

**BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS**

**LÁMINAS DELGADAS Y RECUBRIMIENTOS**  
**Preparación, propiedades y aplicaciones**

**José M. Albella**  
**(Editor)**

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS**

# LÁMINAS DELGADAS Y RECUBRIMIENTOS: PREPARACIÓN, PROPIEDADES y APLICACIONES

## ÍNDICE de MATERIAS

### I. GENERALIDADES

#### INTRODUCCIÓN: CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE CAPAS DELGADAS

(J. M. Albella)

1. QUÉ SE ENTIENDE POR ‘CAPA DELGADA’ .....	25
2. LA TECNOLOGÍA DE LOS RECUBRIMIENTOS Y CAPAS DELGADAS EN LOS MODERNOS PROCESOS DE FABRICACIÓN .....	27
2.1 Aplicaciones de los recubrimientos .....	27
2.2 Requerimientos exigidos en el sistema recubrimiento/substrato .....	29
3. TÉCNICAS DE PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CAPAS DELGADAS .....	32
3.1 Deposición de recubrimientos y capas delgadas.....	32
3.2 Criterios de selección de las técnicas de deposición.....	35
3.3 Caracterización estructural de las capas delgadas.....	37
4. OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL LIBRO .....	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41

#### 1. TECNOLOGÍA DE VACÍO (J. L. De Segovia)

1. INTRODUCCIÓN .....	43
2. COMPORTAMIENTO DE LOS GASES A PRESIÓN REDUCIDA .....	44
2.1 Régimen de la circulación o de movimiento de los gases.....	44
2.2 Flujo de gas.....	45
2.3 Conductancia .....	46
2.4 Número de moléculas incidentes sobre una superficie: Tasas de adsorción y desorción de moléculas .....	47
2.5 Clasificación de los sistemas de vacío.....	48
3. DINÁMICA Y COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA DE VACÍO .....	48
3.1 Evacuación de un sistema de vacío.....	50
4. BOMBAS DE VACÍO.....	53
4.1 Bombas de desplazamiento positivo.....	53
4.2 Bombas de captura.....	59

5. MEDIDA DEL VACÍO .....	62
5.1 Manómetro de capacitancia .....	63
5.2 Manómetros de conductividad térmica.....	64
5.3 Manómetros de ionización.....	66
5.4 Analizador de gas residual. Espectrómetro de masas .....	68
6. DETECCIÓN DE FUGAS .....	70
BIBLIOGRAFÍA .....	71

## **2. DESCARGAS ELÉCTRICAS EN GASES: PLASMAS**

**(F. J. Gordillo Vázquez y J. M. Albella)**

1. DESCARGAS ELÉCTRICAS EN GASES: CONCEPTOS BÁSICOS .....	73
1.1 Definición de plasma y algunas de sus características .....	74
1.2 Utilidad de los plasmas en el procesado de materiales.....	79
2. DESCARGAS EN CORRIENTE CONTINUA .....	80
2.1 Plasmas producidos en descargas de corriente continua .....	81
2.2 Zonas luminosas en las descargas de corriente continua entre dos electrodos .....	83
2.3 Ley de Paschen.....	85
2.4 Descargas en arco .....	86
3. PLASMAS PRODUCIDOS EN DESCARGAS DE CORRIENTE ALTERNA .....	87
3.1 Plasmas producidos entre dos electrodos: descargas capacitivas .....	87
3.2 Plasmas producidos por inducción: descargas inductivas de RF.....	89
3.3 Plasmas producidos por microondas .....	90
4. TÉCNICAS DE DIAGNOSIS DEL PLASMA: SONDA DE LANGMUIR .....	91
5. APLICACIÓN DE LOS PLASMAS AL PROCESADO DE MATERIALES .....	94
5.1 Depósito en fase vapor asistido por plasma.....	95
5.2 Ataque por plasma (“plasma etching”).....	96
5.3 Concepto de “plasmatrón” en corriente continua y alterna. Usos industriales .....	97
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	97
BIBLIOGRAFÍA .....	98

