

**LA DIFFUSION THERMIQUE DE
DOPANTS DANS LE SILICIUM
B. ROUSSET**

PLAN

I – INTRODUCTION

II - LOIS DE FICK

- **Prédépôt**
- **Redistribution**

III - LES DIFFERENTES TECHNIQUES

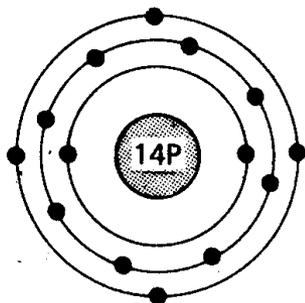
IV – CARACTERISATION

V - LES EFFETS SECONDAIRES DE LA DIFFUSION

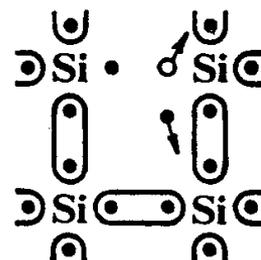
VI - ANNEXE

RAPPELS 1: Le silicium

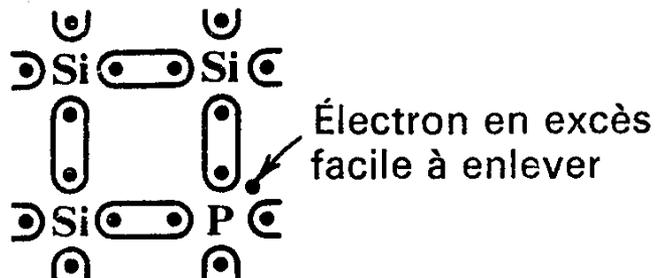
Atome de silicium



Cristal de silicium



Semiconducteur de type n



Semiconducteur de type p

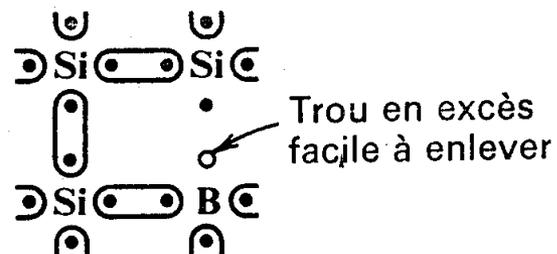


Fig. 1 : Schéma de l'atome de Si et représentation du cristal de Si dopé et non dopé

RAPPELS 2: La diode semi-conducteur

Diode semiconducteur

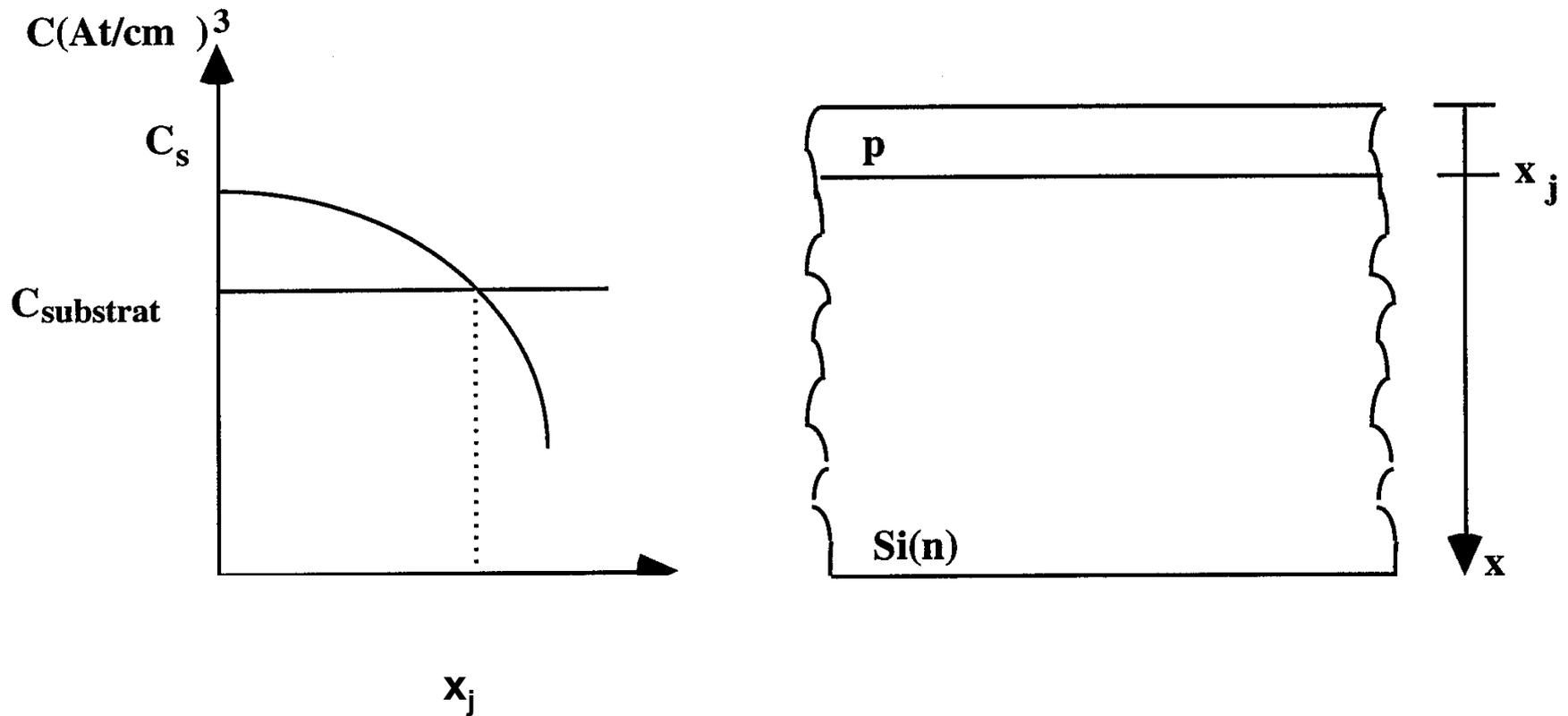


Fig. 2 : Profil de diffusion et profondeur de jonction

Tableau de Mendeleïev

Periodic Table of the Elements

IA										IIA										IIIB										IVB										VB										VIB										VIIB										VIII										VIII										VIII										IB										IIB										IIIA										IVA										VA										VIA										VIIA										VIIIA									
1 1.008 H Hydrogen 0.0899*	3 6.941 Li Lithium 0.53	4 9.012 Be Beryllium 1.85	11 22.990 Na Sodium 0.97	12 24.305 Mg Magnesium 1.74	19 39.098 K Potassium 0.86	20 40.08 Ca Calcium 1.55	21 44.956 Sc Scandium 3.0	22 47.867 Ti Titanium 4.50	23 50.942 V Vanadium 5.8	24 51.996 Cr Chromium 7.18	25 54.931 Mn Manganese 7.43	26 55.845 Fe Iron 7.86	27 58.933 Co Cobalt 8.90	28 58.693 Ni Nickel 8.90	29 63.546 Cu Copper 8.96	30 65.39 Zn Zinc 7.14	31 69.723 Ga Gallium 5.91	32 72.61 Ge Germanium 5.32	33 74.922 As Arsenic 5.73	34 78.96 Se Selenium 4.80	35 79.904 Br Bromine 3.12	36 83.80 Kr Krypton 3.74*	37 85.468 Rb Rubidium 1.53	38 87.62 Sr Strontium 2.6	39 89.906 Y Yttrium 4.5	40 91.224 Zr Zirconium 6.49	41 92.906 Nb Niobium 8.55	42 95.94 Mo Molybdenum 10.2	43 (98) Tc Technetium 11.5	44 101.07 Ru Ruthenium 12.2	45 102.906 Rh Rhodium 12.4	46 106.42 Pd Palladium 12.0	47 107.868 Ag Silver 10.5	48 112.411 Cd Cadmium 8.65	49 114.818 In Indium 7.31	50 118.71 Sn Tin 7.30	51 121.76 Sb Antimony 6.69	52 127.60 Te Tellurium 6.24	53 126.905 I Iodine 4.92	54 131.29 Xe Xenon 5.89*	55 132.905 Cs Cesium 1.87	56 137.327 Ba Barium 3.5	57 138.906 La Lanthanum 6.7	72 178.49 Hf Hafnium 13.1	73 180.948 Ta Tantalum 16.6	74 183.84 W Tungsten 19.3	75 186.207 Re Rhenium 21.0	76 190.23 Os Osmium 22.4	77 192.217 Ir Iridium 22.5	78 195.08 Pt Platinum 21.4	79 196.967 Au Gold 19.3	80 200.59 Hg Mercury 13.53	81 204.383 Tl Thallium 11.85	82 207.2 Pb Lead 11.4	83 208.980 Bi Bismuth 9.74	84 (209) Po Polonium 9.4	85 (210) At Astatine -	86 (222) Rn Radon 9.91*	87 (223) Fr Francium -	88 226.025 Ra Radium 5	89 227.028 Ac Actinium 10.07	58 140.115 Ce Cerium 6.770	59 140.908 Pr Praseodymium 6.77	60 144.24 Nd Neodymium 7.00	61 (145) Pm Promethium 6.475	62 150.36 Sm Samarium 7.54	63 151.965 Eu Europium 5.26	64 157.25 Gd Gadolinium 7.89	65 158.925 Tb Terbium 8.27	66 162.50 Dy Dysprosium 8.54	67 164.930 Ho Holmium 8.80	68 167.26 Er Erbium 9.05	69 168.934 Tm Thulium 9.33	70 173.04 Yb Ytterbium 6.98	71 174.967 Lu Lutetium 9.84	90 232.038 Th Thorium 11.7	91 231.036 Pa Protactinium 15.4	92 238.029 U Uranium 18.90	93 237.048 Np Neptunium 20.4	94 (244) Pu Plutonium 19.8	95 (243) Am Americium 13.67	96 (247) Cm Curium 13.511	97 (247) Bk Berkelium -	98 (251) Cf Californium -	99 (252) Es Einsteinium -	100 (257) Fm Fermium -	101 (258) Md Mendelevium -	102 (259) No Nobelium -	103 (260) Lr Lawrencium -																																																																																										

Crystal Structures

- Cubic, face centered
- Cubic, body centered
- Cubic
- Hexagonal
- Orthorhombic
- Monoclinic
- Rhombohedral
- Tetragonal

Key

- p type dopant
- semiconductors
- n type dopant
- Commonly used in ion implantation
- He* -gas (italics)
- Br* -liquid

* Density in kg/m³

Atomic Number Atomic Weight

Symbol
Element

Density Crystal Structure

Techniques de dopage

- **Diffusion thermique**

- **Prédépôt**
- **Redistribution**

- **Implantation ionique**

- **Implantation**
- **Recuit d'activation (Diffusion thermique)**

Remarque:

Toute étape technologique thermique entraîne la diffusion de dopants

Diffusion à l'état solide, généralités

La diffusion à l'état solide caractérise le transport de matière sous l'influence d'un gradient d'au moins une des grandeurs caractérisant le système considéré (T, P, μ_i ou C_i, \dots). Migration atomique

Autodiffusion, Hétéro diffusion

En métallurgie, les procédés de diffusion sont essentiels dans un grand nombre de transformations à l'état solide: traitements thermiques, vieillissement des alliages, frittages, durcissement superficiels, oxydation, fluage, etc....

Etude de la diffusion

- 1) Lois d'écoulement en physique
- 2) Thermodynamique des processus irréversibles

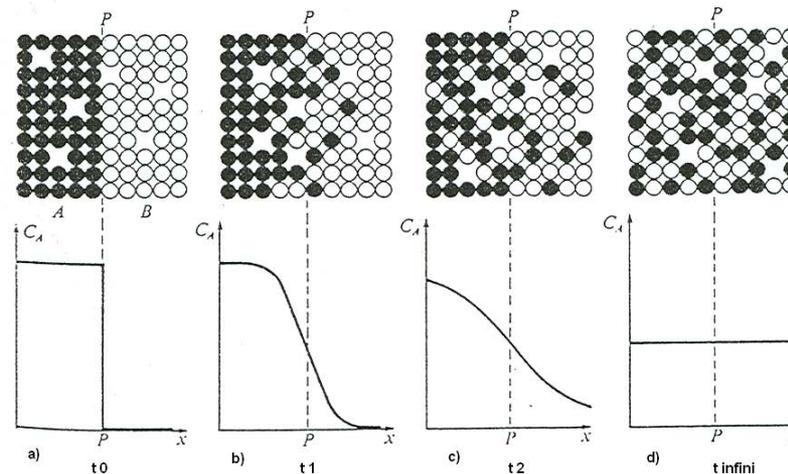


Schéma de l'évolution de la concentration C_A dans un couple de diffusion A-B en fonction du temps. Les atomes A diffusent dans le sens des x , vers la droite. Après un temps infini, la composition de l'échantillon est uniforme ; ce traitement correspond à une homogénéisation.

