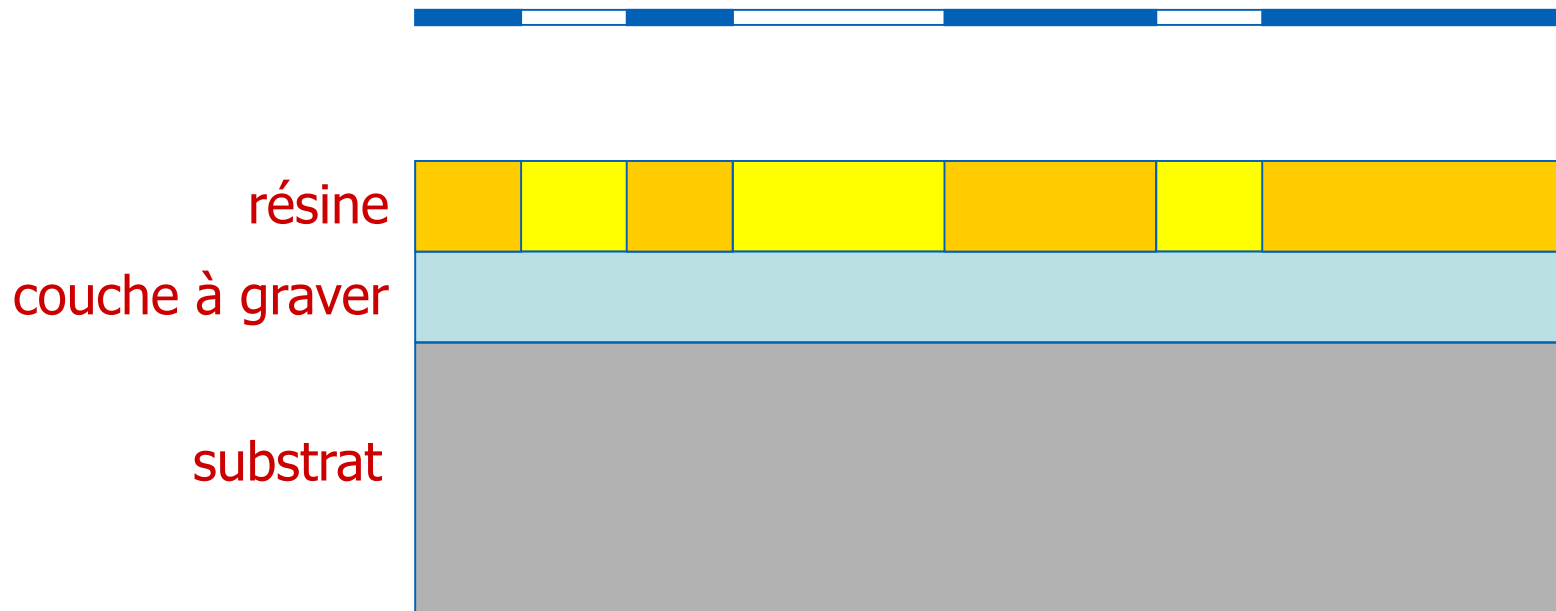
- 1) dépôt uniforme de résine



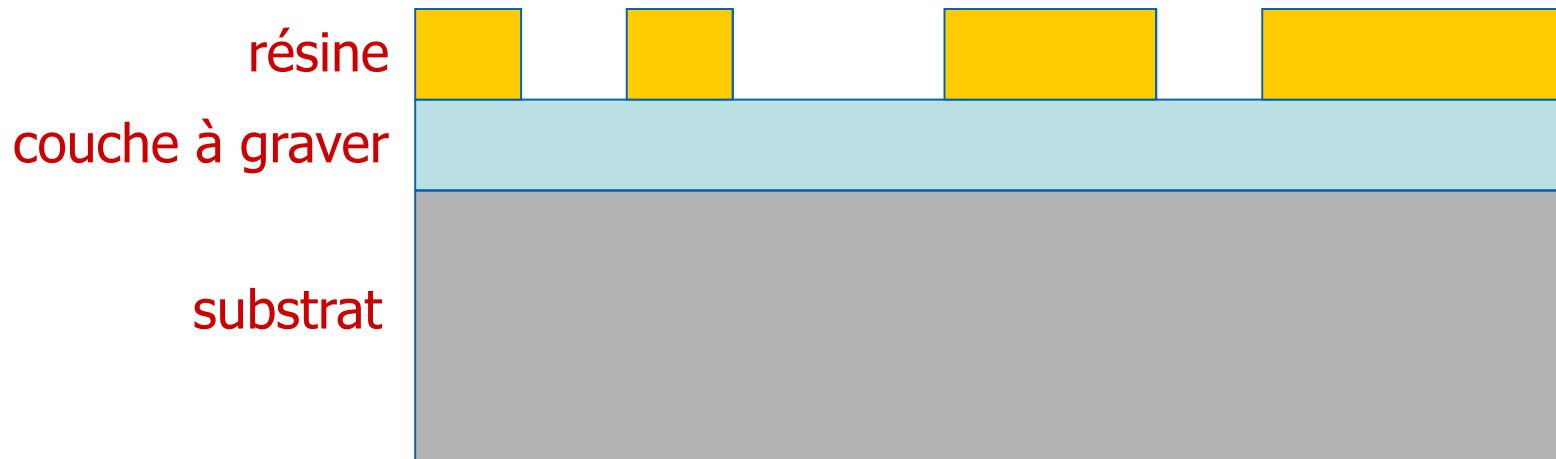