## **3. MECANISMOS DE NUCLEACIÓN Y CRECIMIENTO DE CAPAS**

**DELGADAS (J. M. Albella)**

1. INTRODUCCIÓN: ETAPAS EN EL CRECIMIENTO DE CAPAS DELGADAS.....	101
2. LLEGADA Y ACOMODACIÓN DE ÁTOMOS SOBRE LA SUPERFICIE.....	103
3. ADSORCIÓN/ DESORCIÓN SOBRE LA SUPERFICIE DEL SUBSTRATO.....	105
4. DIFUSIÓN SUPERFICIAL (HASTA LA INCORPORACIÓN) .....	107
5. NUCLEACIÓN Y PRIMEROS ESTADIOS DEL CRECIMIENTO DE LA PELÍCULA .....	110
5.1 Mecanismo de nucleación de Volmer-Weber (formación de islas).....	112
5.2 Mecanismo de Frank-van der Merwe (monocapas) .....	118
6. CRECIMIENTO DE CAPAS CONTINUAS: INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL PROCESO .....	119
6.1 Evolución de la microestructura de las capas depositadas (según el modelo MD) .....	120
BIBLIOGRAFÍA .....	123

## II. PREPARACIÓN DE CAPAS DELGADAS

### 4. EVAPORACIÓN TÉRMICA Y OTRAS TÉCNICAS DE EVAPORACIÓN (J. M. Albella)

1. EVAPORACIÓN TÉRMICA EN VACÍO: FUNDAMENTOS .....	127
1.1 Modelo de Hertz-Knudsen para la evaporación en vacío .....	128
1.2 Cálculo del espesor depositado: Efecto de la direccionalidad. ....	131
2. MÉTODOS DE EVAPORACIÓN TÉRMICA .....	133
2.1 Calentamiento resistivo.....	133
2.2 Evaporación mediante bombardeo de electrones.....	134
3. EVAPORACIÓN DE ALEACIONES, MEZCLAS Y COMPUESTOS .....	136
3.1 Evaporación directa .....	136
3.2 Evaporación reactiva.....	137
4. OTROS MÉTODOS DE EVAPORACIÓN .....	139
4.1 Plateado iónico ('ion plating') .....	139
4.2 Evaporación por arco catódico .....	140
4.3 Proyección térmica ('Thermal spraying').....	142
BIBLIOGRAFÍA.....	146

### 5. DEPOSICIÓN MEDIANTE PULVERIZACIÓN CATÓDICA (‘SPUTTERING’) (J. M. Albella)

1. INTRODUCCIÓN: FUNDAMENTOS DE LA TÉCNICA DE PULVERIZACIÓN CATÓDICA O ‘SPUTTERING’ .....	147
2. MECANISMOS BÁSICOS DE 'SPUTTERING' .....	150
2.1 Modelo de colisión entre dos partículas.....	150
2.2 Consideraciones energéticas .....	152
2.3 Rendimiento de sputtering .....	153
3. SPUTTERING DE ALEACIONES Y COMPUESTOS.....	155
4. TÉCNICAS DE SPUTTERING EN CORRIENTE CONTINUA .....	156
4.1 Diodo planar .....	156
4.2 ‘Sputtering’ magnetrón: diferentes configuraciones.....	157
4.3 ‘Sputtering’ magnetrón no-balanceado.....	160
5. SPUTTERING EN CORRIENTE ALTERNA (RF) .....	162
6. SPUTTERING REACTIVO .....	163
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	167
BIBLIOGRAFÍA.....	168

### 6. DEPÓSITO Y MODIFICACIÓN DE CAPAS MEDIANTE HACES DE IONES (I. Jiménez y R. Gago)

1. INTRODUCCIÓN .....	169
2. INTERACCIÓN IÓN-SÓLIDO .....	170
2.1 Procesos inducidos por el bombardeo iónico en superficies.....	170
2.2 Efectos del bombardeo iónico sobre las propiedades de las capas .....	173