Diffusion: Théorie1

Lois de Fick (1855)

Première loi de Fick

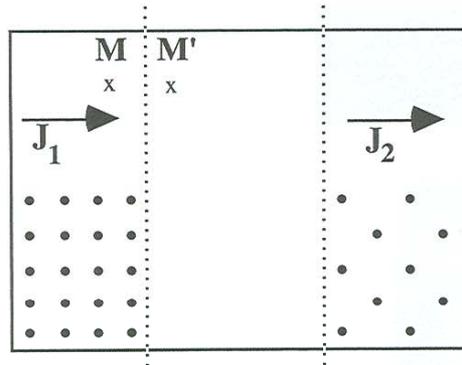


Fig. 3 : Diffusion d'espèces dans un matériau

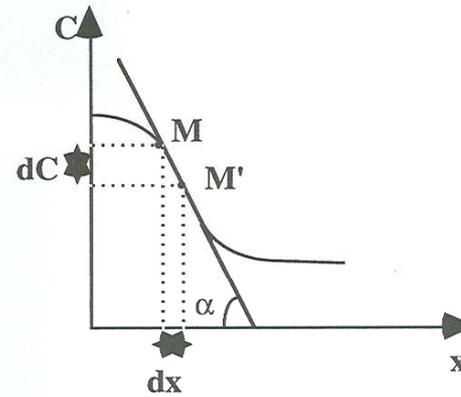


Fig. 4 : Gradient de concentration

$$J = -D \cdot \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \quad (1) \quad [1]$$

C : Concentration de dopants (At/cm³)

J : Flux (nombre d'atomes/m²s)

D : Coefficient de diffusion (m²/s)

$\partial C/\partial x$: Gradient de concentration

Diffusion: Théorie2

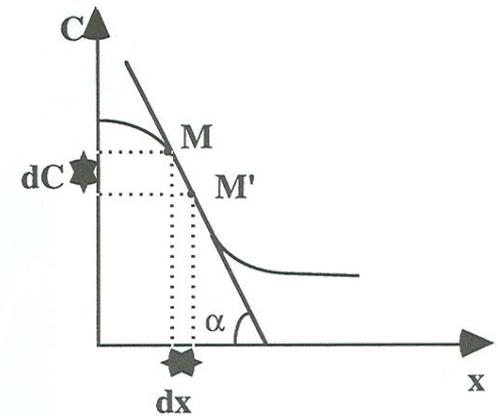
Deuxième loi de Fick

Equation de transport à une dimension

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \right)$$

(2) [1]



Le Prédépôt

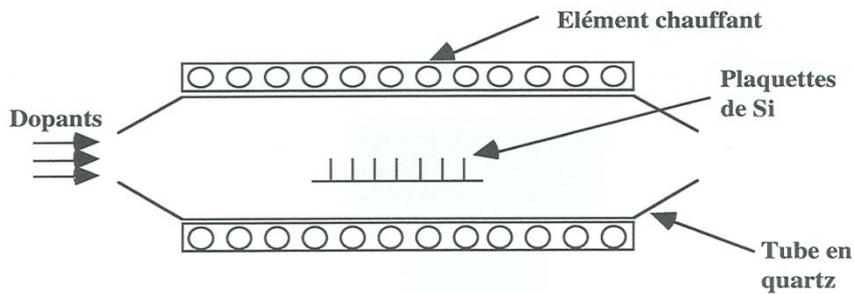


Fig. 5 : Four de prédépôt

• Résolution de l'équation n° 2

Condition initiale

$$C(x, t=0) = 0 \quad (3)$$

Conditions aux limites

$$C(x=0, t) = C_s \quad (4)$$

$$C(x=\infty, t) = 0 \quad (5)$$

• Solution

$$C(x, t) = C_s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (6) \quad [1]$$

$$Q(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot C_s \cdot \sqrt{D \cdot t} \quad (7) \quad [1]$$

$$x_j = 2 \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \frac{C_{\text{sub}}}{C_s} \quad (8) \quad [1]$$

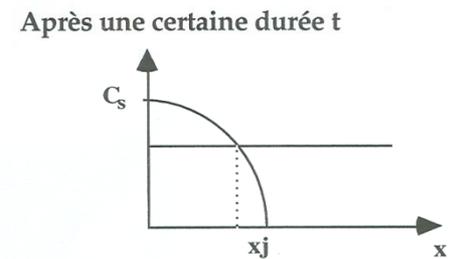
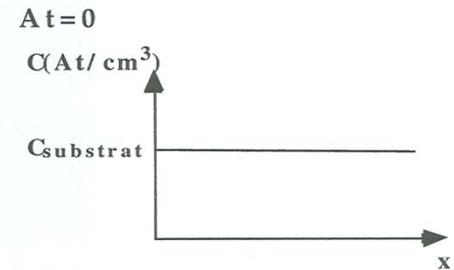


Fig. 6 : Profil de dopage avant et après une étape de prédépôt

REPRESENTATION DE LA DISTRIBUTION DE LA CONCENTRATION RESULTANT D'UN PROCEDE DE PREDEPOT

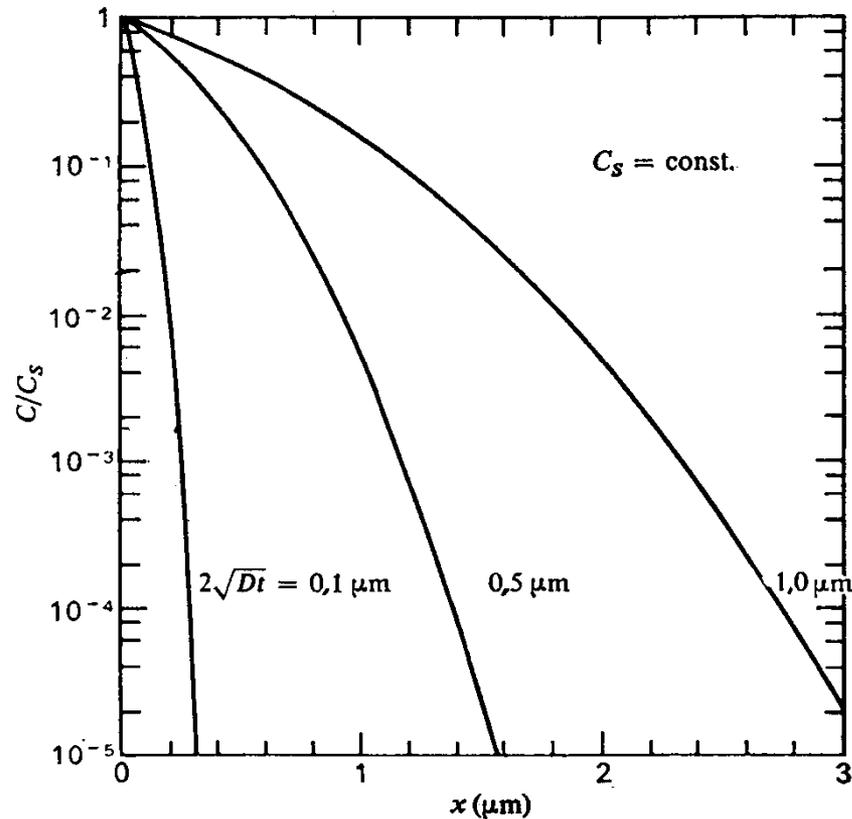


Fig. 7 : Fonction d'erreur complémentaire. Concentration normalisée en fonction de la distance pour différents temps [1]

Redistribution

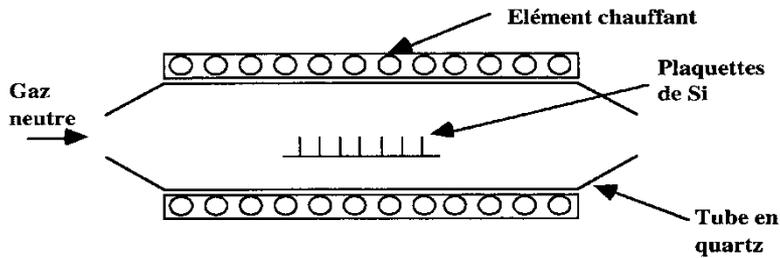


Fig. 8 : Four de redistribution

- Résolution de l'équation n° 2

Condition initiale

$$C(x, t=0) =$$

$$C_s \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t(\text{dépôt})}} \quad (9) [1]$$

Conditions aux limites

$$\int_0^{\infty} C(x, t) \cdot dx = Q_0 \quad (10) [1]$$

$$C(x, t = \infty) = 0 \quad (11) [1]$$

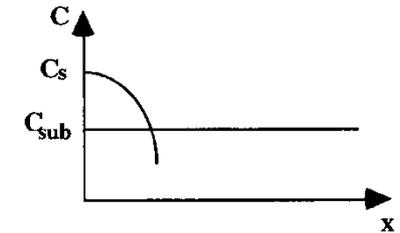
- Solution

$$C(x, t) = \frac{Q_0 \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}}}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \quad (12)[1]$$

$$C_s = C(x = 0, t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \quad (13)[1]$$

$$x_j = 4 \cdot D \cdot t \cdot \ln \left(\frac{Q_0}{C_{\text{sub}} \cdot \sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \right) \quad (14)[1]$$

A $t = 0$



Après une certaine durée t

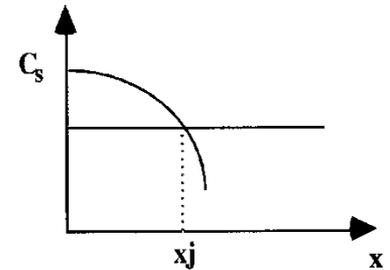


Fig. 9 : Profil de dopage avant et après une étape de redistribution

REPRESENTATION DE LA DISTRIBUTION DE LA CONCENTRATION RESULTANT D'UN PROCEDE DE REDISTRIBUTION

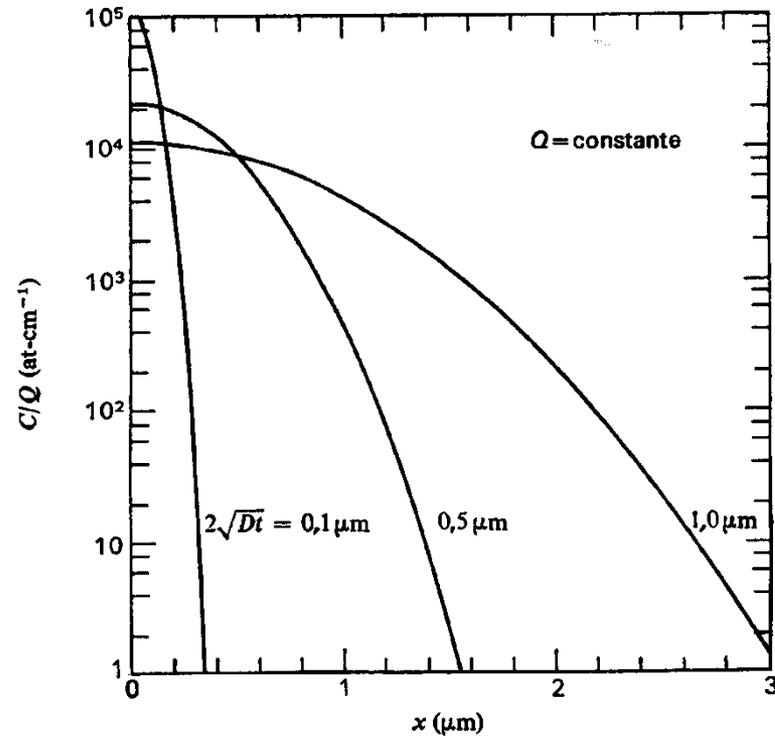
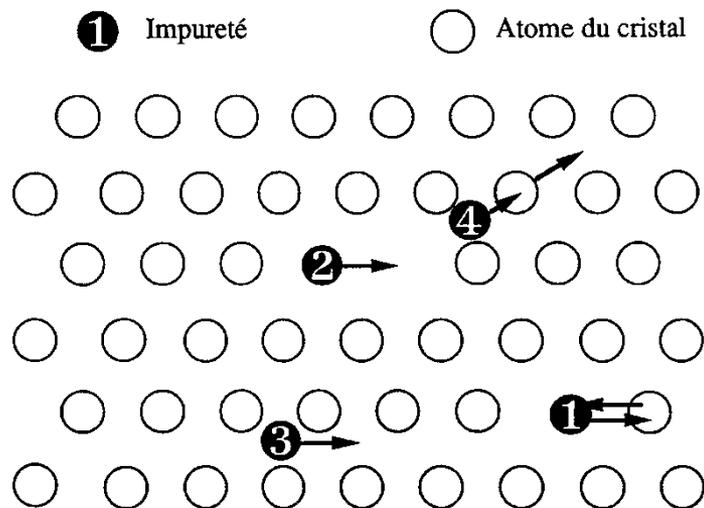