- 2) exposition à travers un masque



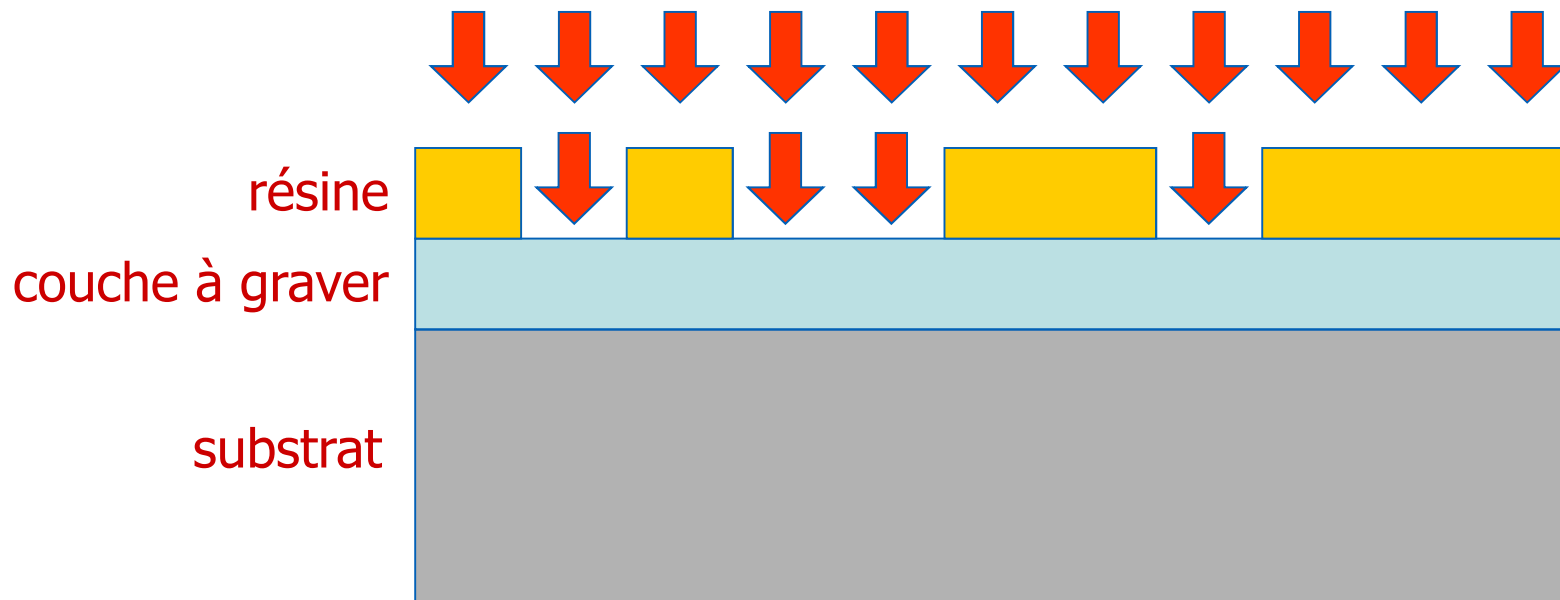
- 2) fin de l'exposition:



