

EGEM

électronique et micro-électronique

**Matériaux
piézoélectriques
intégrés sur silicium**

*sous la direction de
Emmanuel Defaÿ*

EGEM

Hermès

Lavoisier

Table des matières

Préface	17
Emmanuel DEFAÏ	
Introduction générale	21
Emmanuel DEFAÏ	
Chapitre 1. Diélectrique, piézoélectrique, pyroélectrique et ferroélectrique	23
Emmanuel DEFAÏ	
1.1. Structure cristalline	23
1.1.1. Cristal = réseau + motif	23
1.1.2. Sept réseaux primitifs – Quatorze réseaux de Bravais	26
1.1.3. Deux cent trente groupes d'espace	27
1.1.4. Trente-deux groupes ponctuels (ou classes cristallines)	28
1.1.5. Les plans réticulaires	30
1.1.6. Les rayons X « voient » le cristal.	31
1.2. Définitions piézoélectricité, pyroélectricité, ferroélectricité	31
1.3. Exemples simplifiés	33
1.3.1. Effet diélectrique	33
1.3.2. Effet piézoélectrique	34
1.3.3. Effet pyroélectrique.	36
1.3.4. Effet ferroélectrique	37
1.3.5. Effet électrostrictif	38

10 Matériaux piézoélectriques intégrés sur silicium

1.4. Trois structures typiques : wurtzite, ilménite et pérovskite	39
1.4.1. Structure wurtzite	39
1.4.2. Structure ilménite	40
1.4.3. Structure pérovskite	42
1.5. Bibliographie	47

Chapitre 2. L'étude thermodynamique : une approche structurante 49

Emmanuel DEFAÏ

2.1. Historique	49
2.2. Rappel de thermodynamique statistique	51
2.2.1. Introduction	51
2.2.2. Notion d'équilibre, postulat statistique	51
2.2.3. Nombres d'états accessibles d'un système	53
2.2.4. Variation d'énergie – Travail et chaleur	55
2.2.5. L'échange thermique : entropie et température absolue	57
2.2.6. L'énergie thermique : transfert de chaleur	60
2.2.7. Transformation quasistatique avec échange de travail et de chaleur	62
2.2.8. Exemple d'une expérience à température et pression constante	64
2.3. Les fonctions d'états	66
2.4. Equations linéaires – Piézoélectricité	70
2.5. Equations non linéaires – Electrostriction	72
2.6. Bibliographie	73

**Chapitre 3. Modélisation thermodynamique
de la transition de phase ferroélectrique-paraélectrique** 75

Emmanuel DEFAÏ

3.1. Hypothèse sur l'énergie élastique de Gibbs	75
3.2. Transition du deuxième ordre	78
3.3. Effet des contraintes	84
3.4. Transition du premier ordre	86
3.5. Conclusion	91
3.6. Bibliographie	91

Chapitre 4. Formalisme mécanique 93

Emmanuel DEFAÏ

4.1. Introduction	93
4.2. La loi de Hooke	94

4.3. Définitions des déformations locales	95
4.3.1. Déformations locales dans l'hypothèse des petites déformations	95
4.3.2. Signification de la matrice \bar{S}	101
4.4. Définition des contraintes locales	103
4.4.1. Le tenseur des contraintes	103
4.4.2. Signification physique des T_{ij}	106
4.4.3. Equations du mouvement dans un solide déformable	108
4.5. Relation contraintes-déformation	109
4.5.1. Loi de Hooke généralisée	109
4.5.2. Relation dynamique	110
4.6. Densité d'énergie élastique	112
4.6.1. Expression de la densité d'énergie élastique	112
4.6.2. Symétrie du tenseur d'élasticité	113
4.7. Expression du tenseur d'élasticité en fonction des éléments de symétrie	114
4.8. Bibliographie	118
Chapitre 5. Formalisme diélectrique	119
Emmanuel DEFAÏ	
5.1. Introduction	119
5.2. L'effet diélectrique vu par Faraday	119
5.3. La polarisation et le déplacement électriques	123
5.4. La constante diélectrique	128
5.5. Le champ local dans les diélectriques : la catastrophe de la polarisation	129
5.6. La relaxation diélectrique	133
5.6.1. Les diverses relaxations	133
5.6.2. Les relations de Kramers-Kronig	136
5.7. Densité d'énergie électrique	139
5.8. Bibliographie	141
Chapitre 6. Formalisme piézoélectrique	143
Emmanuel DEFAÏ et Mathieu PIJOLAT	
6.1. Equations thermodynamiques	143
6.2. Réduction des coefficients par la symétrie des cristaux	145
6.2.1. Exemple de calcul : groupe ponctuel $3m$	146
6.3. Modèle microscopique unidimensionnel	150
6.4. Coefficient de couplage électromécanique	154
6.5. Coefficients piézoélectriques de certains matériaux	158