Fig. 10 : Fonction gaussienne. Concentration normalisée en fonction de la distance pour différents temps [1]

MECANISMES PHYSIQUES : ASPECTS MICROSCOPIQUES



① Echange simple: l'impureté en substitution prend la place d'un atome du cristal

② Lacunaire: l'impureté en substitution prend la place d'une lacune du cristal

③ Interstitiel direct: l'impureté se déplace de site interstitiel en site interstitiel

④ Interstitiel indirect: l'impureté en interstitiel prend la place d'un atome du cristal qui devient à son tour interstitiel

Fig. 11 : Les aspects microscopiques de la diffusion

Coefficients de diffusion (1)

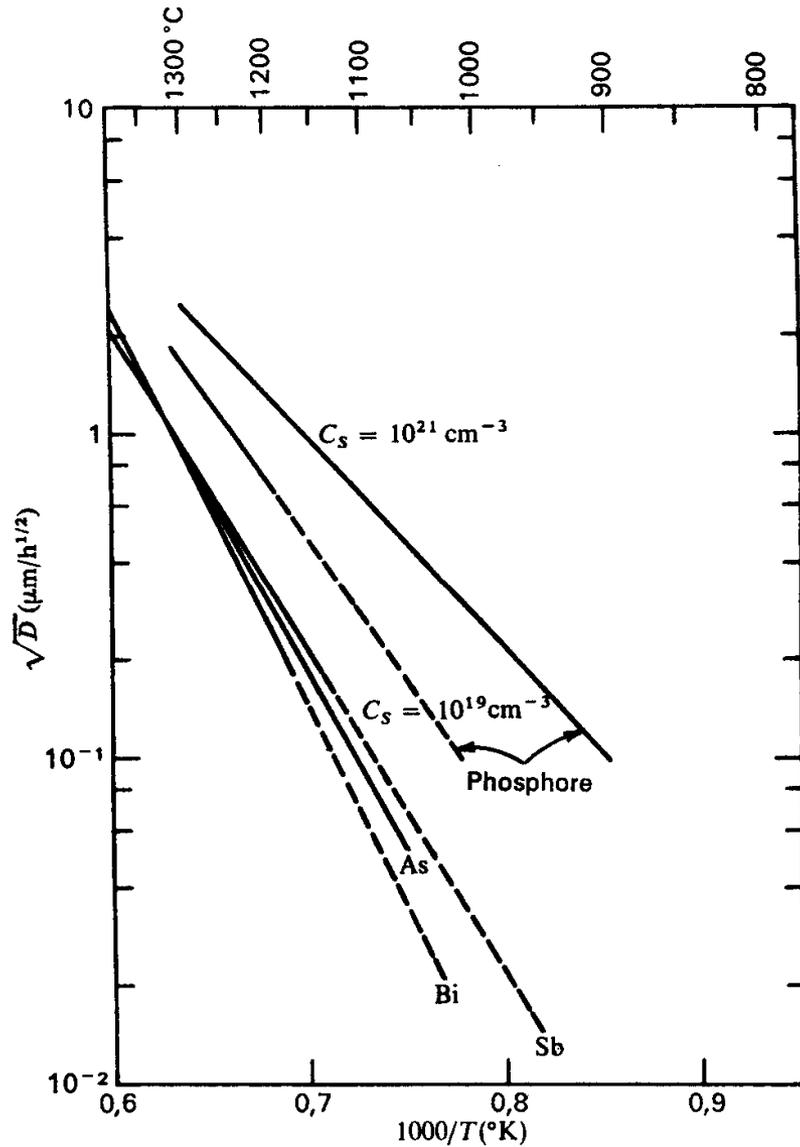


Fig.12: Coefficients de diffusion dans le silicium d'impuretés de type donneur [1]

Coefficients de diffusion (2)

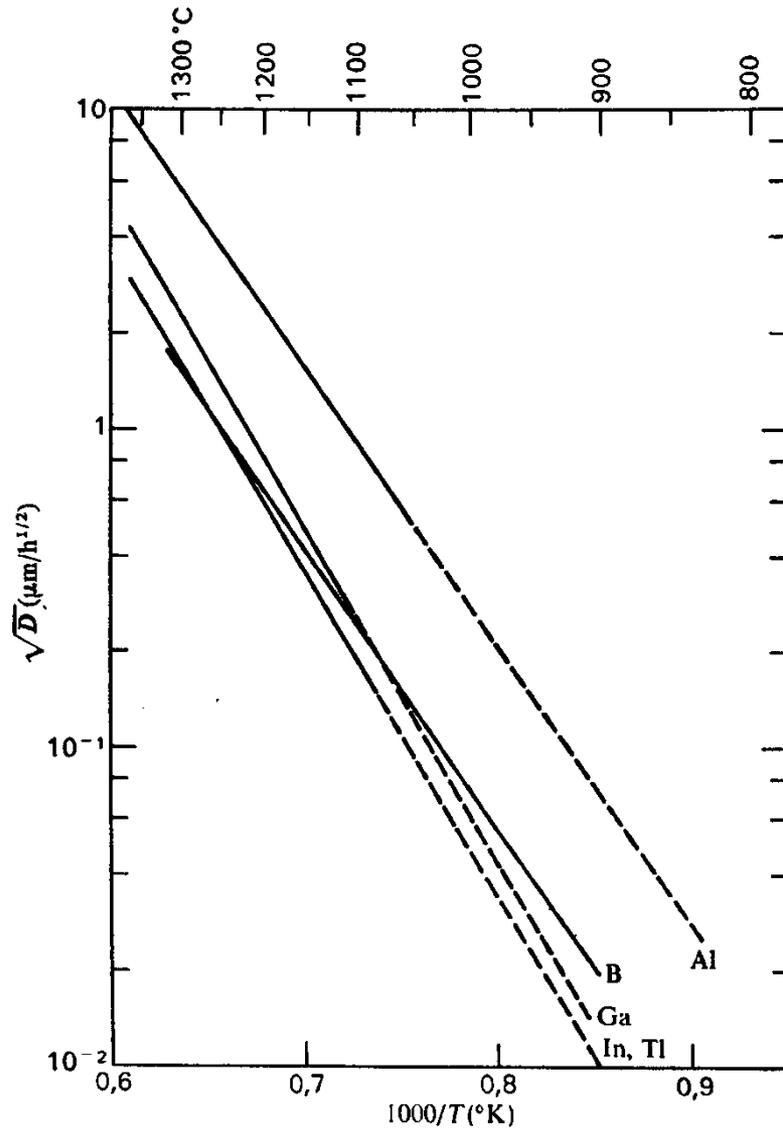


Fig.13: Coefficients de diffusion dans le silicium d'impuretés de type accepteur [1]

Coefficients de diffusion (3)

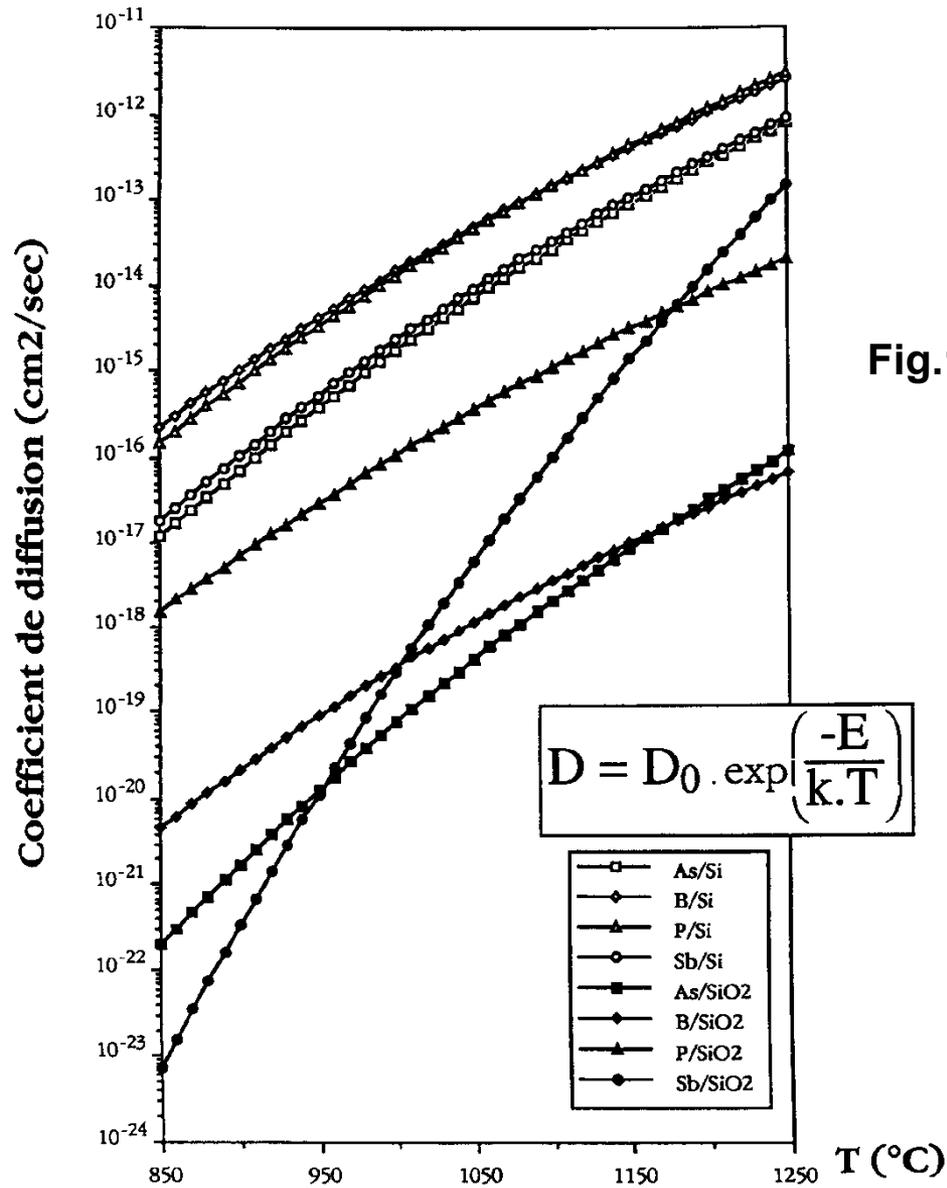


Fig.14: Utilisation de l'oxyde de silicium pour le masquage de la diffusion As, B, P et Sb dans le Si et le SiO_2 [2]

Masquage de dopants

Table 2 : Diffusion coefficients in SiO₂ and Si of the common dopants [1]

Dopant	SiO ₂ D (900°C) cm ² /sec	Si D _i (900°C) cm ² /sec*
Boron	2.2x10 ⁻¹⁹ - 4.4x10 ⁻¹⁶	~ 1.5x10 ⁻¹⁵
Gallium	1.3x10 ⁻¹³	~ 6x10 ⁻¹⁴
Phosphorus	9.3x10 ⁻¹⁹ - 7.7x10 ⁻¹⁵	~ 4x10 ⁻¹⁷
Arsenic	4.8x10 ⁻¹⁸ - 4.5x10 ⁻¹⁹	~ 2x10 ⁻¹⁶
Antimony	3.6x10 ⁻²²	~ 8x10 ⁻¹⁷

* These are estimated values for intrinsic diffusion, the values for extrinsic diffusion are higher.