3. INSTRUMENTACIÓN.....	174
3.1 Fuentes de iones .....	174
3.2 Diagnóstico del haz de iones .....	178
4. TÉCNICAS DE MODIFICACIÓN Y DEPOSICIÓN .....	179
4.1 Limpieza de muestras y ataque por iones .....	180
4.2 Deposición directa .....	181
4.3 Pulverización por haz de iones .....	181
4.4 Deposición asistida con iones (IBAD) .....	182
4.5 Implantación de iones.....	185
BIBLIOGRAFÍA .....	188

## **7. EPITAXIA POR HACES MOLECULARES (MOLECULAR BEAM EPITAXY), MBE (A. Ruiz y L. González)**

1. INTRODUCCIÓN: CRECIMIENTO EPITAXIAL.....	189
2. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA .....	192
2.1 Definición y fundamentos .....	192
2.2 Configuración general y características básicas de un equipo MBE .....	195
2.3 Condiciones de UHV .....	197
2.4 Elementos de evaporación .....	198
2.5 Manipulador y sistemas de transferencia.....	200
2.6 Técnicas de caracterización más usuales .....	201
3. PROCESO DE CRECIMIENTO.....	203
4. MODIFICACIONES AL PROCESO DE CRECIMIENTO MBE.....	207
4.1 Atomic layer MBE (ALMBE), migration enhanced epitaxy (MEE).....	207
4.2 ‘Gas-source MBE’ (GSMBE), ‘metalorganic MBE’ (MOMBE), ‘chemical beam epitaxy’ (CBE), ‘plasma-assisted’ MBE (PA-MBE).....	209
5. CONCLUSIONES .....	211
BIBLIOGRAFÍA .....	213

## **8. DEPÓSITO POR LÁSER PULSADO (PLD) (C. N. Afonso y J. Gonzalo)**

1. INTRODUCCIÓN .....	215
1.1 Características de la técnica de PLD .....	216
2. ASPECTOS BÁSICOS DE LA TÉCNICA DE PLD.....	220
2.1 Interacción láser-blanco.....	220
2.2 Interacción láser-material eyectado .....	224
2.3 Expansión del plasma .....	225
2.4 Síntesis de láminas delgadas.....	232
3. EJEMPLOS DE MATERIALES PRODUCIDOS POR PLD .....	234
BIBLIOGRAFÍA .....	236

## **9. PREPARACIÓN DE RECUBRIMIENTOS MEDIANTE DEPOSICIÓN QUÍMICA EN FASE VAPOR (CVD) C. Gómez-Aleixandre y S. I. Castañeda)**

1. INTRODUCCIÓN .....	239
2. FUNDAMENTO DE LOS PROCESOS DE CVD .....	241
2.1 Tipos de reacción de CVD .....	242
2.2 Reacciones químicas en CVD.....	242
2.3 Cinética de las reacciones de CVD .....	243
3. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CVD .....	249
3.1 Activación térmica .....	250
3.2 Activación por plasma .....	251
3.3 Activación por fotones.....	253
4. EQUIPOS DE PRODUCCIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE CVD .....	254
5. ALGUNOS EJEMPLOS DE PROCESOS DE CVD.....	256
5.1 Recubrimientos basados en óxido y nitruro de silicio .....	256
5.2 Recubrimientos de nitruro de boro (BN) y compuestos ternarios relacionados (Si-B-N y C-B-N) .....	258
6. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	259
BIBLIOGRAFÍA .....	260