12 Matériaux piézoélectriques intégrés sur silicium

6.6. Calcul du couplage en fonction de l'orientation cristalline	160
6.7. Coefficients piézoélectriques dans le cas des matériaux ferroélectriques	162
6.8. Bibliographie	163
Chapitre 7. Formalisme acoustique	165
Alexandre REINHARDT	
7.1. Propagation d'ondes de volume	165
7.1.1. Propagation d'ondes de volume dans un milieu élastique	165
7.1.2. Propagation d'ondes élastiques dans un milieu piézoélectrique	175
7.2. Résonateur à ondes de volume	185
7.2.1. Vibration d'une plaque piézoélectrique	185
7.2.2. Plaque délimitée par des milieux d'impédance acoustique arbitraire	194
7.2.3. Plaque bimorphe	195
7.2.4. Plaque piézoélectrique entre deux électrodes	199
7.2.5. Schéma électrique équivalent	203
7.3. Filtre à ondes acoustiques de volume	207
Chapitre 8. Formalisme électrostrictif	213
Emmanuel DEFAÏ	
8.1. Fondements de l'électrostriction	213
8.2. Modèle thermodynamique de l'électrostriction – Cas du résonateur	215
8.3. Le tenseur d'électrostriction	217
8.4. Modèle microscopique de l'électrostriction	219
8.4.1. Modèle unidimensionnel	219
8.4.2. Origine de la polarisation spontanée dans les cristaux pérovskites	221
8.5. Résonateur électrostrictif	224
8.6. Bibliographie	227
Chapitre 9. Caractérisation électrique	229
Emmanuel DEFAÏ, Gwenaël LE RHUN et Emilien BOUYSSOU	
9.1. Caractérisation piézoélectrique statique des couches minces	229
9.1.1. Notion de coefficients effectifs	229
9.1.2. Caractérisation piézoélectrique du coefficient e_{31eff}	230
9.1.3. Modèle	232
9.1.4. Exemple de caractérisation : couches de PZT	235

9.2. Le microscope à force atomique piézoélectrique (PFM)	237
9.2.1. L'AFM	237
9.2.2. Le PFM	240
9.3. La mesure ferroélectrique	247
9.3.1. Montage Sawyer-Tower	249
9.3.2. Montage « masse virtuelle »	251
9.4. La mesure diélectrique	255
9.5. Courant de fuite dans les structures métal/isolant/métal	258
9.5.1. Contact métal/isolant : définitions	259
9.5.2. Mécanismes de conduction limitée par les interfaces	262
9.5.3. Mécanismes de conduction limitée par le volume	265
9.6. Bibliographie	268
Chapitre 10. Résonateurs et filtres piézoélectriques	271
Alexandre REINHARDT et Christophe BILLARD	
10.1. Résonateurs acoustiques : principe et historique	271
10.1.1. Résonateurs à quartz	271
10.1.2. Montée en fréquence des résonateurs	274
10.1.3. Perfectionnement des résonateurs FBAR et SMR	278
10.2. Technologie BAW	292
10.2.1. Introduction	292
10.2.2. Les topologies de filtres BAW	293
10.2.3. Les paramètres du résonateur BAW et leur impact sur la réponse des filtres	296
10.2.4. Exemples de réalisations	304
10.3. Technologie CRF	306
10.3.1. Introduction	306
10.3.2. Principes de fonctionnement des filtres CRF	307
10.3.3. Exemple de réalisations	311
10.4. Bibliographie	314
Chapitre 11. <i>High overtone Bulk Acoustic Resonator</i> (HBAR).	319
Mathieu PUJOLAT, Chrystel DEGUET et Sylvain BALLANDRAS	
11.1. A propos des HBAR	319
11.1.1. Généralités	320
11.1.2. Principe	321
11.1.3. Description du spectre	321