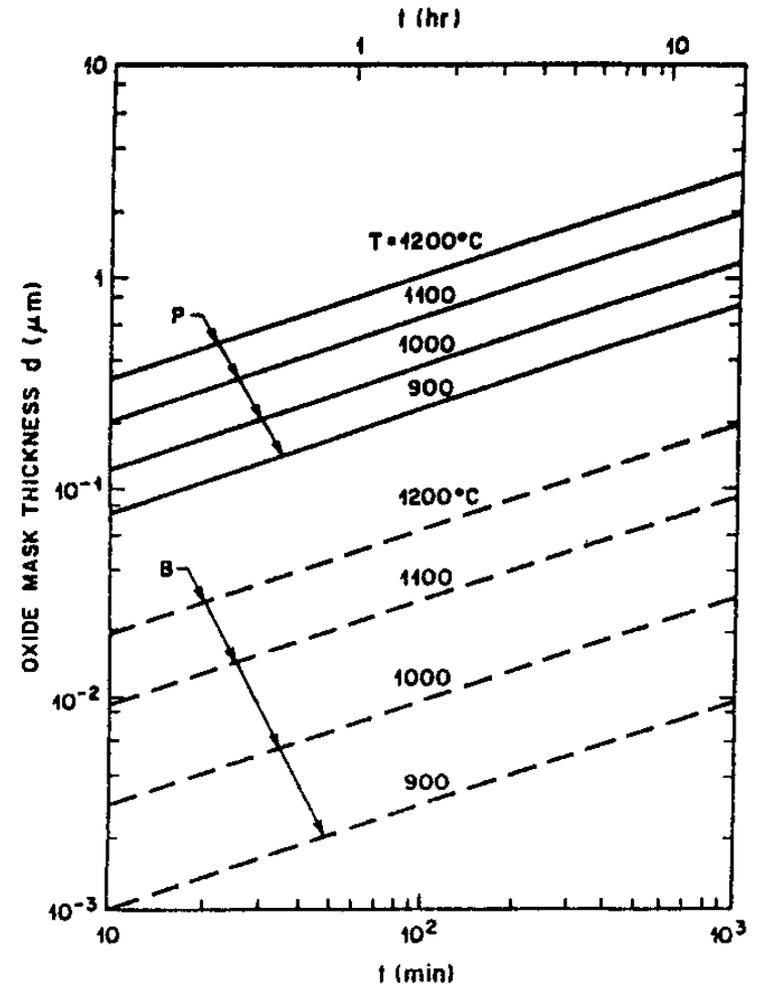


Fig.15: Epaisseur d'oxyde minimale nécessaire pour masquer le silicium pendant une diffusion de bore et de phosphore en fonction de la durée et de la température de diffusion [3]

Coefficients de diffusion d'impuretés

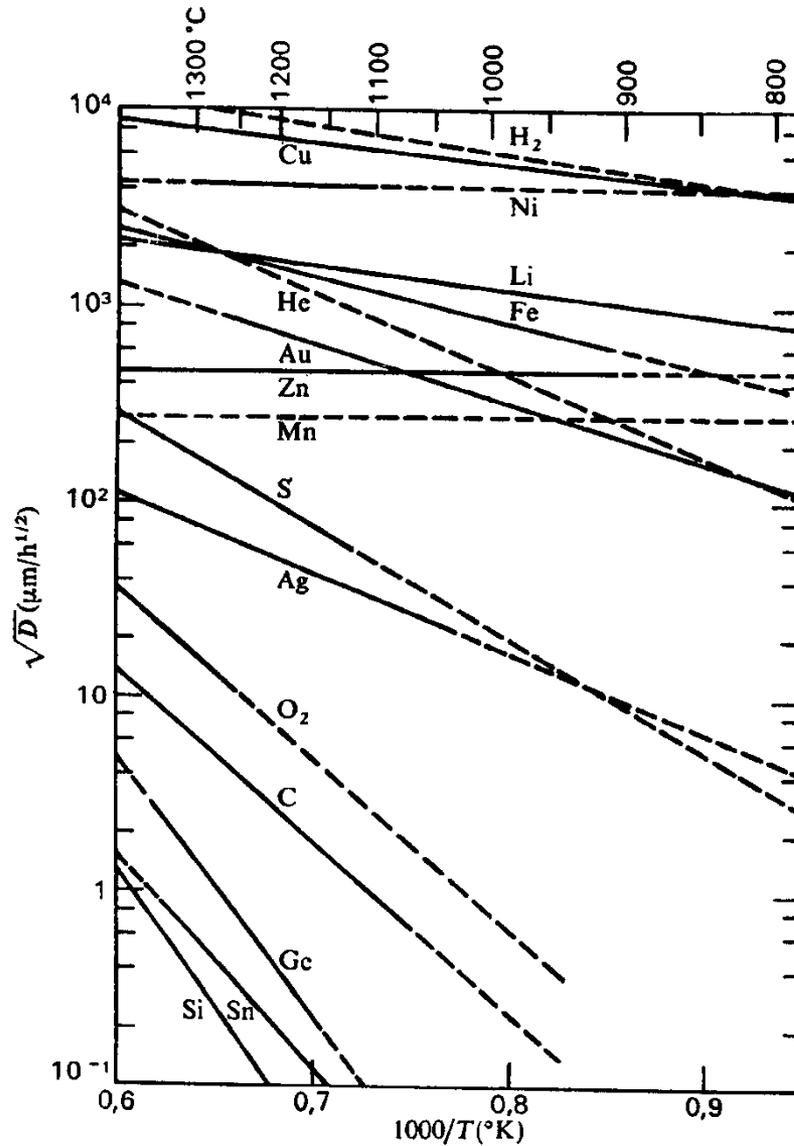


Fig.16: Coefficients de diffusion dans le silicium de diverses impuretés [1]

Solubilité limite

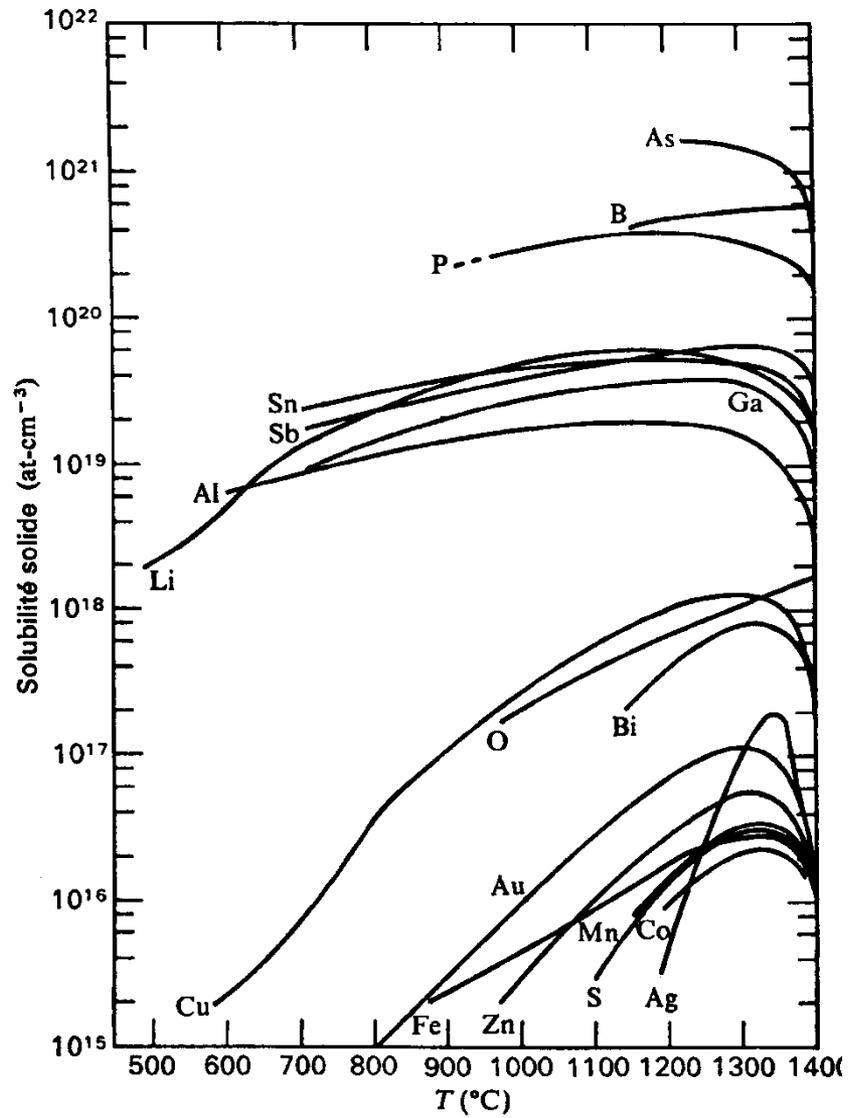


Fig.17: Solubilités dans le silicium

Diffusion dans le Silicium Polycristallin

Diffusion à partir des joints de grains

Dépend de la taille et de la structure des grains

Elements	D_0 (cm ² /s)	E (eV)	D (cm ² /s)	T (°C)
As	8.6×10^4	3.9	2.4×10^{-14}	800
As	0.63	3.2	3.2×10^{-14}	950
B	$(1.5-6) \times 10^{-3}$	2.4-2.5	9×10^{-14}	900
B			4×10^{-14}	925
P			6.9×10^{-13}	1000
P			7×10^{-13}	1000

Tableau 2: Quelques coefficients de diffusion dans le silicium polycristallin [3]

Techniques de diffusion (1)

Tableau 3: Sources choisies pour la diffusion de dopants dans le silicium [3]

Dopant	Gaseous Source	Liquid Source	Solid Source
As	AsH ₃ , AsF ₃	arsenosilica ^s	AlAsO ₄ ^d
P	PH ₃ , PF ₃	POCl ₃ , phosphosilica ^s	NH ₄ H ₂ PO ₄ ^d
B	B ₂ H ₆ , BF ₃ , BCl ₃	BBr ₃ , (CH ₃ O) ₃ B borosilica ^s	BN ^d
Sb	SbH ₃ ^I	Sb ₃ Cl ₅ , antimonysilica ^s	Sb ₂ O ₃ , Sb ₂ O ₄

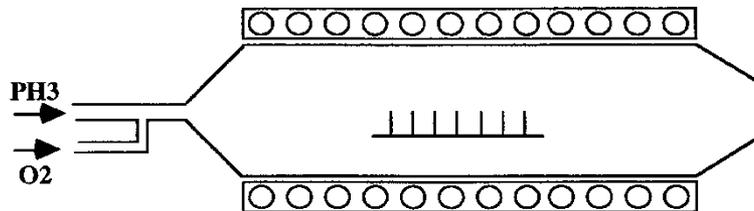
d = disc source s = spin on source I = ion implantation source only

Systèmes de sources gazeuses

Caractéristiques générales:

- . facile d'emploi (contrôle du débit)
- . pureté des produits (moins corrosifs que les sources liquides)
- . toxiques

Exemple de source gazeuse : PH3



Réactions chimiques

- 1) Formation d'un oxyde dopant à la surface de la plaquette

$$2\text{PH}_3 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 + 3\text{H}_2\text{O}$$
- 2) Diffusion à partir du P₂O₅ dans le silicium

Techniques de diffusion, Systèmes de sources liquides

2 présentations:

- . à partir de barboteurs
- . à partir de dopants déposés par rotation à la tournette (Spin-on dopants)

a) Barboteurs

. Principe

- Transformation du liquide en vapeur
- Température du liquide contrôlé (pression de vapeur)
- Transport par passage d'un gaz porteur
- Contrôle du débit de source en mg par minute