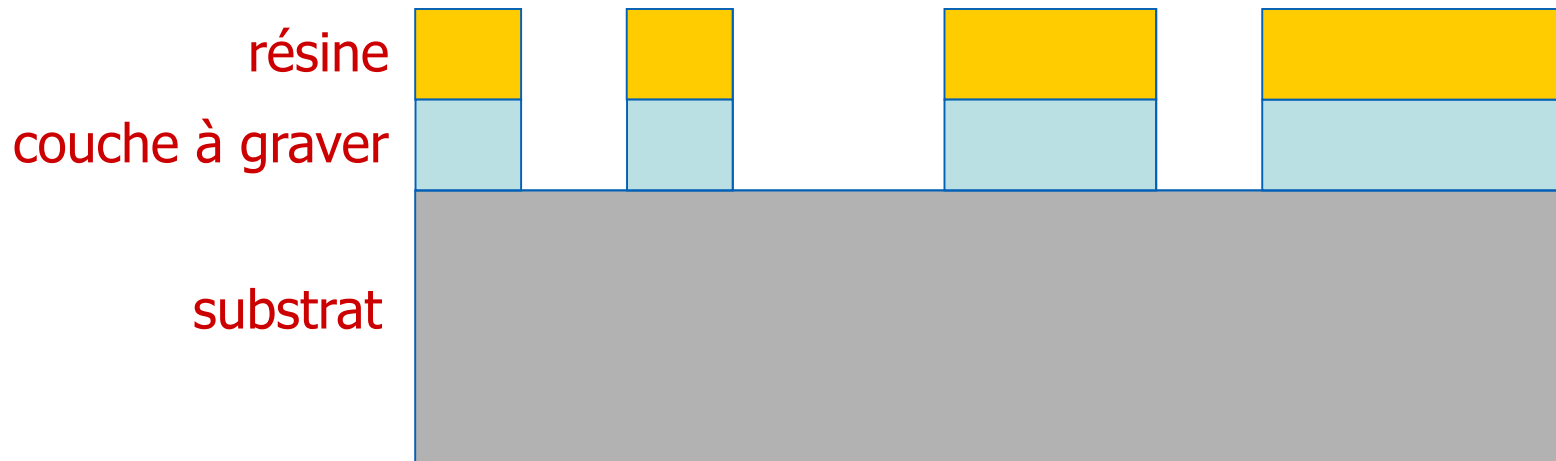
- 3) développement
 - lavage au solvant des zones exposées



- 4) gravure (ex: plasma)