14 Matériaux piézoélectriques intégrés sur silicium

11.2. Technologie	324
11.2.1. Contraintes technologiques	324
11.2.2. Choix des matériaux	325
11.2.3. Géométrie des résonateurs	326
11.3. Exemples de réalisations	327
11.3.1. LNO sur LNO	327
11.3.2. Validation de l'extraction de paramètres : LNO sur Si HBAR/FBAR	332
11.4. Conclusion sur les HBAR	335
11.5. Bibliographie	335

Chapitre 12. Résonateurs électrostrictifs 337

Alexandre VOLATIER, Brice IVIRA, Christophe ZINCK, Nizar BEN HASSINE
et Emmanuel DEFAY

12.1. Introduction	337
12.2. Etat de l'art	338
12.2.1. Introduction	338
12.2.2. Formalisme du résonateur électrostrictif.	340
12.3. Réalisations expérimentales	348
12.3.1. Résonateur BST 70/30 sans isolation acoustique.	348
12.3.2. Résonateur STO sur miroir de Bragg.	356
12.3.3. Résonateur BST sur miroir de Bragg acoustique.	360
12.3.4. Résonateur BST sur membrane	362
12.4. Simulation de filtre avec résonateurs électrostrictifs	363
12.5. Statut sur les résonateurs électrostrictifs pérovskites.	364
12.6. Résonateur acoustique ferroélectrique à fréquence accordable à base de PZT	366
12.6.1. Introduction.	366
12.6.2. Technologie	367
12.6.3. Caractérisation RF et discussion	368
12.7. Effet non linéaire dans l'AlN piézoélectrique.	371
12.7.1. Introduction.	371
12.7.2. Modèle phénoménologique piézoélectrique-électrostrictif.	371
12.7.3. Application : résonateur AlN sur miroir de Bragg	373
12.7.4. Conclusion sur l'AlN non linéaire	376
12.8. Conclusion sur l'électrostriction.	377
12.9. Bibliographie	377

Chapitre 13. Transducteurs piézoélectriques en couches minces	379
Matthieu CUEFF, Patrice REY, Fabien FILHOL et Emmanuel DEFAÏ	
13.1. Introduction	379
13.2. Etat de l'art	380
13.3. Membranes résonantes	383
13.3.1. Technologie des membranes résonantes en PZT	383
13.3.2. Caractérisation en fréquence des membranes	385
13.3.3. Un capteur de pression résonant	387
13.3.4. Conclusion sur l'étude des membranes résonantes Si/PZT	388
13.4. Micromiroir résonant	388
13.4.1. Introduction	388
13.4.2. Technologie et conception du micromiroir résonant	389
13.4.3. Caractérisation des dispositifs	391
13.4.4. Conclusion sur le micromiroir	393
13.5. Micro-interrupteur piézoélectrique	393
13.5.1. Intérêt des couches piézoélectriques pour les micro-interrupteurs	393
13.5.2. Description générale du composant	394
13.5.3. Développement analytique de la poutre bilame comme actionneur de micro-interrupteur	396
13.5.4. Empilement choisi pour l'actionneur piézoélectrique	405
13.5.5. Modèle analytique multicouche	406
13.5.6. Effet de la compensation en température	408
13.5.7. La couche piézoélectrique	409
13.5.8. Libération de la membrane	410
13.5.9. Caractérisations électriques	410
13.6. Signe des coefficients piézoélectriques	413
13.7. Bibliographie	415
Index	419