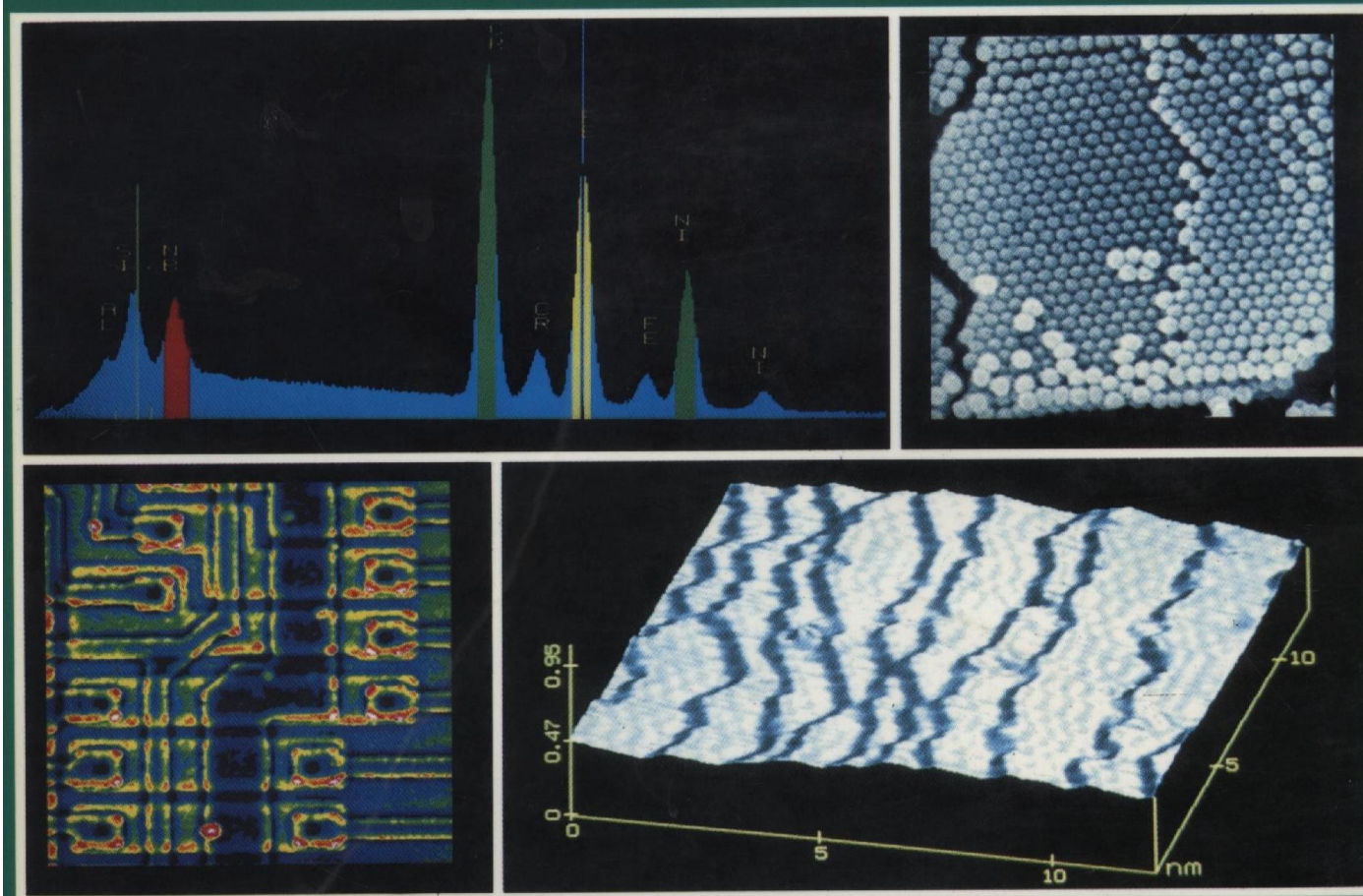


B. Agius M. Froment et co-auteurs

Surfaces interfaces et films minces

Observation et analyse



Ouvrage publié avec le concours du Ministère de la Recherche et de la Technologie (DIST)