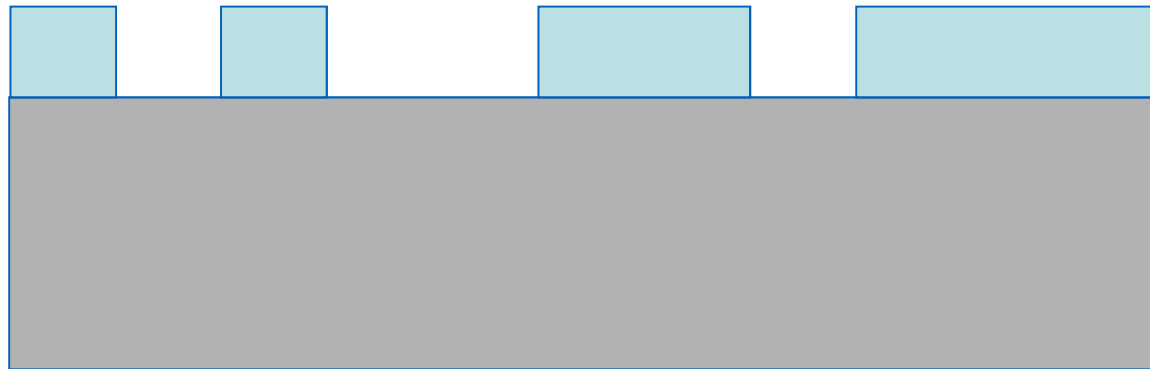
- 4) fin de la gravure



- 5) nettoyage de la résine
 - le motif a été transféré sur le substrat

couche à graver

substrat



Photolithographie: masques

- **masque** = original du motif à transférer
 - réticule créé à partir d'un fichier informatique
 - duplication du réticule sur le masque (répéteur)
- coût très élevé (qqes k€)
- difficultés
 - la diffraction limite les dimensions
 - motif plus fin => longueur d'onde plus courte
- évolutions récentes en photolithographie
 - lithographie aux rayons X
 - lithographie par faisceau électronique

- Principe

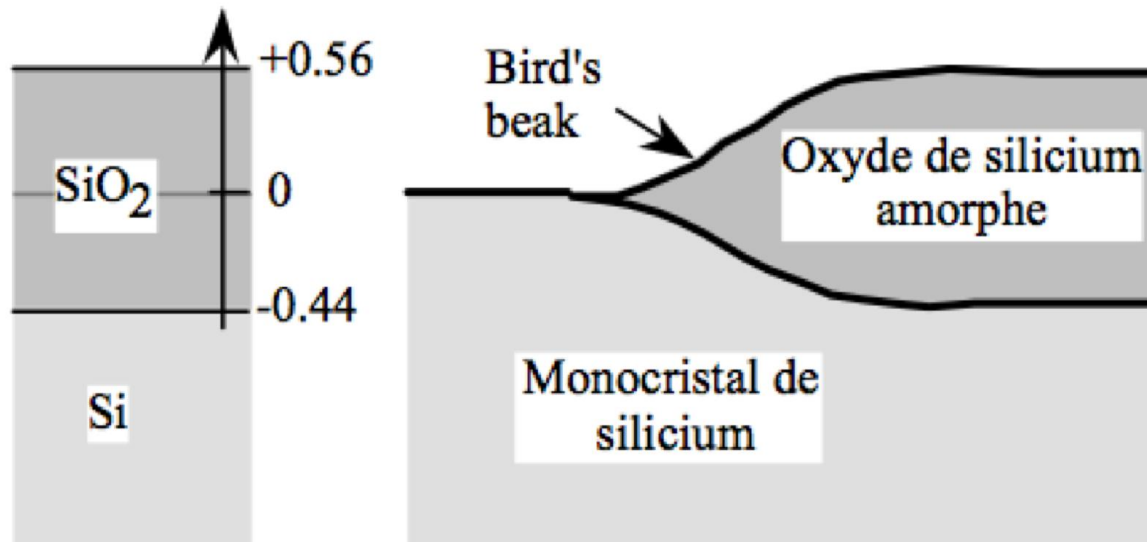
- croissance d'une couche SiO_2 amorphe sur le Si
 - chimiquement: très stable
 - électriquement: excellent isolant électrique

- Usages

- couche protectrice (passivation)
- oxyde de champ (intercalaire entre éléments actifs)
- oxyde de grille (grille des MOS)
- oxyde mince (diélectrique pour condensateurs)

L'oxydation: profil "en bec d'oiseau"