## **10. TÉCNICAS DE CVD ASISTIDAS POR PLASMA (PECVD) Y LÁSER (F. J. Gordillo Vázquez y O. Sánchez Garrido)**

1. INTRODUCCIÓN: ASPECTOS GENERALES .....	263
2. MECANISMOS DE ACTIVACIÓN DEL PLASMA.....	265
2.1 Procesos de ruptura eléctrica: transformación de un gas en un plasma .....	265
2.2 Procesos de colisiones en plasmas: colisiones elásticas e inelásticas .....	265
2.3 Procesos radiativos .....	269
3. PLASMAS PRODUCIDOS EN DESCARGAS DE CORRIENTE ALTERNA .....	270
3.1 Fenómenos producidos en descargas de corriente alterna .....	270
4. TÉCNICAS DE CVD ASISTIDAS POR PLASMA (PECVD) .....	275
4.1 Etapas principales en el proceso de depósito mediante técnicas de PECVD.....	275
4.2 Equipos de CVD asistido por plasma .....	278
4.3 Reactores de PECVD en corriente alterna .....	279
5. TÉCNICAS DE DEPÓSITO ASISTIDAS POR LÁSER (FOTO-CVD o LÁSER-CVD).....	282
5.1 Modos de activación .....	282
5.2 Fuentes ópticas.....	284
6. ALGUNOS EJEMPLOS DE PROCESOS PECVD .....	285
6.1 Películas delgadas de oxinitruros de silicio .....	285
6.2 Recubrimiento de diamante policristalino .....	286
6.3 Ejemplos de materiales crecidos por foto-CVD .....	287
BIBLIOGRAFÍA.....	289

## **11. PREPARACIÓN DE RECUBRIMIENTOS MEDIANTE DEPOSICIÓN QUÍMICA EN FASE LÍQUIDA (I. Montero Herrero)**

1. INTRODUCCIÓN. Crecimiento de películas inorgánicas a partir de la fase líquida .....	291
2. PROCESOS ELECTROQUÍMICOS .....	292
2.1 Celdas o reactores químicos .....	292
2.2 Teoría de la doble capa. Escala absoluta de potenciales .....	295
2.3 Cinética de electrodo .....	299
2.4 Métodos experimentales de estudio de los procesos electroquímicos .....	300
3. MÉTODOS QUÍMICOS Y ELECTROQUÍMICOS DE DEPÓSITO .....	303
3.1 Depósito por reacción química .....	303
3.2 Electrodeposición de metales, aleaciones y semiconductores .....	304
3.3 Comparación de los métodos químicos y electroquímicos de deposición de recubrimientos .....	305
4. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES .....	306
4.1 Pulido electroquímico y químico .....	306
4.2 Recubrimientos de conversión .....	307
4.3 Procesos de oxidación de metales y semiconductores .....	307
4.4 Procesos termoquímicos de cementación, nitruración y carbonitruración del acero .....	311
4.5 La hidruración .....	314
4.6 Tratamientos por ataque químico. Silicio poroso .....	314
5. SIMULACIÓN DE PROCESOS SUPERFICIALES. DINÁMICA MOLECULAR Y MÉTODOS DE MONTECARLO .....	315
BIBLIOGRAFÍA .....	317

## **12. PREPARACIÓN DE RECUBRIMIENTOS POR SOL-GEL (M. Zayat y D. Levy)**

1. INTRODUCCIÓN .....	319
1.1 El proceso "Sol-Gel" .....	320
1.2 Etapas del proceso Sol-Gel .....	321
1.3 Cerámicas modificadas orgánicamente (ormocers) .....	324
1.4 Matrices Sol-Gel dopadas .....	325
1.5 Ventajas fundamentales del proceso Sol-Gel .....	326
1.6 Preparación típica de materiales vía Sol-Gel .....	326
2. PREPARACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS POR SOL-GEL .....	327
2.1 Recubrimientos Sol-Gel .....	327
2.2 Las técnicas de inmersión Dip-Coating (DC) y centrifugado ó Spin-Coating (SC) .....	328
2.3 Otros Parámetros que Afectan a las Técnicas de Deposición .....	331
3. APLICACIONES Y EJEMPLOS MÁS REPRESENTATIVOS .....	331
4. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	334
BIBLIOGRAFÍA .....	334