. Exemple

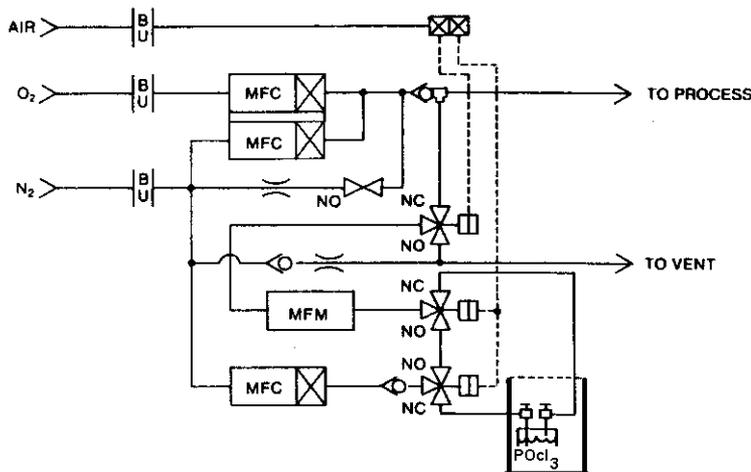


Fig.19: Cabinet de gaz

Réactions chimiques

- (1) Formation d'un oxyde dopant à la surface de la plaquette
$$4\text{POCl}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{P}_2\text{O}_5 + 6\text{Cl}_2$$
- (2) Diffusion à partir du P₂O₅ dans le silicium

b) "Spin-on dopants"

.Principe

- Dépôt à la tournette
- Sensible à la vapeur d'eau
- Prérecuit pour densifier le film
- Contrôle de la diffusion par la durée et la température du prédépôt

Techniques de diffusion, exemple de la diffusion de phosphore

- Description du procédé

- 1) Formation de SiO₂



- 2) Formation de P₂O₅



- 3) Diffusion à partir de l'oxyde dopé au phosphore



- Exemple de procédé

	N ₂ (vecteur) SLM	O ₂ SLM	POCl ₃ (mg/mn)
t ₁ : 5 mn	0,8	0,1	
t ₂ : 5 mn	0,8	0,1	5
t ₃ : 10 mn	0,8	0,1	

Tableau 4 : Valeurs des différents paramètres en fonction des étapes

Concentration de départ Type P, CS = 1015 At/cm ³	Diffusion ----->	V/I final : 1Ω
		x _j : 1,39 μm
		CS : 6.1020 At/cm ³

Techniques de diffusion

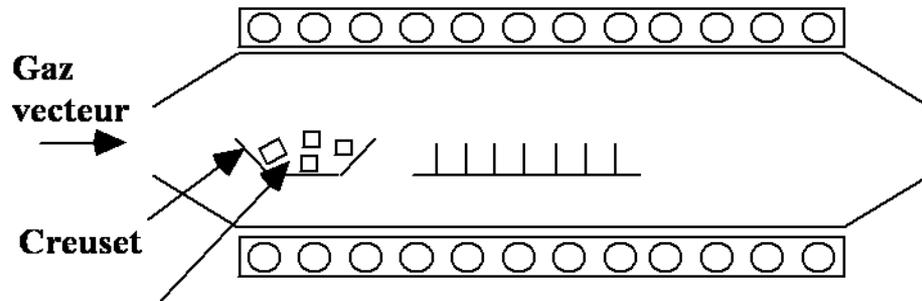
Système de sources solides

2 présentations :

- en morceaux ou poudre
- en plaquette

a) En morceaux ou poudre

- Principe
 - Transport de vapeurs
- Exemple



Source solide sous forme de morceaux à T (500-700°C)

b) En plaquette

- Principe
 - Oxydation des plaquettes de dopants
 - Transport de vapeurs d'oxyde sur les plaquettes de silicium

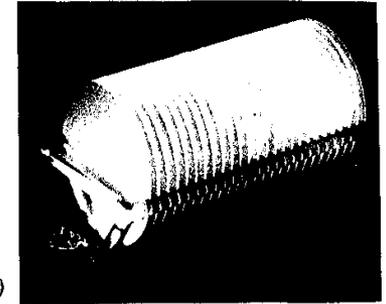
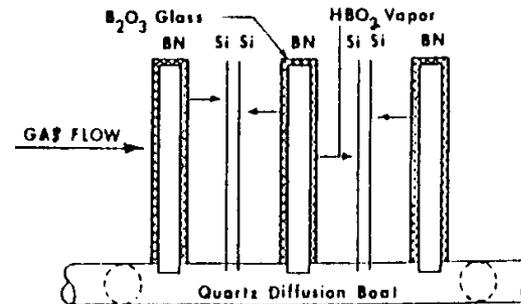


Fig. 21 : Positionnement des plaquettes de dopants dans les nacelles [3]

Fig. 20 : Four de diffusion de dopants sous forme solide

Contrôle de la diffusion

Paramètres :

- Pression partielle de dopants

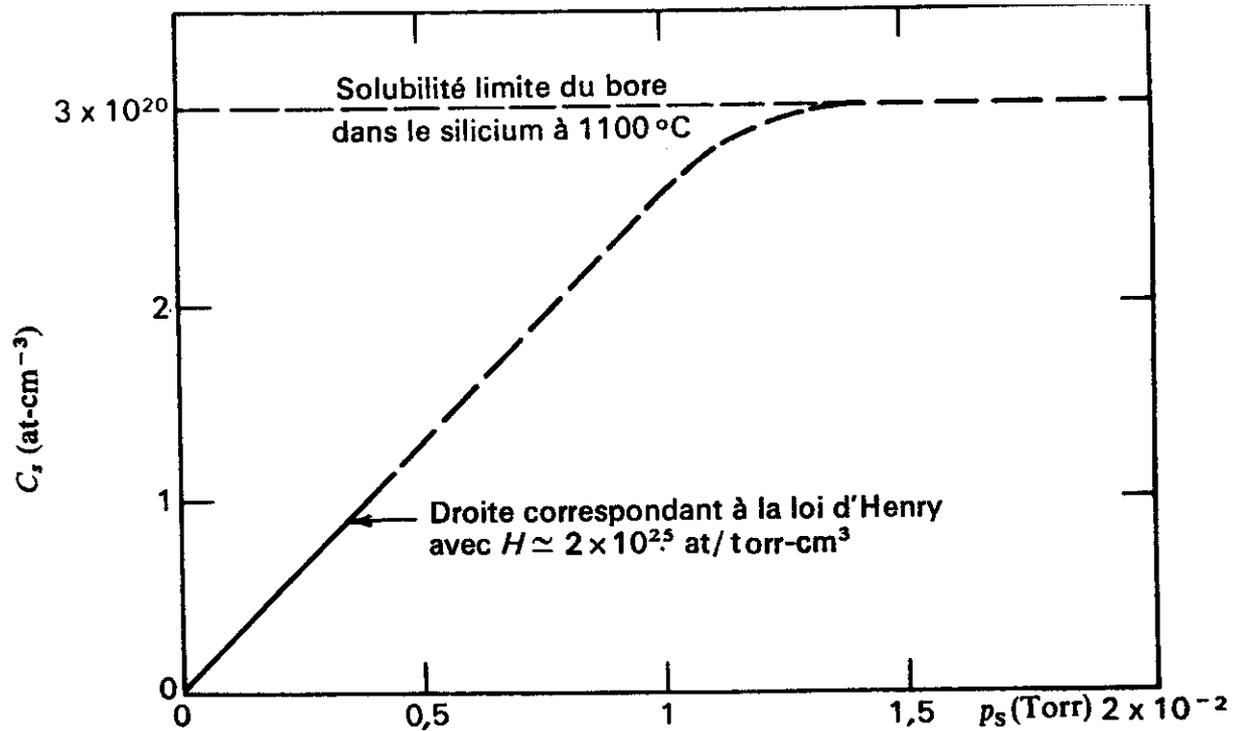


Fig. 22 : Concentration en surface du bore dans le silicium en fonction de la pression partielle de B_2O_3 à 1100°C [1]

- Température
- Durée

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (1)

- Profil de diffusion

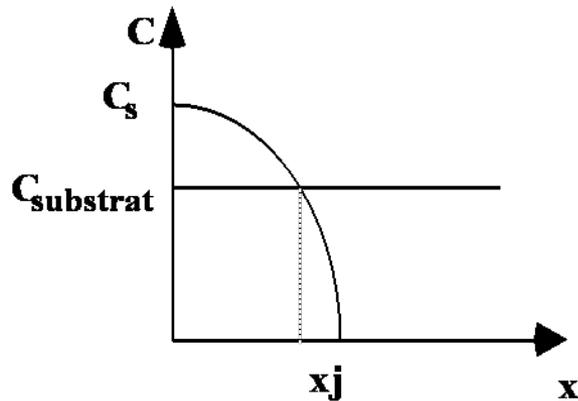


Fig. 23 : Représentation d'un profil de diffusion

Paramètres connus : type et concentration du substrat

Inconnus : C_s , x_j , profil $C(x)$

- Méthodes de caractérisation

- a) A partir des mesures de V/I et de x_j
- b) Utilisation de la "Spreading resistance" : C_s , profil $C(x)$, x_j
- c) Analyse ionique : C_s , profil, x_j (concentration physique)
- d) $C(V)$ "Polaron"

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (2)

A partir des mesures de V/I et de x_j

- Principe

- Mesure du V/I (méthode des quatre pointes)

$$V/I \rightarrow R = 4,53 \cdot (V/I) \quad (14)$$

- Mesure du x_j (rodage)

$$R = \rho \frac{l}{s} \Leftrightarrow R = \rho \frac{l}{l \times x_j} \Leftrightarrow R = \frac{\rho}{x_j} \quad (R \square) \quad (15)$$

- Détermination de la conductivité

$$\left. \begin{array}{l} (14) \\ (15) \end{array} \right\} \frac{\rho}{x_j} = 4,53 \frac{V}{I} \Leftrightarrow \rho = 4,53 \frac{V}{I} x_j \quad (16)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

- Utilisation des courbes d'Irvin

- Détermination du C_s et du profil $C(x)$ si gravure et mesure successives

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (3)

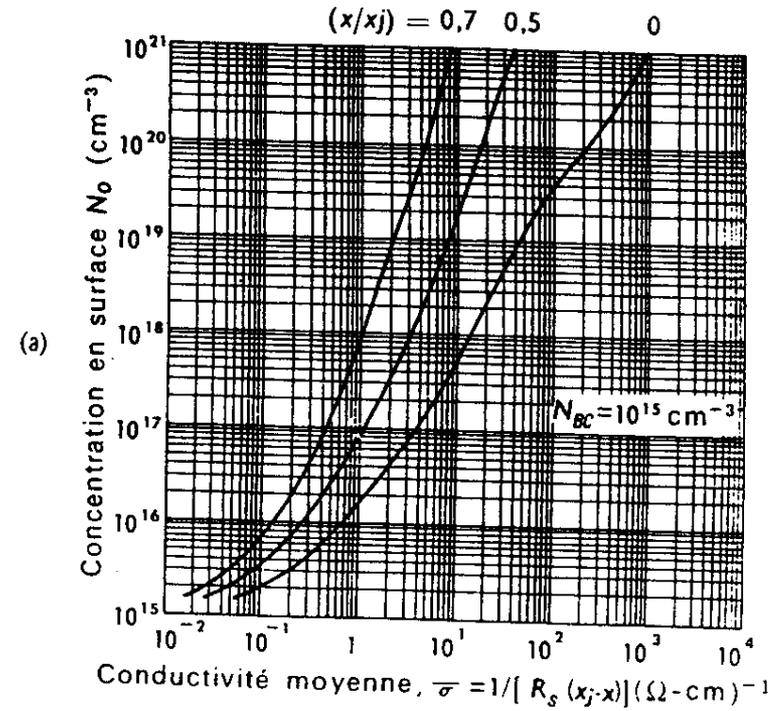
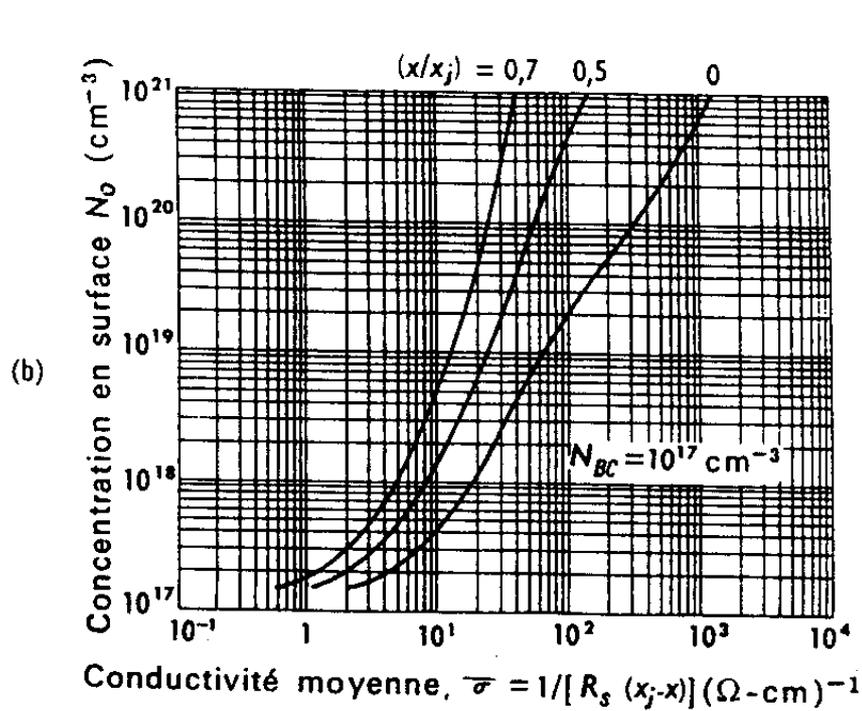