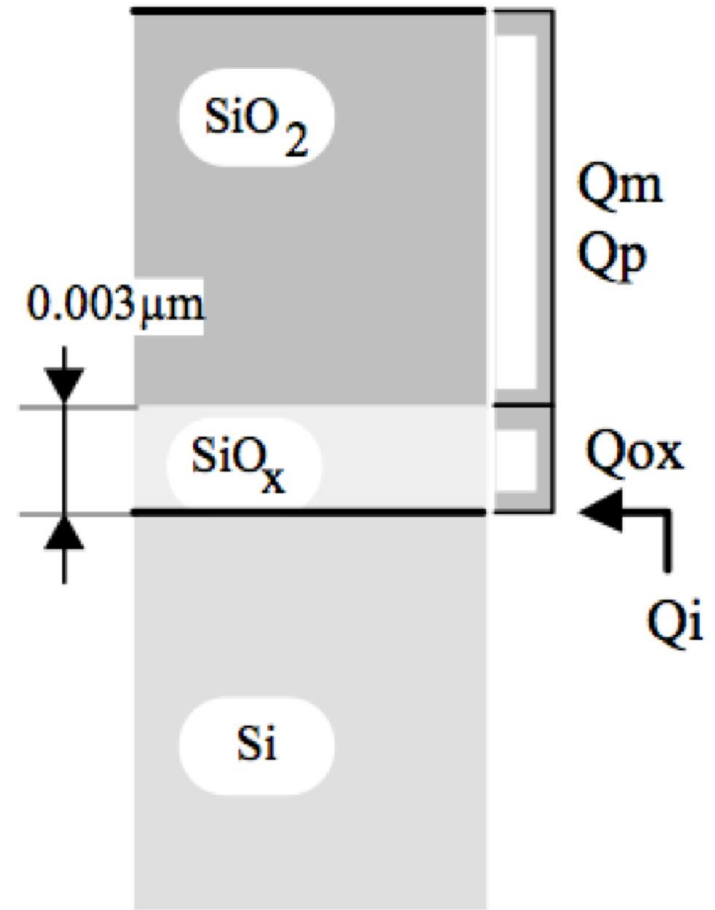
- l'oxyde "s'enterre" dans le Si:



L'oxydation: détails techniques

- oxydation dans un four à 1100°C
- oxydation sèche
 - agent oxydant: O_2
 - 0,2 μm SiO_2 / heure
 - réservé pour oxyde de grille (très bonne qualité)
- oxydation humide
 - agent oxydant: H_2O
 - 3 μm SiO_2 / heure
 - pour autres usages (oxyde plus poreux)

- charges électriques emprisonnées dans l'oxyde de grille
=> influencent les propriétés des MOS



Le dépôt de couches minces (CVD)

Chemical Vapor Deposition

- Principe

- dépôt de matériau non métallique: polysilicium, oxydes, nitrure de silicium
- "chemical vapor deposition": favorisation de réactions chimiques déposant le matériau, initialement véhiculé par un gaz