### III. CARACTERIZACIÓN DE CAPAS DELGADAS

#### 13. MEDIDA DEL ESPESOR Y ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD (L. Vázquez)

1. INTRODUCCIÓN .....	337
2. MÉTODOS DE MEDIDA DE ESPESORES .....	338
2.1 Métodos de pesada.....	338
2.2 Resonador de cuarzo.....	338
2.3 Métodos eléctricos .....	340
2.4 Métodos ópticos.....	341
3. MÉTODOS DE MEDIDA Y ANÁLISIS DE LA RUGOSIDAD .....	347
3.1 Parámetros que describen una superficie.....	348
3.2 Medida de la rugosidad.....	353
3.3 Comparación de las distintas técnicas.....	360
4. APÉNDICE: TEORÍA DEL ESCALADO DINÁMICO.....	361
BIBLIOGRAFÍA.....	363

#### 14. MÉTODOS ÓPTICOS (F. Agulló-Rueda y R. Serna)

1. INTRODUCCIÓN .....	365
1.1 La luz y el espectro electromagnético.....	366
2. INTERACCIÓN DE LA LUZ CON LOS MATERIALES .....	368
2.1 Coeficientes ópticos.....	369
2.2 Dispersión .....	370
2.3 Reflexión y refracción en una intercara plana .....	370
2.4 Absorción.....	372
2.5 Luminiscencia.....	373
2.6 Interferencia.....	373
2.7 Esparcimiento o dispersión.....	374
2.8 El color de los materiales.....	374
3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN ÓPTICA.....	375
3.1 Reflectancia y transmitancia (infrarrojo, visible y ultravioleta) .....	375
3.2 Elipsometría.....	377
3.3 Espectroscopía de fluorescencia .....	381
3.4 Espectroscopía vibracional: infrarrojo y Raman.....	383
BIBLIOGRAFÍA.....	388

#### 15. TÉCNICAS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (C. Prieto y A. de Andrés)

1. INTRODUCCIÓN: ESTRUCTURA MICROSCÓPICA Y PROPIEDADES DE UN MATERIAL .....	389
1.1 Sólidos cristalinos y amorfos.....	390
1.2 Cristales: Redes de Bravais. Vectores de red. Celda unidad. Red recíproca .....	392
2. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (“ALTO ÁNGULO”).....	394
2.1 Difracción de rayos X por una red periódica. Ley de Bragg .....	395

2.2	Factor electrónico, factor de forma atómico y factor de estructura .....	397
2.3	Geometría Bragg-Brentano: Sistemas experimentales para láminas delgadas .....	398
2.4	Geometría de incidencia rasante .....	400
2.5	Identificación de fases cristalográficas. Grado de cristalinidad. Orientación preferencial. Análisis de texturas.....	401
3.	REFLECTIVIDAD DE RAYOS X (“BAJO ANGULO”) .....	405
3.1	Introducción.....	405
3.2	Geometría especular de reflexión de rayos X. Determinación del grosor de una película delgada .....	406
3.3	Geometría no-especular de reflexión de rayos X .....	408
3.4	Aplicación en sistemas multicapa. Determinación de la periodicidad y de la calidad de las interfases.....	411
3.5	Análisis de los datos de sistemas multicapa .....	413
	BIBLIOGRAFÍA .....	415

## **16. ESPECTROSCOPIAS ELECTRÓNICAS (Auger y XPS) (M. Fernández)**

1.	INTRODUCCIÓN .....	417
2.	ESPECTROSCOPIAS DE SUPERFICIE. INSTRUMENTACIÓN .....	418
2.1	Procesos electrónicos básicos .....	418
2.2	Instrumentación: Fuentes de excitación. Analizador.....	420
3.	INFORMACIÓN ESPECTRAL.....	425
3.1	El espectro de electrones secundarios .....	426
3.2	El espectro de fotoelectrones de rayos x. Estructura primaria.....	429
4.	CUANTIFICACIÓN DE ESPECTROS EN AES Y XPS .....	432
4.1	Cálculo de la intensidad. Formalismo básico .....	432
4.2	Perfiles de concentración.....	434
5.	APLICACIONES .....	436
	BIBLIOGRAFÍA .....	440