Fig.24: Courbes d'Irving pour des diffusions de type N pour deux dopages de substrat, profil en fonction d'erreur complémentaire [4]

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (4)

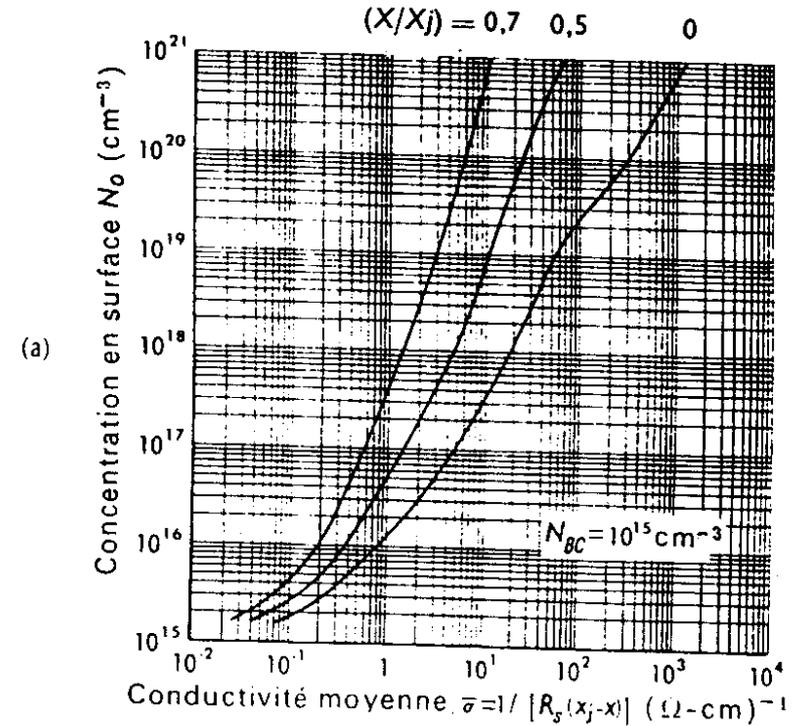
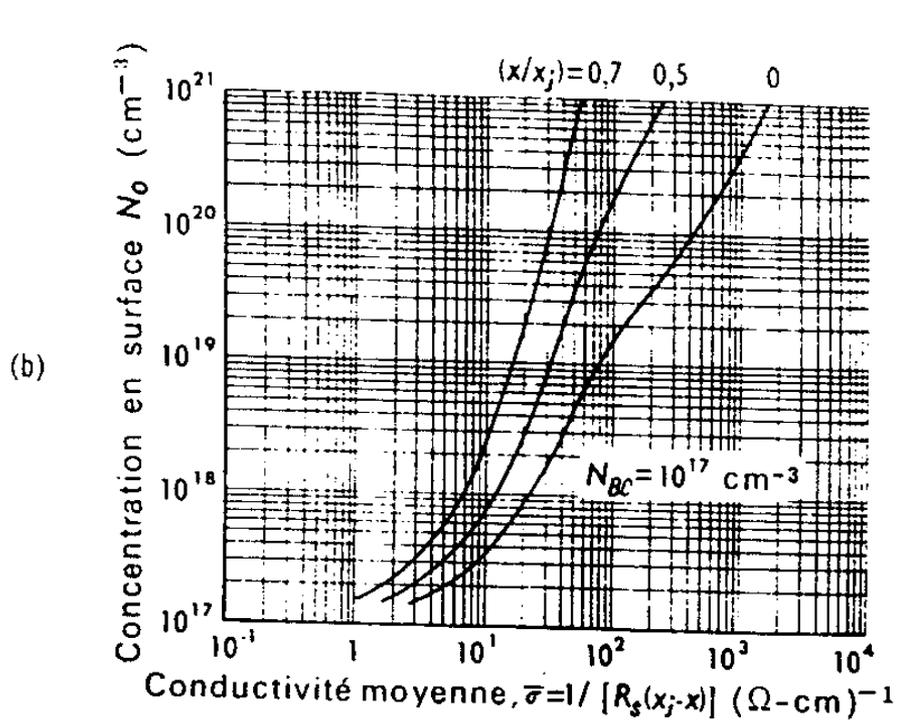


Fig.25 : Courbes d'Irving pour des diffusions de type N pour deux dopages de substrats profil gaussien

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (5)

Mesure du V/I

- Technique des quatre pointes

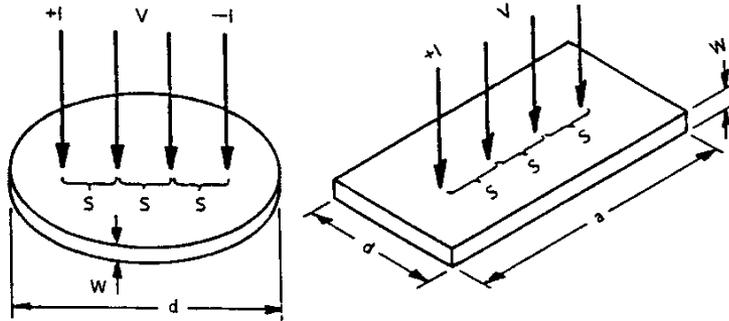


Fig. 26 : Système des quatre pointes pour la mesure de résistivité [3]

- Dispersion des lignes de courant

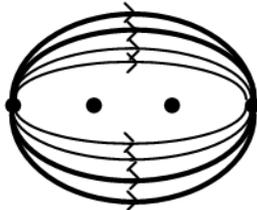


Fig. 27 : Vue de dessus de la dispersion des lignes de courant

- Facteurs de correction

Tableau 5 : Facteur de correction F_1 fonction du rapport de l'espace inter pointes sur le diamètre de la plaquette [3]

s / D	F_1	s / D	F_1
0	4.532	0.05	4.436
0.005	4.531	0.06	4.395
0.01	4.528	0.07	4.348
0.02	4.517	0.08	4.294
0.03	4.497	0.09	4.235
0.04	4.470	0.10	4.171

$$R = F_1 \cdot (V/I) \quad (R_o) \quad (18)$$

$$r = R_o \cdot x_j \quad (19)$$

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (6)

Mesure du x_j

I – Révélation de l'échantillon

- Rodage mécanique

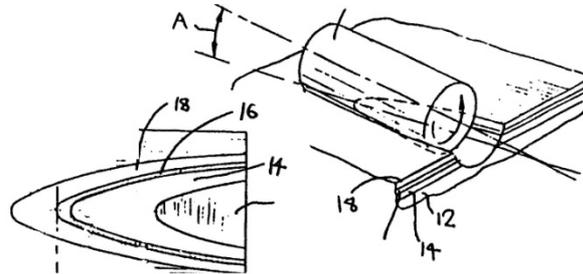


Fig. 26 : Rodage mécanique du Si [3]

- Révélation chimique ; Principe de la coloration [3] [7] [8]
 - Dépôt d'une goutte de solution de CuSO_4 sur la jonction
 - Polarisation en direct de la diode sous éclaircissement (5 à 10 s)
 - Fixation des ions Cu^{++} sur la zone n
 - Délimitation des régions n et p
 - Rinçage à l'eau DI
 - Séchage

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (7)

II - Lecture de la valeur du x_j

- 1) Utilisation d'un profilomètre
- 2) Mesure sous microscope optique

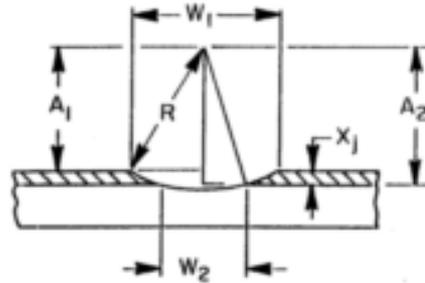


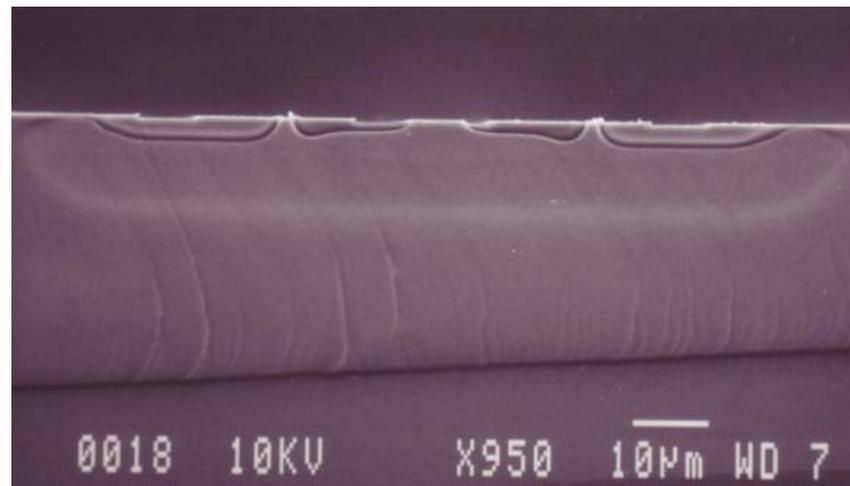
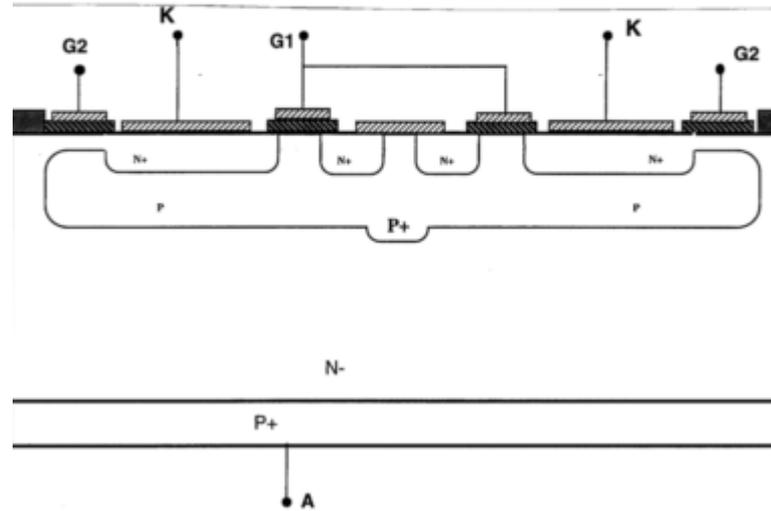
Fig. 27 : Vue en coupe du rodage et détermination des différents paramètres géométriques pour calculer la profondeur de jonction x_j [3]

$$x_j = \sqrt{R^2 - \left(\frac{W_2}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{W_1}{2}\right)^2}$$

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (8)

REVELATION SUR LA TRANCHE

Schéma du dispositif [9]



CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (9)

"SPREADING RESISTANCE" [5]