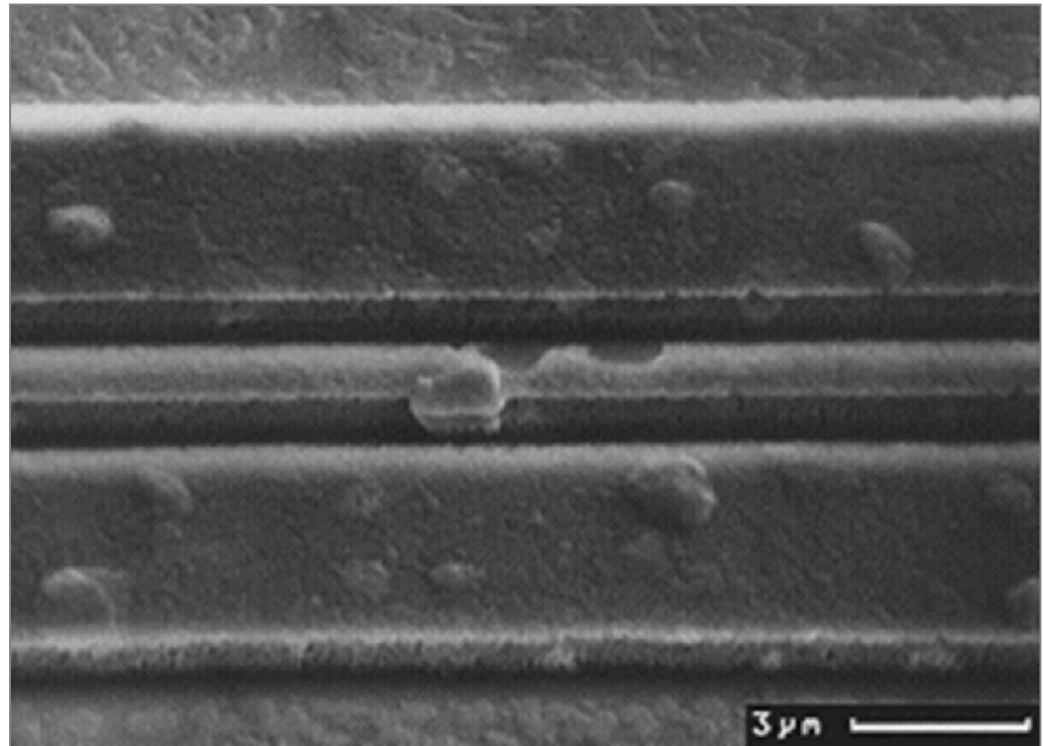
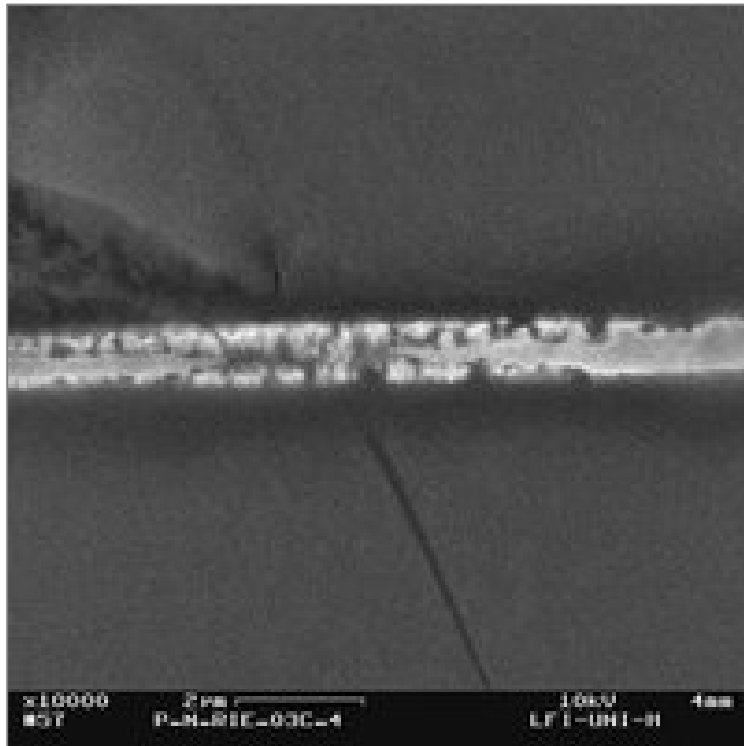
- dépôt de Si polycristallin (grains 0,1 à 1 μ m)
 - gaz porteur: silane (SiH_4)
 - 650°C
- usages
 - grille des MOS + pistes conductrices associées
 - seconde couche conductrice

- dépôt de SiO_2 , P_2O_5 (PyroGlass), etc
 - 400°C à 900°C
- usages
 - couches isolantes entre couches conductrices
 - couche de passivation finale (PyroGlass)
 - à ne pas confondre avec croissance d'oxyde à partir de la tranche ("oxydation")

- dépôt de Si_3N_4
 - 700°C à 900°C
- usages
 - croissance d'un oxyde épais isolant les zones passives du circuit par rapport au substrat
 - couche de passivation

- Principe
 - croissance d'une couche supplémentaire de **silicium** **prolongeant la structure cristalline** du substrat
 - couche de 3 à 10 μ m constituant la zone utile pour implanter les circuits
- intérêt
 - profils de dopage impossibles autrement
- détails techniques
 - apport de Si via gaz (+ haute T° que CVD)

- principe
 - dépôt de matériau métallique (Al)
 - similaire à CVD
- usage
 - réalisation des connexions (faible résistivité)
- difficultés
 - T° fusion Al = 650°C (basse!)
 - Al sensible à l'électromigration