## **17. ANÁLISIS CON HACES DE IONES: RBS, ERDA, PIXE, NRA Y SIMS (I. Montero Herrero y R. Gago)**

1.	CONCEPTOS GENERALES DE LAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS CON HACES DE IONES.....	441
2.	INSTRUMENTACIÓN PARA EL ANÁLISIS CON HACES DE IONES .....	443
2.1	Aceleradores lineales del haz de iones .....	444
3.	ESPECTROSCOPIA DE RETRODISPERSIÓN RUTHERFORD (RBS) .....	445
3.1	Conceptos generales de la técnica RBS .....	445
3.2	Principios básicos. Expresiones analíticas.....	446
3.3	Interpretación de espectros de RBS. Ejemplos de análisis de películas delgadas .....	449
3.4	Efecto de canalización o “channeling”. Ordenamiento atómico en el sólido. ....	451
4.	RETROCESO ELÁSTICO DE IONES (ERDA) .....	452
4.1	Conceptos generales de la técnica ERDA .....	452
4.2	Expresiones analíticas: Factor cinemático y sección eficaz del proceso .....	452
4.3	Distintas configuraciones experimentales .....	453

5. EMISIÓN DE RAYOS-X INDUCIDA POR EL BOMBARDEO DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS (PIXE).....	456
5.1 Conceptos generales de la técnica PIXE.....	456
5.2 Microanálisis PIXE.....	457
5.3 Cuantificación de los espectros PIXE. Utilización de muestras de referencia .....	459
6. ANÁLISIS MEDIANTE REACCIONES NUCLEARES (NRA) .....	459
6.1 Reacciones nucleares. Resolución de la interacción nuclear .....	459
6.2 Ejemplos de reacciones nucleares.....	461
6.3 Tipos de análisis NRA. Perfiles de concentración.....	461
7. ESPECTROMETRÍA DE MASAS DE IONES SECUNDARIOS (SIMS) .....	463
7.1 Introducción a la técnica SIMS.....	463
7.2 SIMS estático y dinámico .....	464
7.3 Equipo de análisis: analizadores magnéticos y cuadrupolos .....	465
BIBLIOGRAFÍA.....	466

## **18. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN CON RADIACIÓN SINCROTRÓN (I. Jiménez)**

1. INTRODUCCIÓN .....	467
1.1 La radiación sincrotrón .....	467
1.2 Características de la radiación sincrotrón .....	468
2. INSTALACIONES Y EQUIPAMIENTO .....	470
2.1 Aceleradores de partículas .....	470
2.2 Dispositivos de inserción: osciladores y onduladores. ....	472
2.3 Líneas de luz .....	473
3. ASPECTOS DE LA INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA .....	474
3.1 Interacción inelástica fotón-materia: absorción y emisión .....	475
3.2 Aspectos de la interacción elástica radiación-materia: difracción .....	476
4. INTERACCIÓN INELÁSTICA: TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS .....	477
4.1 Absorción de rayos X .....	477
4.2 Fotoemisión .....	484
4.3 Fluorescencia o emisión de rayos X .....	486
4.4 Dicroísmo magnético.....	488
4.5 Técnicas con imagen: espectro-microscopías .....	488
5. INTERACCIÓN ELÁSTICA: TÉCNICAS DE DIFRACCIÓN .....	490
5.1 Técnicas basadas en el alto flujo de fotones .....	490
5.2 Técnicas basadas en la selección de la energía del fotón.....	491
5.3 Técnicas basadas en la estructura de tiempos del haz de rayos X .....	492
5.4 Técnicas basadas en la polarización de la luz.....	492
BIBLIOGRAFÍA.....	492

## **19. LA MICROSCOPIA PARA EL ESTUDIO DE MATERIALES Y LÁMINAS DELGADAS ( J.A. Martín Gago)**

1. INTRODUCCIÓN A LA MICROSCOPIA DE MATERIALES .....	495
2. EL MICROSCOPIO ÓPTICO .....	498

3. MICROSCOPIOS ELECTRÓNICOS .....	500
3.1 El Microscopio electrónico de barrido (SEM).....	501
3.2 Análisis cuantitativo de Rayos X.....	505
3.3 Microscopio de transmisión electrónico (TEM).....	505
3.4 Microscopías con resolución química: Microscopía Auger y de rayos X .....	506
4. MICROSCOPIOS DE CAMPO CERCANO: STM Y AFM .....	507
BIBLIOGRAFÍA .....	513

