

EGEM

électronique et micro-électronique

Implantation ionique et traitements thermiques en technologie silicium

sous la direction de
Annie Baudrant

EGEM

Hermes

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos	17
Annie BAUDRANT	
Chapitre 1. Oxydation du silicium et du carbure de silicium	25
Jean-Jacques GANEM et Isabelle TRIMAILLE	
1.1. Introduction	25
1.2. Revue des diverses techniques d'oxydation	27
1.2.1. Généralités	27
1.2.1.1. Processus d'oxydation	28
1.2.1.2. Processus de dépôt	28
1.2.2. Procédés les plus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs	28
1.2.2.1. L'oxydation thermique	28
1.2.2.2. Le dépôt en phase vapeur	31
1.2.3. Les autres procédés	33
1.2.3.1. L'oxydation anodique	33
1.2.3.2. L'oxydation assistée par plasma	35
1.2.3.3. L'oxydation à basse pression sous ultravide	38
1.2.3.4. L'oxydation à haute pression	40
1.3. Quelques propriétés physiques de la silice	41
1.3.1. Structure de la silice	41
1.3.2. Les trois paramètres utiles de la silice	45
1.3.3. Les propriétés de transport dans la silice	46
1.3.3.1. Diffusion des gaz rares dans la silice	46
1.3.3.2. Diffusion moléculaire dans la silice	48
1.4. Equations de transports atomiques durant l'oxydation	53

1.4.1. Les équations de transport dans le cas général	54
1.4.2. Première approximation : $C(x)$ varie lentement avec la profondeur x	55
1.4.2.1. Application au transport d'espèces neutres dans un milieu isotrope	55
1.4.2.2. Application au transport d'espèces chargées sous champ électrique $\varepsilon(x)$	55
1.4.3. Seconde approximation : $\varepsilon(x)$ varie lentement avec la profondeur x	57
1.4.4. Application des équations de transport à l'oxydation thermique et anodique.	59
1.4.4.1. Oxydation anodique	59
1.4.4.2. Oxydation thermique	59
1.5. Est-il possible d'identifier les mécanismes de transports qui ont lieu durant l'oxydation ?	59
1.5.1. Identification par les techniques de traçage isotopique	59
1.5.1.1. Première hypothèse : le silicium est la seule espèce mobile.	60
1.5.1.2. Seconde hypothèse : l'oxygène est la seule espèce mobile .	60
1.5.2. Résultats importants pour l'oxydation thermique du silicium sous O_2 sèche	66
1.5.2.1. Films d'épaisseur supérieure à 20 nm.	66
1.5.2.2. Films d'épaisseur inférieure ou égale à 10 nm	69
1.5.3. Résultats importants pour l'oxydation thermique humide	70
1.5.4. Conclusions sur les mécanismes de transports atomiques durant l'oxydation thermique du silicium.	71
1.5.5. Résultats expérimentaux et conclusions sur les mécanismes de transport durant l'oxydation anodique du silicium	71
1.5.6. Résultats expérimentaux importants de l'oxydation thermique sèche du SiC.	72
1.6. Les équations de transport dans le cas de l'oxydation thermique	73
1.6.1. Généralités sur les flux et les cinétiques de croissance	74
1.6.2. Calcul des flux pour des espèces mobiles neutres	74
1.6.3. Calcul des flux pour des espèces mobiles ioniques	74
1.6.3.1. Cas des films très minces ($X \leq 3$ nm).	74
1.6.3.2. Cas des films épais ($X \gg 3$ nm).	76
1.7. Théorie de l'oxydation thermique de Deal et Grove.	78
1.7.1. Calcul des flux.	79
1.7.1.1. Flux dans le gaz, F_g et flux net à l'interface gaz/oxyde, F_1 .	79
1.7.1.2. Flux net dans l'oxyde, F_2	81
1.7.1.3. Flux à l'interface oxyde/silicium, F_3	81
1.7.2. Equations des cinétiques de croissance	82