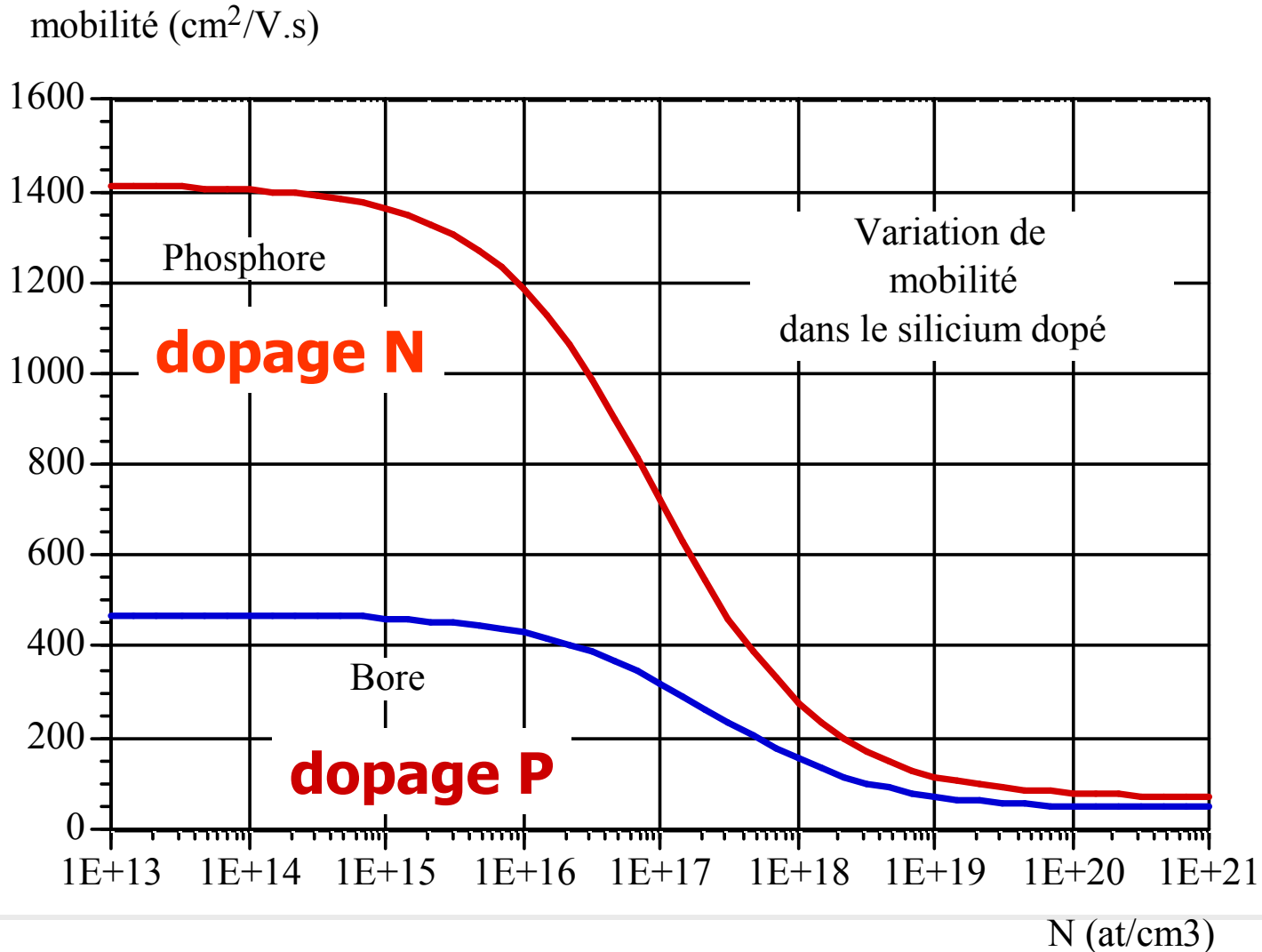


- électromigration
 - arrachement d'atomes se manifestant pour des grandes densités de courant ($>1 \text{ mA}/\mu\text{m}^2$)
 - phénomène destructif pouvant provoquer la rupture de la piste
 - densités rencontrées en pratique!

