



EGEM

électronique – génie électrique – microsystèmes

Techniques de fabrication des microsystèmes 1

*structures et microsystèmes
électromécaniques en couches minces*

*sous la direction de
Michel de Labachellerie*

hermes

Lavoisier

Table des matières

Chapitre 1. Introduction : le panorama des techniques de microfabrication	17
Michel DE LABACHELERIE	
1.1. Introduction.	17
1.2. Les techniques de photolithographie	18
1.2.1. Photolithographie	18
1.2.2. Enlèvement de matière.	18
1.2.3. Précision des structures 3D obtenues	19
1.2.4. Gravure sélective de couches minces	20
1.2.5. Transfert de masque	21
1.2.6. Catégories de micro-usinage	21
1.3. Micro-usinage de surface.	22
1.3.1. Usinage de surface : libération de structures	22
1.3.2. Usinage de surface des alliages III-V	23
1.3.3. Utilisation de substrats SOI	24
1.4. Micro-usinage de volume	25
1.4.1. Gravure anisotrope des matériaux cristallins	25
1.4.2. Technologie LIGA et attaque plasma anisotrope DRIE	26
1.5. Assemblage et positionnement précis de microstructures.	28
1.5.1. Assemblages collectifs de précision	29
1.5.2. Mise en position de micropièces	31
1.5.3. Microsystèmes « dépliés ».	32
1.6. Elaboration de matériaux spécifiques pour les actionneurs ou les capteurs.	33
1.7. Techniques complémentaires de microstructuration 3D.	34
1.7.1. Polissage	34
1.7.2. Moulage et répllication dans les plastiques	34
1.7.3. Stéréolithographie.	34

1.7.4. Autres techniques complémentaires	35
1.8. La caractérisation des microstructures	35
1.9. Bibliographie	35

Chapitre 2. Les techniques de photolithographie. 39

Norbert FABRE et Véronique CONÉDÉRA

2.1. Généralités	39
2.2. Différents types de lithographie	41
2.2.1. Lithographie optique	41
2.2.1.1. La lithographie par contact	41
2.2.1.2. La lithographie par proximité	43
2.2.1.3. La lithographie par projection	44
2.2.2. La lithographie électronique	48
2.2.2.1. Différentes configurations de machines	49
2.2.2.2. Effets de proximité	52
2.2.3. Lithographie par rayons X (RX)	53
2.2.3.1. Principes de la lithographie (RX)	53
2.2.3.2. Les sources de RX	54
2.2.3.3. Les masques	55
2.2.4. Lithographie ionique	55
2.3. Résines en couches minces	56
2.3.1. Généralités	56
2.3.2. Caractéristiques d'une résine	57
2.3.3. Résines photosensibles	58
2.3.3.1. Les résines photosensibles positives	58
2.3.3.2. Résines photosensibles négatives	61
2.3.3.3. Résines réversibles	62
2.3.3.4. Résines sensibles aux électrons	63
2.3.3.5. Résines sensibles aux rayons X	64
2.3.3.6. Résines sensibles aux faisceaux d'ions	65
2.4. Bibliographie	65

Chapitre 3. Les dépôts en couches minces 69

William DANIAU et Laurent ROBERT

3.1. Introduction	69
3.2. Les dépôts physiques en phase vapeur	70
3.2.1. Evaporation	70
3.2.1.1. Introduction	70
3.2.1.2. Théorie	70
3.2.1.3. Aspect pratique	72

3.2.2. Pulvérisation cathodique	73
3.2.2.1. Définition et historique	73
3.2.2.2. Mécanismes de la pulvérisation cathodique	74
3.2.2.3. Caractéristiques de la pulvérisation cathodique	75
3.2.2.4. Les différentes techniques de pulvérisation cathodique	77
3.3. Oxydation thermique	83
3.4. Dépôts chimiques en phase vapeur	83
3.4.1. Types de réaction	85
3.4.1.1. Pyrolyse	85
3.4.1.2. Réduction	85
3.4.1.3. Oxydation	85
3.4.1.4. Formation de composés	85
3.4.2. Mise en œuvre	86
3.4.2.1. CVD atmosphérique	86
3.4.2.2. LPCVD	86
3.4.2.3. PECVD	87
3.5. Bibliographie	88

Chapitre 4. Dépôts en phase liquide : application aux microtechniques 91

Skandar BASROUR

4.1. Introduction	91
4.2. Les dépôts électrolytiques	93
4.2.1. Principes d'électrochimie	93
4.2.1.1. Introduction	93
4.2.1.2. Les cellules d'électrolyse	95
4.2.1.3. Les constituants des bains	96
4.2.1.4. Les électrodes	98
4.2.2. Les phénomènes de transport	99
4.2.2.1. Descriptions phénoménologiques	99
4.2.2.2. Double couche de Helmholtz	101
4.2.3. Vitesse de dépôt et rendement faradique	102
4.2.4. Distributions de courant et uniformité des microstructures	104
4.2.4.1. Introduction	104
4.2.4.2. La distribution primaire	106
4.2.4.3. Les distributions secondaires et tertiaires	107
4.2.4.4. Les courants pulsés	107
4.2.5. Compositions de bains usuels	109
4.2.6. Propriétés des dépôts électrolytiques	110
4.3. Les dépôts chimiques ou techniques <i>electroless</i>	112
4.3.1. Principes	113
4.3.2. Paramètres de dépôt et propriétés des matériaux	114