## **20. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS RECUBRIMIENTOS**

**(J. M. Albella)**

1. INTRODUCCIÓN .....	515
2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	516
2.1 Propiedades elásticas .....	516
2.2 Otras magnitudes elásticas.....	519
3. PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS Y OTRAS MAGNITUDES MECÁNICAS ASOCIADAS A CAPAS DELGADAS .....	520
3.1 Fricción ó rozamiento.....	521
3.2 Desgaste.....	523
3.3 Tensiones residuales .....	525
3.4 Adherencia.....	527
4. MEDIDA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE RECUBRIMIENTOS.....	530
4.1 Modulo elástico y dureza: Técnica de indentación.....	530
4.2 Coeficiente de desgaste y de fricción: Técnica de ‘Punta sobre Disco’ .....	534
4.3 Adhesión y rayado.....	535
4.4 Tensiones residuales .....	537
5. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....	539
BIBLIOGRAFÍA .....	540

## **IV. PROPIEDADES Y APLICACIONES**

### **21. APLICACIONES MECÁNICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS**

**(J. M. Albella)**

1. INTRODUCCIÓN .....	543
2. SELECCIÓN DE MATERIALES.....	545
2.1 Recubrimientos duros.....	547
2.2 Recubrimientos blandos .....	555
3. ESTRUCTURA DE LOS RECUBRIMIENTOS .....	557
4. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS PARA APLICACIONES MECÁNICAS.....	561
5. APLICACIONES TRIBOLÓGICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS .....	565
5.1 Herramientas de corte.....	565

5.2 Prótesis biomédicas.....	567
BIBLIOGRAFÍA.....	569

## **22. APLICACIONES QUÍMICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS: PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN (J. J de Damborenea)**

1. ASPECTOS GENERALES: Importancia de la corrosión y de los métodos de protección.....	571
2. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE CORROSIÓN .....	572
2.1 Nociones de corrosión a alta temperatura.....	572
2.2 Nociones de corrosión electroquímica.....	576
2.3 Formas de corrosión electroquímica y métodos de protección.....	579
3. MÉTODOS DE PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN MEDIANTE CAPAS DELGADAS .....	581
4. IMPLANTACIÓN IÓNICA .....	584
5. TRATAMIENTOS CON LÁSER.....	590
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO .....	594
BIBLIOGRAFÍA.....	596

## **23. APLICACIONES EN MICROELECTRÓNICA Y FOTÓNICA (F. Agulló-Rueda y J. M. Albella)**

1. INTRODUCCIÓN .....	597
2. PROPIEDADES GENERALES DE LOS SEMICONDUCTORES .....	598
2.1 Fenómenos de conducción y modelo de bandas de energía.....	599
2.2 Absorción de luz y luminiscencia .....	600
2.3 Semiconductores dopados.....	601
2.4 Diodos de unión .....	601
2.5 Nanoestructuras .....	603
3. EJEMPLOS DE MATERIALES USADOS EN MICRO- Y OPTO- ELECTRÓNICA .....	604
3.1 Semiconductores.....	604
3.2 Capas aislantes y conductoras.....	605
4. APLICACIONES EN MICROELECTRÓNICA.....	607
4.1 Tecnología planar .....	607
4.2 Fotolitografía .....	608
5. APLICACIONES OPTOELECTRÓNICAS .....	611
5.1 Diodo emisor de luz (LED) .....	611
5.2 Diodos láser .....	612
5.3 Paneles electroluminiscentes .....	614
5.4 Fotodetectores.....	615
5.5 Células solares .....	617
BIBLIOGRAFÍA.....	619