1.7.3. Remarques sur les variations des constantes d'oxydation k_p et k_L	84
1.7.4. Détermination des paramètres d'oxydation à partir de résultats expérimentaux.	85
1.7.5. Confrontation de la théorie de Deal et Grove avec les résultats expérimentaux	86
1.7.6. Conclusions sur la théorie de Deal et Grove	91
1.8. Théorie de l'oxydation thermique sous vapeur d'eau du silicium.	92
1.8.1. Profils de concentration attendus pour H_2O	92
1.8.2. Profils de concentration attendus pour les groupes OH	93
1.8.3. Profils de concentration attendus pour H_2	93
1.8.4. Profils de concentration attendus pour H	94
1.8.5. Comparaison des profils attendus et des profils expérimentaux.	96
1.8.6. Théorie de Wolters	96
1.9. Les cinétiques de croissance en O_2 pour des films d'oxydes < 30 nm	97
1.9.1. Généralités sur les films minces	97
1.9.2. Modèles d'oxydation des films minces	104
1.9.3. Cas des films ultraminces (< 5 nm)	106
1.9.4. Simulateur en ligne	107
1.9.5. Cinétiques et modèles d'oxydation de SiC	107
1.10. Variations des constantes d'oxydation avec les conditions expérimentales.	110
1.10.1. Rôle de la pression	110
1.10.1.1. Oxydation humide	110
1.10.1.2. Oxydation sèche	110
1.10.2. Rôle de la température	111
1.10.2.1. Oxydation humide	111
1.10.2.2. Oxydation sèche	112
1.10.3. Rôle de l'orientation du cristal	115
1.10.3.1. Oxydation humide	115
1.10.3.2. Oxydation sèche	115
1.10.4. Rôle du dopage	117
1.11. Conclusion	119
1.12. Bibliographie	119
Chapitre 2. Implantation ionique	129
Jean-Jacques GROB	
2.1. Introduction.	129
2.2. Les implantateurs ioniques	131
2.2.1. Description générale	131

12 Implantation ionique et traitements thermiques en technologie silicium

2.2.2. Sources d'ions	133
2.2.3. Analyse en masse et optique du faisceau	133
2.2.4. Mesure du courant	134
2.2.5. Rendement de production, contrôle de température et effets de charges	136
2.3. Parcours des ions	138
2.3.1. Collision binaire et pouvoir d'arrêt	138
2.3.2. Profil des ions implantés.	142
2.3.3. Rétrodiffusion, érosion superficielle et canalisation	146
2.3.4. Implantation à travers un masque	149
2.4. Création et guérison des défauts	151
2.4.1. Collision primaire et cascade	151
2.4.2. Défauts ponctuels	154
2.4.3. Accumulation des dommages, amorphisation	155
2.4.4. Guérison des dommages et activation des dopants	159
2.5. Applications dans les technologies traditionnelles et nouvelles tendances	163
2.5.1. Implantations courantes	164
2.5.2. Autres applications et nouvelles tendances.	167
2.5.2.1. Piégeage	167
2.5.2.2. Implantation à haute énergie	168
2.5.2.3. Jonctions ultra minces.	169
2.5.2.4. SIMOX et Smart-Cut™	170
2.5.2.5. Vers la nano-électronique ?.	173
2.6. Conclusion	174
2.7. Bibliographie.	175

Chapitre 3. Diffusion des dopants :

modélisation et enjeux technologiques 181

Daniel MATHIOT

3.1. Introduction.	181
3.2. Diffusion dans les solides	183
3.2.1. Généralités	183
3.2.1.1. Première loi de Fick	183
3.2.1.2. Flux généralisé : termes d'entraînement	185
3.2.1.3. Deuxième loi de Fick et calcul de profils simples	186
3.2.1.4. Analyse de Boltzman – Matano	189
3.2.2. Mécanismes élémentaires	191
3.2.2.1. Les mécanismes atomiques.	191
3.2.2.2. Théorie atomique du coefficient de diffusion	196

3	3.2.3. Spécificités des semi-conducteurs	199
3	3.2.3.1. Influence du dopage	200
4	3.2.3.2. Influence du champ électrique induit	201
6	3.3. Diffusion des dopants dans le silicium mono-cristallin	203
8	3.3.1. Méthodes de pré-dépôt	203
8	3.3.1.1. Pré-dépôt en phase vapeur	203
2	3.3.1.2. Pré-dépôt en phase solide	204
6	3.3.2. Principales observations expérimentales	205
9	3.3.2.1. Pré-dépôts diffusés en atmosphère neutre	205
1	3.3.2.2. Couplages entre impuretés	208
1	3.3.2.3. Influence de l'oxydation	210
4	3.3.3. Modélisation	211
5	3.3.3.1. Diffusion « normale »	211
9	3.3.3.2. Diffusion « anormale » : diffusion par paires	214
3	3.4. Exemples de problèmes d'ingénierie associés	219
4	3.4.1. Redistribution des dopants implantés :	
7	diffusion accélérée transitoire	219
7	3.4.2. Ingénierie des jonctions ultra fines	222
8	3.4.2.1. Ingénierie des défauts ponctuels	222
9	3.4.2.2. Co-implantation de fluor	222
0	3.4.2.3. Co-implantation de carbone	222
3	3.4.3. Effet canal court inverse	223
4	3.5. Diffusion des dopants dans le germanium	225
5	3.5.1. Diffusion thermique	226
1	3.5.1.1. Autodiffusion	226
1	3.5.1.2. Diffusion des donneurs	227
3	3.5.1.3. Diffusion du bore	228
3	3.5.2. Dopants implantés et ingénierie des jonctions	228
5	3.5.2.1. Jonctions P ⁺ /N	228
1	3.5.2.2. Jonctions N ⁺ /P	229
1	3.6. Conclusion	230
3	3.7. Bibliographie	231
3	 	
3	Chapitre 4. Epitaxie d'hétérostructures contraintes Si/Si_{1-x}Ge_x	239
5	Jean-Michel HARTMANN	
5	4.1. Introduction	239
9	4.1.1. Introduction générale	239
1	4.1.2. Le dépôt chimique en phase vapeur depuis les origines	240
1	4.1.2.1. Introduction	240
5	4.1.2.2. La CVD en général	241