1) Abrasion mécanique de l'échantillon pour obtenir un biseau

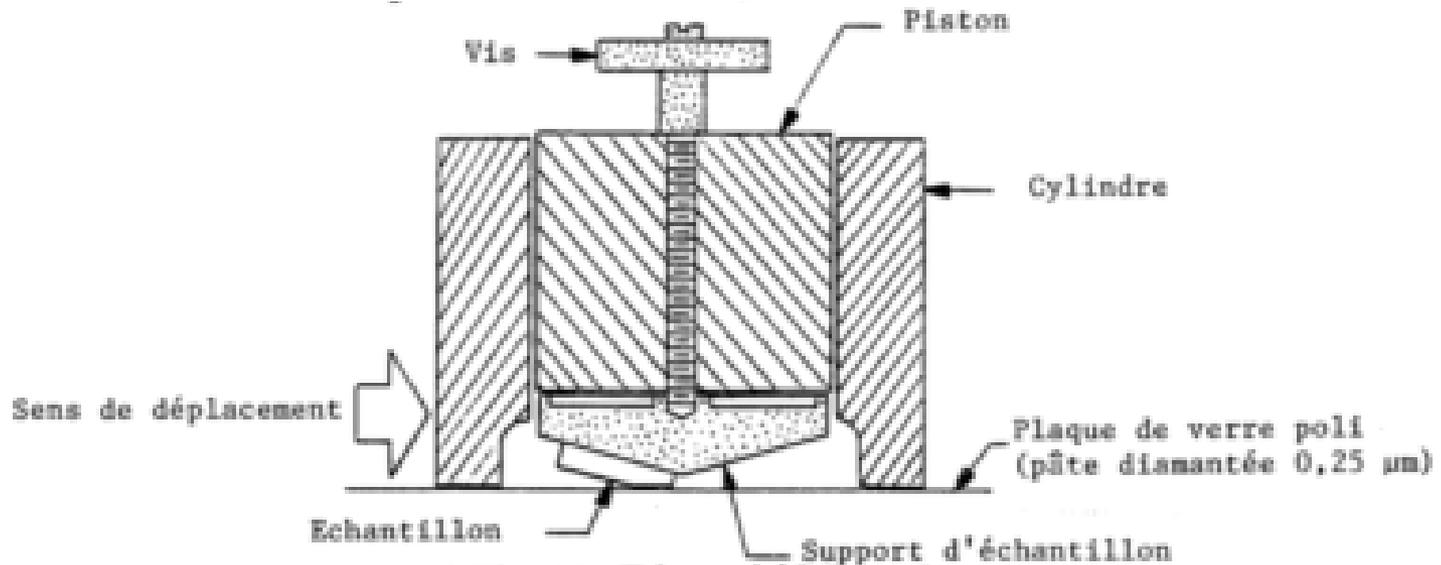


Fig. 28 : Dispositif de rodage

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (10)

2) Mesure de la résistance incrémentale par une méthode 2 pointes

$$R_c = r/2a$$

a : paramètre défini par calibration à partir de différents échantillons étalons de résistivité connue

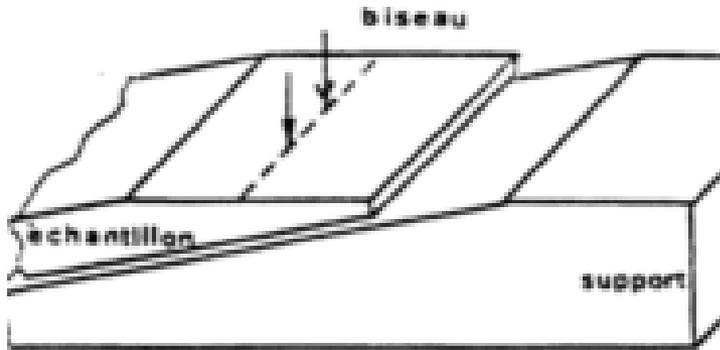


Fig. 29 : Support biseauté de l'échantillon

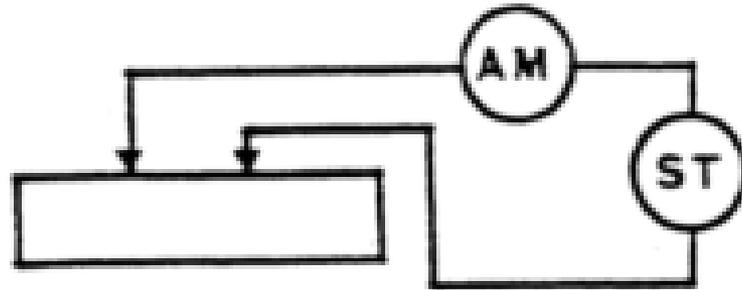


Fig. 30 : Méthode de mesure de la résistance de constriction

3) Calcul analytique

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (11)

SPREADING RESISTANCE"

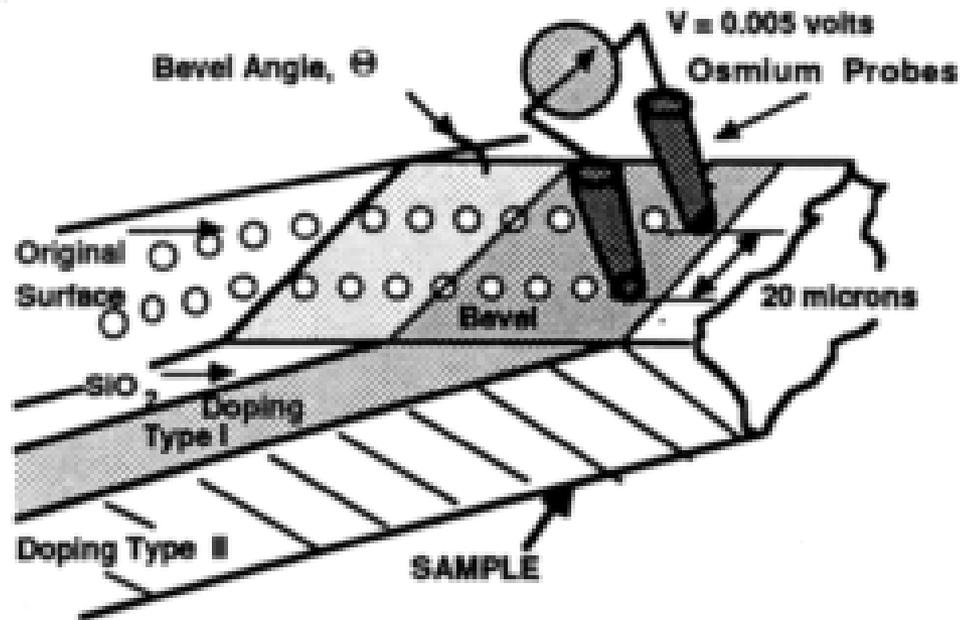


Fig.31: Mesure de la résistance [3]

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (12)

Mesures C(V) [6]

Principe (Résolution de l'équation de Poisson reliant le potentiel à la charge électrique)

- Réalisation d'une jonction Schottky en plaçant l'échantillon dans une électrolyte

Caractéristique de l'électrolyte :

- . Se comporte comme un métal à la surface du silicium**
- . Dissout le silicium ($\text{Si} + 4 (+) \rightarrow \text{Si}^{4+}$)**

-Polarisation en inverse de la jonction (Une zone dépeuplée apparaît)

- Mesure de la caractéristique C(V) (polarisation inverse)

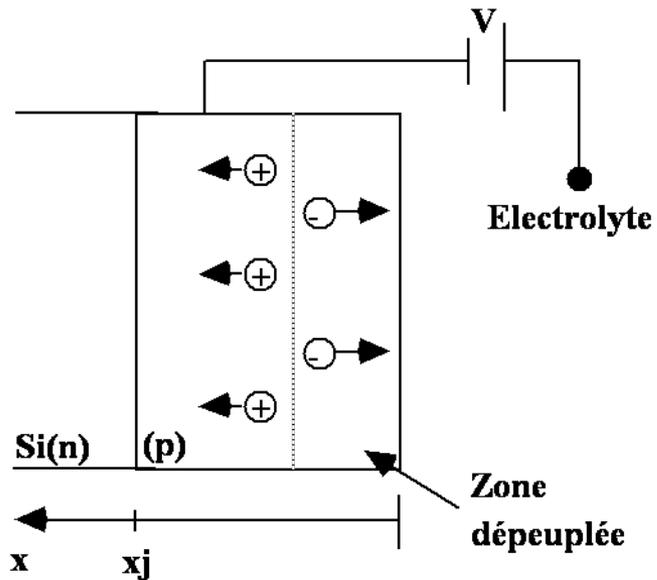
**Opérations
séquentielles**

-Gravure du Si (v de l'ordre de 50 Å /mn)

Polarisation directe du Si (P)

Polarisation inverse et illumination $\left(\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \right)$ pour du Si(n))

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (13)



$$W_d = \left[\frac{2(\phi - V)\epsilon_0\epsilon_r}{qN} \right]^{1/2}$$

$$C = A \left[\frac{qN\epsilon_0\epsilon_r}{2(\phi - V)} \right]^{1/2}$$

ϕ : tension de diffusion

A : Surface de la jonction

Fig. 32 : Principe de la mesure

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (14)

Sonde ionique (SIMS : Secondary Ion Mass Spectroscopy)

• Principe

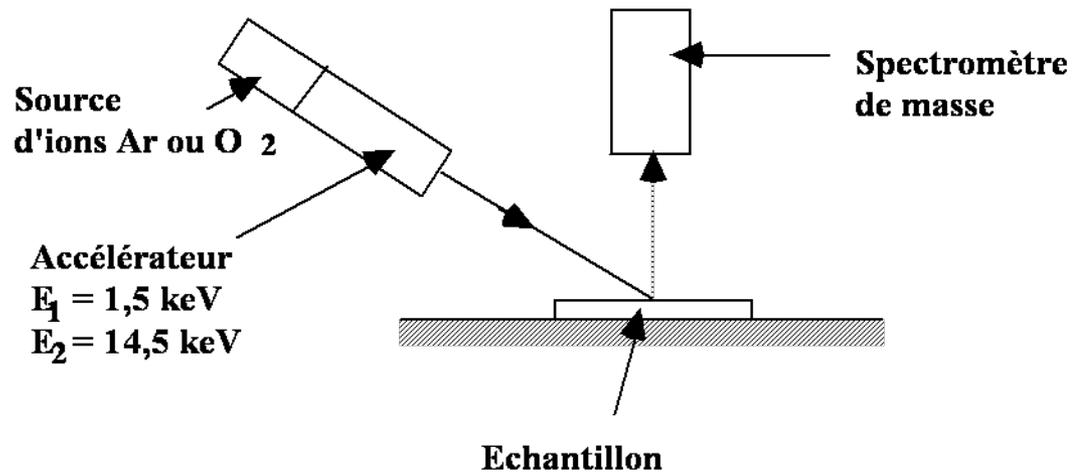


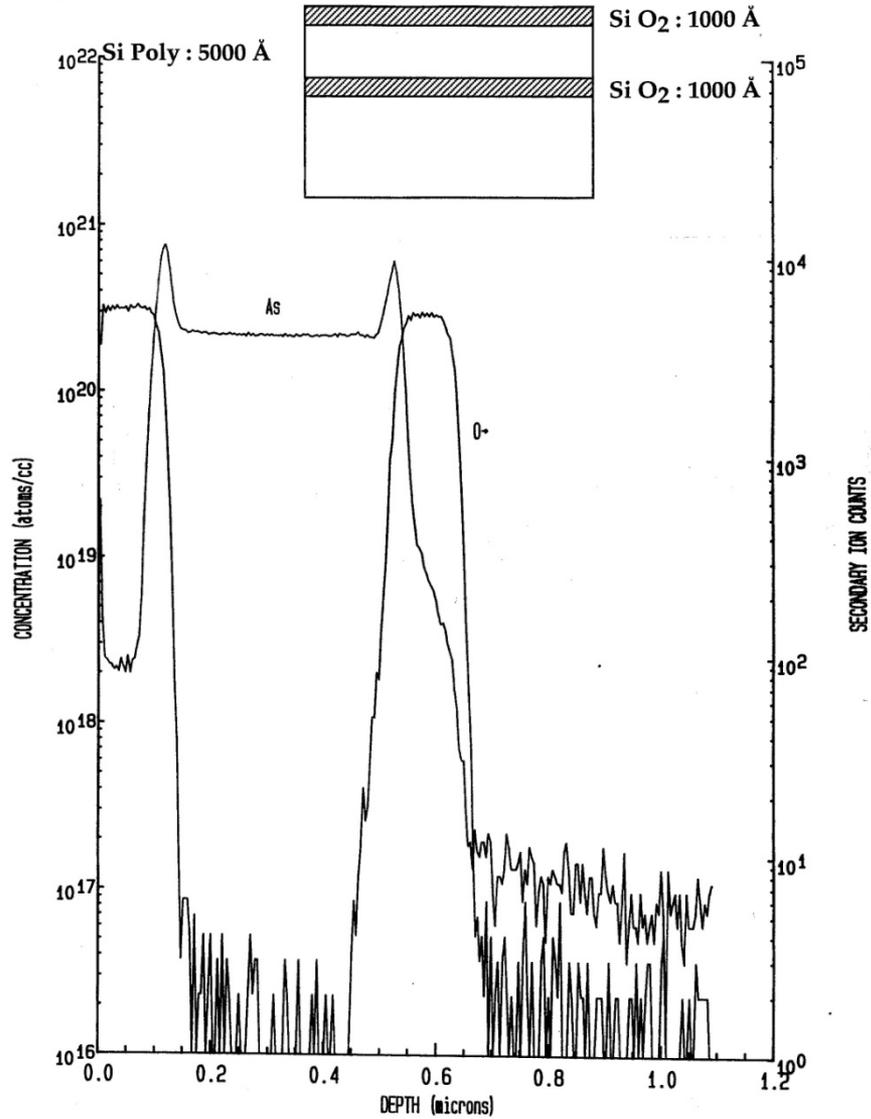
Fig. 33 : Système de mesure

CARACTERISATION DE LA DIFFUSION (15)