## **24. PROPIEDADES ÓPTICAS DE CAPAS DELGADAS. APLICACIONES (R. Serna y F. Agulló-Rueda)**

1. INTRODUCCIÓN .....	621
1.1 ¿Por qué usamos recubrimientos ópticos en capa delgada?.....	621

1.2	1.2 Materiales para recubrimientos ópticos: características .....	623
2.	2. PROPIEDADES ÓPTICAS DE CAPAS DELGADAS HOMOGÉNEAS Y DE MULTICAPAS.....	624
2.1	2.1 Propiedades ópticas de multicapas. Diseño .....	624
3.	3. APLICACIONES EN COMPONENTES ÓPTICOS .....	626
3.1	3.1 Recubrimientos antirreflectantes .....	626
3.2	3.2 Espejos (reflectores) y divisores de haz .....	627
3.3	3.3 Atenuadores, partidores de haz y polarizadores .....	629
3.4	3.4 Filtros ópticos .....	629
3.5	3.5 Aplicaciones en telecomunicaciones y redes locales.....	635
3.6	3.6 Aplicaciones relacionadas con la conservación de energía, y en elementos de arquitectura y automoción .....	636
3.7	3.7 Efectos medioambientales .....	637
4.	4. RECUBRIMIENTOS ÓPTICOS ACTIVOS .....	638
4.1	4.1 Recubrimientos termocrómicos, fotocromicos y electrocromicos .....	639
4.2	4.2 Los recubrimientos electrocromicos como modelo de recubrimientos activos. Ejemplo de dispositivo .....	640
4.3	4.3 Aplicaciones. Pantallas electrocromicas y ventanas ‘inteligentes’ .....	641
	BIBLIOGRAFÍA .....	642

## **25. APLICACIONES DE LAS LÁMINAS DELGADAS EN ÓPTICA INTEGRADA (C. N. Afonso y J. Solís)**

1.	1. INTRODUCCIÓN .....	643
2.	2. LA GUÍA DIELECTRICA .....	644
3.	3. GUÍAS ACANALADAS.....	648
3.1	3.1 El acoplador en Y .....	649
3.2	3.2 El acoplador direccional .....	650
4.	4. SISTEMAS ACTIVADOS POR MÉTODOS NO-ÓPTICOS .....	650
4.1	4.1 Moduladores acusto-ópticos .....	651
4.2	4.2 Moduladores electro-ópticos .....	652
4.3	4.3 Moduladores en guía de onda.....	653
5.	5. SISTEMAS ACTIVADOS ÓPTICAMENTE.....	654
5.1	5.1 Sistemas ópticos no lineales .....	655
5.2	5.2 Sistemas de ganancia .....	657
6.	6. SISTEMAS MIXTOS.....	659
	BIBLIOGRAFÍA .....	660

## **26. PROPIEDADES Y APLICACIONES MAGNÉTICAS (J. M. González)**

1.	1. INTRODUCCIÓN: DEL MOMENTO MAGNÉTICO A LA HISTÉRESIS .....	661
1.1	1.1 Momentos magnéticos.....	662
1.2	1.2 El orden magnético.....	663
1.3	1.3 Anisotropías magnéticas.....	664
1.4	1.4 La histéresis .....	665
1.5	1.5 Temperaturas finitas y propiedades magnéticas .....	666

2. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE SUPERFICIES E INTERCARAS SENSIBLES AL TAMAÑO .....	667
2.1 Super-paramagnetismo .....	667
2.2 Momentos magnéticos, temperaturas de orden y anisotropías de superficie e intercara ...	668
3. FENOMENOLOGÍA MAGNÉTICA EN PELÍCULAS DELGADAS DE INTERÉS PARA LA TECNOLOGÍA.....	669
4. APLICACIONES DE LAS PELÍCULAS DELGADAS MAGNÉTICAS .....	671
4.1 Transformadores .....	672
4.2 Sensores y actuadores .....	672
4.3 Dispositivos micro-electromecánicos .....	674
4.4 Registro magnético .....	676
4.5 Magneto-electrónica .....	678
5. BIBLIOGRAFÍA .....	680
<b>ÍNDICE DE MATERIAS</b> -----	<b>685</b>