4.1.2.3. Epitaxie conventionnelle haute température du Si	242
4.1.2.4. Epitaxie à basse température du Si et du SiGe	242
4.1.2.5. Evolution des équipements de CVD	243
4.1.3. Le bâti d'épitaxie Epi Centura	246
4.1.4. Quelques notions générales d'épitaxie	250
4.2. Ingénierie du canal de transistors pMOSFETs à l'aide de couches pseudomorphes de SiGe	253
4.2.1. Introduction	253
4.2.2. Cinétique de croissance de Si et de SiGe en chimie chlorée.	255
4.2.2.1. La cinétique de croissance du Si en chimie chlorée	255
4.2.2.2. La cinétique de croissance du SiGe en chimie chlorée.	257
4.2.3. Transposition sur substrats masqués.	260
4.2.4. Transistors pMOS incorporant des couches de SiGe	263
4.3. Ingénierie du canal de transistors nMOSFETs à l'aide de couches pseudomorphes de Si _{1-y} Cy ; barrières de diffusion SiGeC	264
4.3.1. Introduction	264
4.3.2. Incorporation du C dans Si et SiGe	266
4.3.3. Empilements Si/Si _{1-y} Cy/Si pour transistors nMOS	270
4.3.4. Transistors nMOS incorporant des couches de Si _{1-y} Cy ou des barrières de diffusion SiGeC.	273
4.4. Epitaxie de sources et drains surélevés de Si sur substrats SOI ultra-minces	275
4.4.1. Introduction	275
4.4.2. Problèmes rencontrés sur substrats SOI ultra-minces.	276
4.4.3. Procédé développé en réponse	277
4.5. Epitaxie de sources et drains abaissés et surélevés de SiGe:B sur substrats SOI ultra-minces et SON	279
4.5.1. Introduction	279
4.5.2. Cinétique de croissance et dopage bore du SiGe en chimie chlorée.	281
4.5.3. Sources et drains abaissés et surélevés de SiGe:B sur substrats FD-SOI et SON.	283
4.6. Substrats virtuels de SiGe : élaboration de substrats sSOI et de canaux duaux c-Ge / t-Si.	285
4.6.1. Introduction	285
4.6.2. Croissance et propriétés structurales de substrats virtuels de SiGe.	286
4.6.3. Croissance et propriétés structurales de couches de Si en tension sur substrats virtuels de SiGe.	294
4.6.4. Elaboration de substrats sSOI et XsSOI & propriétés de transport	299
4.6.5. Canaux duaux c-Ge/t-Si sur substrats virtuels Si _{0,5} Ge _{0,5}	303

4.7. Couches fines ou épaisses de Ge pur sur Si pour des finalités en nano- et opto-électronique	306
4.7.1. Introduction	306
4.7.2. Propriétés structurales de couches épaisses de Ge sur Si(001) et de GeOI	308
4.7.3. Propriétés optiques et de transport de couches épaisses de Ge sur Si(001) et de substrats GeOI	315
4.7.4. Propriétés structurales et optiques de boîtes quantiques de Ge sur Si(001)	319
4.8. Dispositifs à base de couches sacrificielles de SiGe	323
4.8.1. Introduction	323
4.8.2. Gravure sélective HCl du SiGe sélectivement par rapport au Si	323
4.8.3. Dispositifs SOI localisés et SON	328
4.8.4. Dispositifs à base de multi-fils et de multi-canaux	332
4.9. Conclusions et perspectives	342
4.9.1. Conclusion générale	342
4.9.2. Perspectives	344
4.10. Bibliographie	348
Index	363