4.4. Domaines d'application	115
4.5. Bibliographie	116

Chapitre 5. Dépôts de polymères 121

Pascale JOLINAT

5.1. L'utilisation des polymères en électronique	121
5.1.1. Introduction	121
5.1.2. Applications courantes	122
5.1.2.1. Couches de masquage pour la microélectronique	122
5.1.2.2. Conditionnement des puces électroniques	123
5.1.3. Nouvelles applications	125
5.1.3.1. Composants organiques	125
5.1.3.2. Interconnexions optiques	126
5.2. Techniques de dépôt en couches minces	126
5.2.1. Introduction	126
5.2.2. Dépôt d'une solution de polymère	127
5.2.2.1. Trempage (<i>dip coating</i>)	127
5.2.2.2. Centrifugation (<i>spin coating</i>)	127
5.2.2.3. Etalement (<i>doctor blade coating</i>)	128
5.2.2.4. Applicateur (<i>meniscus coating</i>)	129
5.2.2.5. Pulvérisation (<i>spray coating</i>)	130
5.2.2.6. Technique du « jet d'encre »	130
5.2.3. Autres méthodes de dépôt	131
5.2.3.1. Introduction	131
5.2.3.2. Polymérisation en phase vapeur (<i>vapor deposition polymerization</i>)	132
5.2.3.3. Polymérisation par plasma	133
5.2.3.4. Technique de Langmuir-Blodgett	134
5.2.3.5. Electropolymérisation	135
5.3. Conclusion	136
5.4. Bibliographie	137

Chapitre 6. La gravure humide des couches minces 143

Jean-Paul GILLES et Jean-Paul GRANDCHAMP

6.1. Introduction	143
6.2. Définitions	144
6.2.1. Isotropie et anisotropie	144
6.2.2. Facteur de forme et sélectivité	145
6.3. Gravure humide et isotrope	146
6.3.1. Isotropie et anisotropie	146

6.3.2. Mécanismes	147
6.3.2.1. Les processus chimiques	147
6.3.2.2. Transport et vitesse d'érosion	151
6.3.2.3. Effets de géométrie.	153
6.3.3. Gravure des composés silicium.	155
6.3.3.1. La silice	155
6.3.3.2. Le nitrure de silicium	157
6.3.4. Le silicium	158
6.3.4.1. Gravure isotrope	158
6.3.4.2. Gravure anisotrope	159
6.3.5. Autres matériaux	162
6.3.5.1. Le germanium.	162
6.3.5.2. Les composés III-V	162
6.3.6. Les métaux	164
6.3.6.1. L'aluminium	164
6.3.6.2. Le chrome	165
6.3.6.3. Le cuivre.	165
6.3.6.4. Les matériaux réfractaires.	166
6.5. Bibliographie.	167
Chapitre 7. La gravure sèche des couches minces	169
Jean-Paul GRANDCHAMP et Jean-Paul GILLES	
7.1. Introduction.	169
7.2. Notions sur les plasmas de décharges	170
7.2.1. Définition d'un plasma.	170
7.2.2. Longueur de Debye.	173
7.2.3. Collisions de particules	175
7.2.3.1. Types de collisions.	175
7.2.3.2. Section efficace de collision, libre parcours moyen	176
7.2.4. Interface plasma-électrode.	177
7.2.4.1. Interface avec une électrode isolée ou isolante	177
7.2.4.2. Interface avec une électrode polarisée	179
7.2.5. Les décharges basse pression	180
7.2.5.1. Techniques de production des décharges.	180
7.2.5.2. Décharge diode continue	181
7.2.5.3. Décharge diode RF.	185
7.2.5.4. Décharge magnétron.	189
7.2.5.5. Décharges à couplage inductif.	190
7.2.5.6. Décharges à résonance cyclotronique électronique	191
7.2.5.7. Décharges Hélicon	192
7.2.5.8. Décharges à cathode émissive	192