- polysilicium
- silicides
 - matériaux céramiques (MoSi_2 , TaSi_2 , TiSi_2 , WSi_2 , etc)
 - avantage: T° fusion plus grande
 - inconvénient: résistivité plus grande
- technologies à plusieurs couches de métal

- principe
 - insertion d'atomes étrangers pour modifier la conductivité locale du Si
 - => zones P et N plus ou moins dopées
- atomes dopants
 - atomes donneurs (d'e⁻): Sb, P, As
 - atomes accepteurs (d'e⁻): B, Al, Ga
 - 100% dopants ionisés à T° ambiante
 - taux de dopage usuel: 10^{14} à 10^{21} at/cm³
 - une faible concentration en dopants suffit pour modifier fortement la conductivité du Si

Le dopage: dopage et mobilité/conductivité



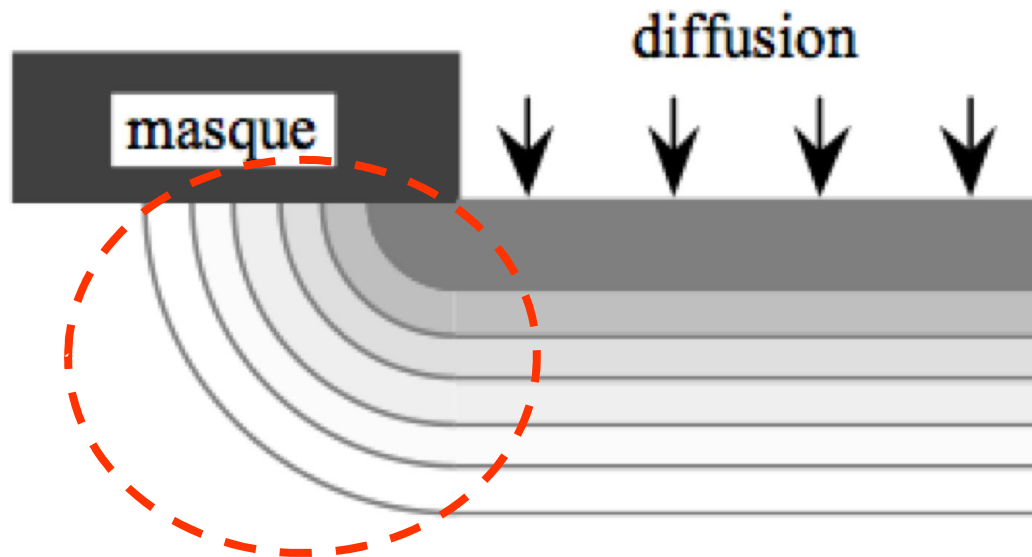
Le dopage: dopage et mobilité/conductivité

- canal MOS en matériau faiblement dopé
 - car transconductance proportionnelle à mobilité
 - et mobilité élevée obtenue pour faible dopage
- MOS de préférence à canal N
 - car mobilité des électrons supérieure à celle des trous
- Drain et Source fortement dopés pour haute conductivité

- Rappel: diffusion
 - phénomène général: réorganisation d'un groupe de "particules" **mobiles** suite à l'existence d'un gradient de concentration au sein de celles-ci
 - loi de Fick
 - $\delta C / \delta t = -\delta F / \delta x$
 - avec $F = -D(\delta C / \delta x)$

- 2 étapes:
- prédéposition ($C_{\text{surf}} = \text{constante}$)
 - gaz porteur (dopants) constamment renouvelé
 - but: introduire une quantité donnée de porteurs dans le matériau
- drive-in
 - en atmosphère neutre
 - but: égalisation des concentrations près de la surface

Dopage par diffusion: sous-diffusion



- principe
 - bombardement du Si par un faisceau d'ions
- avantages (> < diffusion)
 - profondeur d'implantation réglable via énergie des ions
 - meilleure précision sur la concentration
 - opération à température ambiante
 - effet de sous-diffusion moindre (anisotropie)
- inconvénient
 - nécessite un recuit (*annealing*) pour réparer les dommages dus aux collisions atomiques

La tranche subit une succession de procédés physico-chimiques

- graver un motif
 - photolithographie + gravure
- modifier les propriétés électriques du Si
 - dopage par diffusion
 - dopage par implantation ionique
- altérer Si ou déposer ou faire croître un matériau
 - oxydation
 - dépôt de couches minces
 - épitaxie
 - métallisation

fabrication d'un écran TFT