Dunod

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1. ELEMENTS DE PHYSIQUE	
ELECTRONIQUE DES SOLIDES.....	11
<i>(par G. Hollinger, J. Klein et P. Pertosa)</i>	
1. Etats électroniques dans des solides cristallisés	12
1.1. Notions de réseau réciproque	12
1.2. Notions de bandes d'énergie.....	13
1.3. Notion de masse effective.....	14
1.4. Notions de densité d'états.....	15
2. Surfaces et interfaces.....	16
2.1. Structure d'une surface.....	16
2.2. Réactions chimiques en surfaces.....	18
3. Niveaux électroniques et analyse spectroscopique.....	18
3.1. Notions élémentaires sur la structure électronique.....	20
3.1.1. Cas de l'atome.....	21
3.1.2. Cas des molécules et des solides.....	23
3.2. Généralités sur les spectroscopies électroniques et l'interaction particule-matière.....	24
3.2.1. Interaction photon-électron.....	25
3.2.2. Désexcitation.....	25
3.2.3. Interaction électron-électron.....	27
3.2.4. Lien entre spectroscopies de photoélectrons, d'électrons Auger, et de perte d'énergie.....	27
3.2.5. Libre parcours moyen des électrons dans la matière.....	28
Chapitre 2. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE.....	31
<i>(par L. Beaunier, M. Froment et J. Klein)</i>	
1. Introduction.....	31

2. La microscopie électronique à transmission.....	33
2.1. Interactions électrons-matière.....	33
2.1.1. Interactions élastiques, inélastiques.....	33
2.1.2. Diffraction des électrons.....	35
2.2. Organisation d'un microscope électronique.....	40
2.2.1. La colonne.....	40
2.2.2. Les porte-objets.....	43
2.2.3. Modes de fonctionnements, diffraction, champ clair, champ sombre	44
2.3. Applications	46
2.3.1. Surfaces.....	46
2.3.2. Diffraction par réflexion.....	49
2.3.3. Couches minces.....	54
2.4. Tendances actuelles.....	65
3. La microscopie électronique à balayage : en réflexion (SEM), en transmission (STEM).....	65
3.1. Microscopie électronique à balayage (SEM).....	66
3.1.1. Principe.....	66
3.1.2. Appareillage.....	66
3.1.3. Caractéristiques.....	69
3.1.4. Détection et contraste des signaux.....	74
3.1.5. Contrastes particuliers.....	82
3.2. Mode analytique en SEM.....	85
3.2.1. Analyse par émission de rayons X en SEM.....	85
3.2.2. Cathodoluminescence.....	96
3.3. Limites et perspectives du MEB (SEM).....	96
3.4. Microscope électronique à balayage en transmission (STEM).	96
3.4.1. Principe.....	97
3.4.2. Principe de réciprocité.....	99
3.4.3. Emission électronique : mode image.....	99
3.5. Microscopie analytique en MEBT (STEM).....	103
3.5.1. Analyse par spectrométrie de rayons X à dispersion en énergie.....	103
3.5.2. Spectrométrie des pertes d'énergie d'électrons.....	104
3.6. Perspectives et limitations.....	107
4. La microscopie "tunnel".....	108
4.1. Effet "tunnel".....	108
4.2. Principe de la microscopie tunnel.....	110
4.3. Interprétations des images.....	111
4.4. Aspects expérimentaux.....	115