7.3. Mécanismes de gravure.	194
7.3.1. Gravure physique	195
7.3.2. Gravure chimique	197
7.3.3. Gravure chimique assistée par bombardement ionique	197
7.3.3.1. Gravure anisotrope assistée par l'énergie des ions	199
7.3.3.2. Gravure anisotrope par passivation des parois latérales	199
7.4. Paramètres influençant la gravure.	199
7.4.1. Paramètres de contrôle des procédés.	200
7.4.1.1. Pression	200
7.4.1.2. Puissance électrique	201
7.4.1.3. Flux gazeux	201
7.4.1.4. Fréquence d'excitation	201
7.4.1.5. Température du substrat.	202
7.4.1.6. Composition du gaz	202
7.4.1.7. Energie des ions	207
7.4.2. Paramètres structuraux	207
7.4.2.1. Quantité de matériau à graver	207
7.4.2.2. Matériau du porte-substrat	208
7.4.2.3. Densité et géométrie des motifs gravés	208
7.4.2.4. Niveau de dopage du matériau	209
7.4.2.5. Géométrie du réacteur	209
7.5. Principaux réacteurs de gravure.	209
7.5.1. Classification des types de réacteurs et procédés de gravure associés.	209
7.5.2. Gravure en milieu plasma	210
7.5.2.1. Réacteur Barrel	210
7.5.2.2. Réacteur de gravure en postdécharge	211
7.5.2.3. Réacteur diode RF	212
7.5.2.4. Réacteur magnétron	213
7.5.2.5. Réacteurs de gravure à plasma dense	213
7.5.3. Réacteur de gravure par faisceau d'ions.	214
7.6. Bibliographie.	217

Chapitre 8. Procédés d'usinage de surface sur silicium. 221

Lionel BUCHAILLOT, Dominique COLLARD, Vincent AGACHE, Olivier MILLET

8.1. Introduction.	221
8.1.1. Historique	221
8.1.2. Principe	222
8.1.3. Avantages et inconvénients	224
8.1.4. Organisation du chapitre.	224
8.2. Premiers démonstrateurs	225

8.3. Procédés standard et exemples de réalisation	228
8.3.1. Le procédé Summit	229
8.3.2. Le procédé MUMP	231
8.4. Procédés d'usinage de surface alternatifs	234
8.4.1. Le procédé Hexsil	237
8.4.2. Le procédé SCREAM	238
8.5. Co-intégration avec l'électronique	239
8.5.1. Filière intégrée.	241
8.5.2. Réalisation séquentielle : microélectronique puis microstructures	242
8.5.3. Réalisation séquentielle : microstructures puis circuits microélectroniques	243
8.5.4. Microstructures en postfabrication de circuits CMOS	244
8.6. Fiabilité du micro-usinage de surface	245
8.6.1. La stiction	245
8.6.1.1. Attraction par les forces de capillarité	245
8.6.1.2. Adhésion par les forces de contact solide-solide	247
8.6.1.3. Prévention de la stiction	249
8.6.2. Fatigue du silicium polycristallin.	250
8.6.2.1. Méthodologie et mise en œuvre des essais	251
8.6.2.2. Mécanisme d'endommagement et fatigue	251
8.7. Conclusion	253
8.8. Bibliographie	253

Chapitre 9. Méthodes et techniques de caractérisation mécanique des couches minces et des dispositifs microélectromécaniques

Alain BOSSEBŒUF et Michel DUPEUX

9.1. Introduction.	259
9.2. Méthodes de caractérisation mécanique des films et des dispositifs micromécaniques à partir des déplacements statiques	261
9.2.1. Méthode du rayon de courbure	261
9.2.1.1. Principe	261
9.2.1.2. Cas d'un film mince ou peu contraint.	261
9.2.1.3. Cas d'un film épais et/ou fortement contraint	263
9.2.1.4. Cas de multicouches	264
9.2.1.5. Techniques de mesure du rayon de courbure	264
9.2.1.6. Applications.	266
9.2.2. Caractérisation mécanique à partir des déformations statiques de dispositifs micromécaniques	268
9.2.2.1. Micropoutres simples et composites	268
9.2.2.2. Microponts	270

9.2.2.3. Membranes	271
9.2.2.4. Microdispositifs de test des déformations	272
9.3. Caractérisation des dispositifs micromécaniques en régime dynamique	272
9.3.1. Généralités	272
9.3.2. Vibration des micropoutres et des microponts	275
9.3.3. Vibration des membranes	278
9.4. Caractérisation mécanique de films et de microdispositifs à partir d'essais mécaniques.	279
9.4.1. Nano-indentation	279
9.4.1.1. Principe	279
9.4.1.2. Mise œuvre et applications	280
9.4.2. Traction.	282
9.4.2.1. Traction <i>ex situ</i>	282
9.4.2.2. Traction <i>in situ</i>	284
9.4.2.3. Applications.	285
9.4.3. Gonflement de membranes	286
9.4.3.1. Principe	286
9.4.4. Flexion	287
9.4.4.1. Principe	287
9.4.4.2. Flexion de microdispositifs	288
9.4.5. Méthodes de mesure de la ténacité et de l'adhérence des couches minces	290
9.4.5.1. Rupture d'échantillons autoportants ou de microdispositifs	290
9.4.5.2. Essais sur substrats revêtus	291
9.4.5.3. Essais d'adhérence	295
9.5. Techniques optiques, ultrasonores et de diffraction X pour la caractérisation mécanique des films minces	299
9.5.1. Techniques optiques	299
9.5.1.1. Techniques ultrasonores.	301
9.5.1.2. Techniques de diffraction X	307
9.6. Conclusion	310
9.7. Bibliographie.	311
Index	323