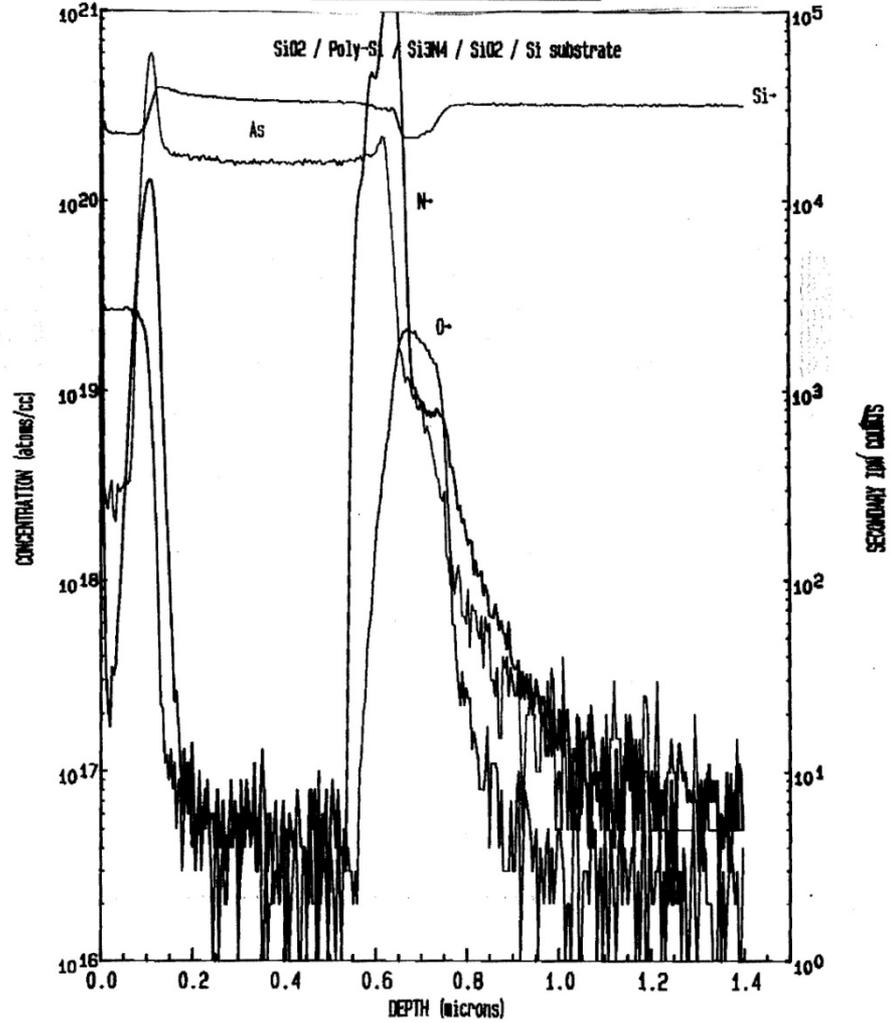
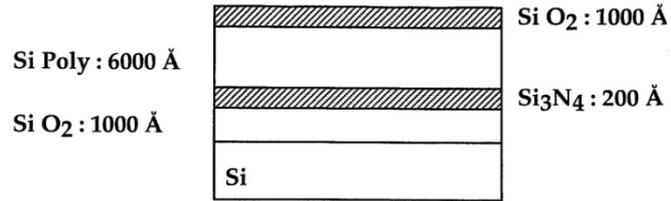
- **Caractéristiques**

- **Mesure de la concentration physique**
- **Diamètre du faisceau de 0,2 μm à 100 μm**
- **Surface de balayage variable de 5 μm^2 à 500 μm^2**
- **Analyse uniquement du centre de 8 μm à 150 μm**
- **Vitesse de gravure : Si 1 μm par heure
AsGa 1 μm par 1/4 heure**
- **Sensibilité : Bore : 10E13 At/cm³
Phosphore : 10E14 At/cm³
As : 10E13 At/cm³**

Exemple de profil de dopage
obtenu avec la sonde ionique
de la structure suivante



Exemple de profil de dopage
obtenu avec la sonde ionique
de la structure suivante



INFLUENCE DE L'OXYDATION SUR LA REDISTRIBUTION D'IMPURETES

- Coefficient de ségrégation

m : rapport de la concentration des impuretés dans le Si sur la concentration des impuretés dans le SiO₂

$m < 1$ L'oxyde absorbe les impuretés
Cas du bore

$m > 1$ L'oxyde rejette les impuretés
Cas du phosphore, arsenic

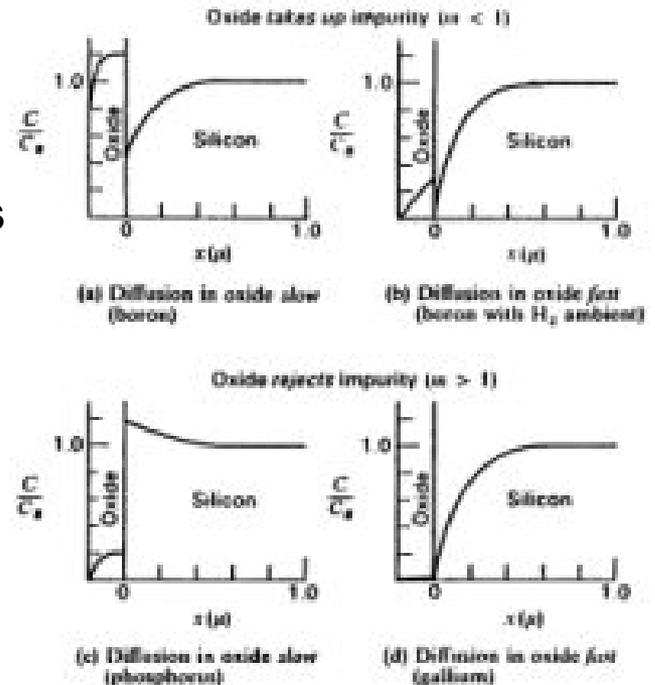


Fig. 34 : Redistribution d'impuretés dans le silicium due l'oxydation thermique pour quatre cas différents [1]

EFFETS SECONDAIRES DE LA DIFFUSION

Diffusion latérale sous des ouvertures d'oxyde

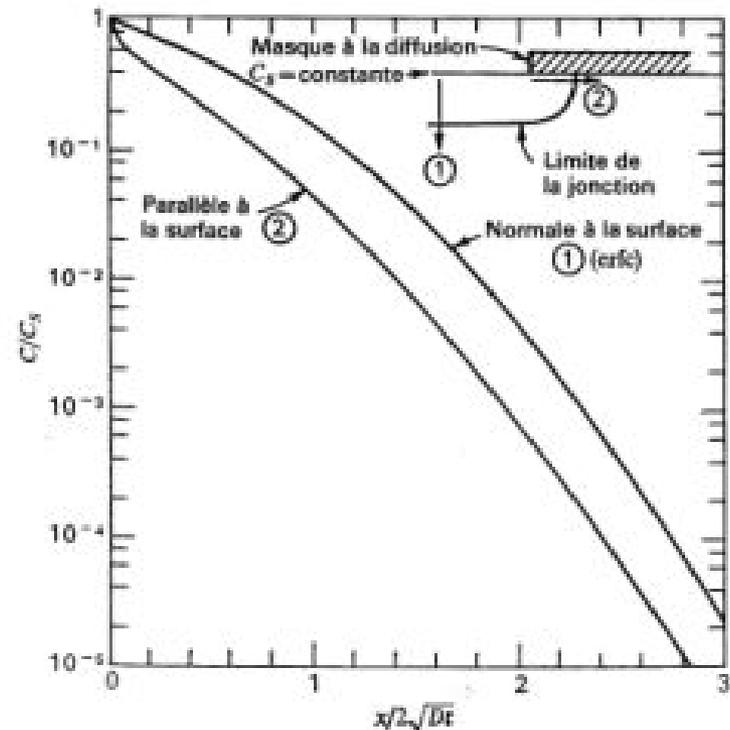
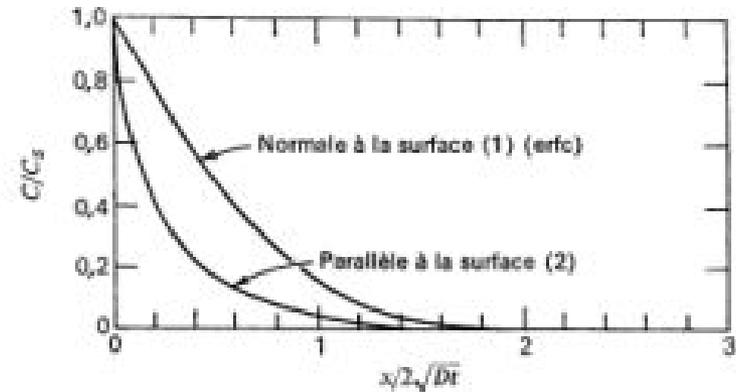


Fig. 35 : Comparaison des distributions de la concentration normale et parallèle à la surface dans le cas d'un dépôt [1]

Diffusion latérale: 75-85 % de la diffusion verticale

Annexe 1

PROPRIÉTÉS PRINCIPALES DE LA FONCTION D'ERREUR

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-a^2} da$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

$$\operatorname{erf}(0) = 0$$

$$\operatorname{erf}(\infty) = 1$$

$$\operatorname{erf}(x) \simeq \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \quad \text{pour } x \ll 1$$

$$\operatorname{erfc}(x) \simeq \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-x^2}}{x} \quad \text{pour } x \gg 1$$

$$\frac{d \operatorname{erf}(x)}{dx} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}$$

$$\int_0^x \operatorname{erfc}(x') dx' = x \operatorname{erfc} x + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - e^{-x^2})$$

$$\int_0^{\infty} \operatorname{erfc}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

REFERENCES

- [1] **A.S. Grove, Physique et technologie des dispositifs à semiconducteur**
- [2] **S.M. Sze, VLSI Technology**
- [3] **S. Wolf and R.N. Tauber, Silicon processing for the VLSI era, volume 1, Process technology**
- [4] **J.C. Irvin, Resistivity of bulk silicon and diffused layers in silicon, Bell Syst. Tech. J., 41, 387, 1962**
- [5] **Notice d'utilisation de la spreading résistance, Société Solid State Measurements**
- [6] **Notice d'utilisation du profileur PN4200, Société BIO-RAD Polaron Division**
- [7] **E. Sirtl et A. Adler, Z. Metallkd, 52, 529, 1961**
- [8] **M. Wright Jenkins, A new preferential etch for defects in silicon crystals", JES, 125, 5, 757, 1977**
- [9] **J.L. Sanchez, J. Rios, R. Berriane, J. Jalade, P. Austin
A New High Voltage Switches : Spontaneous Fired
M.O.S. - Thyristor Devices - Congrès EPE'95
19-21 Septembre 1995 – Séville**
- [10] **Jean Philibert, Diffusion et transport de matière dans les solides.
Les éditions de physique.**