4.5. Présentation des résultats.....	116
4.5.1. Etude des semi-conducteurs.....	117
4.5.2. Etude des métaux.....	120
4.5.3. Etude de structures organiques.....	122
4.5.4. Molécules individuelles.....	125
4.5.5. Aspect dynamique.....	126
4.6. Perspectives.....	126
Chapitre 3. SPECTROSCOPIES D'ELECTRONS.....	129
<i>(par G. Hollinger et P. Pertosa)</i>	
1. Les spectroscopies de photoélectrons XPS (ou ESCA) et UPS.....	129
1.1. Introduction.....	129
1.1.1. Principe et historique.....	129
1.1.2. Aspects phénoménologiques de la photoémission dans le solide.....	131
1.2. Aspects fondamentaux des spectroscopies de photoélectrons...	134
1.2.1. Considérations générales sur le processus de photo-ionisation.....	134
1.2.2. Les fonctions d'onde.....	136
1.2.3. L'approximation monoélectronique et le théorème de Koopmans....	138
1.2.4. L'énergie de relaxation.....	139
1.2.5. Les effets d'état final et les excitations multiélectroniques.....	140
1.2.6. Variations des énergies de liaison des niveaux de cœur.....	146
1.2.7. Les sections efficaces de photo-ionisation.....	150
1.3. Aspect instrumental.....	155
1.3.1. Sources de rayonnement.....	156
1.3.2. Les analyseurs.....	159
1.3.3. Détection et acquisition de données.....	161
1.3.4. Echantillons.....	161
1.4. Aspects pratiques : obtention et interprétation du spectre de photoélectrons.....	162
1.4.1. Aspects méthodologiques.....	162
1.4.2. Structure fine d'un spectre.....	170
1.4.3. La spectroscopie des niveaux de cœur.....	172
1.4.4. Spectroscopie des bandes de valence.....	176
1.4.5. La photoémission angulaire.....	178
1.5. Domaines d'applications.....	180
1.5.1. Analyse chimique et profils de concentration.....	181
1.5.2. Composition chimique des surfaces.....	189
1.5.3. Etude des surfaces et des interfaces.....	195

2. La spectroscopie Auger	200
2.1. Introduction.....	200
2.2. Aspects fondamentaux.....	201
2.2.1. Le processus Auger : expression de l'énergie cinétique.....	201
2.2.2. Le déplacement chimique Auger.....	205
2.2.3. Classification des transitions Auger.....	207
2.2.4. Intensités des raies Auger.....	211
2.3. Aspect instrumental.....	216
2.3.1. Sources électroniques.....	216
2.3.2. Sources d'ions.....	217
2.3.3. Les analyseurs.....	218
2.4. Applications.....	221
2.4.1. Analyse chimique.....	221
2.4.2. Le déplacement chimique et le paramètre Auger.....	225
2.4.3. Profils et images Auger.....	228
2.4.4. Quelques exemples d'applications.....	229
2.5. Comparaison ESCA - Auger.....	234

Chapitre 4. FAISCEAUX D'IONS MICROANALYSES IONIQUE ET NUCLEAIRE..... 237 *(par F. Abel, B. Agius, G. Blaise et A. Huber)*

1. La microanalyse ionique secondaire.....	237
1.1. Principe de la méthode et considérations de base.....	237
1.1.1. Généralités.....	237
1.1.2. Historique et principe de la microanalyse ionique.....	238
1.2. Aspects fondamentaux de l'émission ionique secondaire	247
1.2.1. Les ions atomiques.....	247
1.2.2. Les ions moléculaires.....	262
1.3. Considérations pratiques et instrumentales sur l'analyse ionique.....	272
1.3.1. Conditions de pulvérisation.....	272
1.3.2. SIMS quasi statique et dynamique.....	274
1.3.3. Collecte des ions et rendement utile : sensibilité.....	275
1.3.4. Séparation en masse : haute résolution.....	278
1.3.5. Les images ioniques.....	279
1.3.6. L'analyse en profondeur.....	281
1.3.7. L'analyse des matériaux isolants.....	284
1.4. Les procédures quantitatives en analyse ionique.....	285

1.5. Applications de la microanalyse par émission ionique secondaire.....	289
1.5.1. Applications en métallurgie.....	289
1.5.2. Applications dans l'industrie des semi-conducteurs.....	291
1.5.3. Applications dans les sciences de la terre.....	297
1.5.4. Applications aux sciences de la vie.....	301
2. La microanalyse nucléaire.....	303
2.1. Introduction.....	303
2.2. Microanalyse par l'observation directe de réactions nucléaires.....	305
2.2.1. Introduction.....	305
2.2.2. Fondements théoriques de la méthode.....	306
2.2.3. Performances de la méthode.....	315
2.2.4. Applications.....	327
2.3. L'analyse par rétrodiffusion élastique.....	332
2.3.1. Introduction.....	332
2.3.2. Principes de la méthode.....	333
2.3.3. Analyse quantitative.....	339
2.3.4. Analyse de l'hydrogène par détection des atomes de recul.....	342
2.4. Analyse à l'aide des rayons X induits par des faisceaux de particule.....	344
2.4.1. Introduction.....	344
2.4.2. Principes physiques.....	345
Chapitre 5. INTERACTION PHOTONS-SURFACE.....	349
<i>(par B. Agius, L. Bosio et A. Hugot-Le Goff)</i>	
1. Introduction.....	349
2. Application des rayons X à l'étude des surfaces et interfaces.....	350
2.1. Introduction.....	350
2.1.1. Présentation des méthodes.....	350
2.1.2. Incidence rasante.....	353
2.2. Méthodes à énergie incidente fixe.....	355
2.2.1. Incidence rasante.....	355
2.2.2. Incidence non rasante : utilisation des ondes stationnaires.....	365

2.3. Méthodes à énergie incidente variable.....	375
2.3.1. Spectroscopie par absorption des rayons X (EXAFS).....	375
2.3.2. Incidence rasante : ReFlEXAFS.....	379
2.3.3. Incidence non rasante : SEXAFS.....	384

3. Application des méthodes spectroscopiques optiques 387

3.1. Introduction.....	387
3.2. Rappel d'optique des matériaux.....	390
3.2.1. Isolant.....	391
3.2.2. Métal.....	392
3.3. Les différentes méthodes optiques.....	394
3.4. Les méthodes spectroscopiques IR.....	398
3.4.1. Bases de la spectroscopie Raman.....	398
3.4.2. Dispositif expérimental.....	401
3.4.3. Amplification d'un signal Raman.....	404
3.4.4. Exemples d'applications.....	405
3.5. Les méthodes spectroscopiques UV-visibles.....	411
3.5.1. Couches supérieures à 10 nm environ traitement statistique du pouvoir réflecteur.....	411
3.5.2. Ellipsométrie.....	417

EVALUATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES D'OBSERVATION ET D'ANALYSE..... 445

BIBLIOGRAPHIE..... 453

INDEX..... 469

Surfaces interfaces et films minces

Dans les domaines de haute technologie (microélectronique, optoélectronique, aéronautique, mécanique, métallurgie...), les exigences de fiabilité des matériaux s'accroissent de plus en plus. Un contrôle de la morphologie, de la structure, de la composition des surfaces, interfaces et couches minces est indispensable.

Cet ouvrage présente les développements et applications des plus récentes méthodes répondant à cet impératif :

- microscopies et spectroscopies électroniques ;
- microanalyses, ionique et nucléaire ;
- rayons X et spectroscopies optiques.

Évaluant les possibilités de chaque méthode, il permet au lecteur de choisir la plus adaptée à son problème.

Il est destiné non seulement aux enseignants et étudiants des universités (2^e et 3^e cycles) et des écoles d'ingénieurs, mais également aux ingénieurs, techniciens et chercheurs concernés par les matériaux et leur mise en œuvre industrielle.



ISBN 2-04-018771-5

