

# Índice de contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| Índice de contenidos   | v         |
| Resumen  | ix        |
| Abstract   | xi        |
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Nano Indentación Sensible en Profundidad (DSNI)                       | 1         |
| 1.1.1. Modelos fundamentales en la mecánica de contacto                    | 3         |
| 1.1.2. Modelos analíticos en el método de DSNI                             | 6         |
| 1.1.3. Antecedentes y perspectivas en el área nanotecnológica              | 12        |
| 1.2. Microscopía de Fuerza Atómica   | 13        |
| 1.2.1. Modo <i>tapping</i> y modo contacto                                 | 15        |
| 1.2.2. Aplicación del modo contacto para nanoindentación                   | 18        |
| 1.3. Objetivos de la tesis   | 23        |
| 1.3.1. Objetivos generales   | 23        |
| 1.3.2. Objetivos específicos   | 24        |
| 1.4. Motivación  | 25        |
| <b>2. Desarrollo de la técnica de DSNI instrumentada por AFM</b>           | <b>27</b> |
| 2.1. Detalles instrumentales básicos                                       | 27        |
| 2.2. Alineación del nanoindentador   | 31        |
| 2.3. Transducción de la respuesta piezoeléctrica                           | 35        |
| 2.3.1. Curvas de calibración y deflexión efectiva                          | 36        |
| 2.3.2. Calibración de la sensibilidad a la deflexión del <i>cantilever</i> | 42        |
| 2.3.3. Estimación de la fuerza mecánica efectiva                           | 46        |
| 2.4. Perfil geométrico del nanoindentador                                  | 47        |
| 2.4.1. Análisis de imágenes de improntas plásticas                         | 48        |

|  |            |
|--|------------|
| 2.4.2. Estimación del perfil de área del nanoindentador . . . . .                              | 50         |
| 2.5. Conclusiones . . . . .  | 56         |
| <b>3. Implementación y validación de la técnica de nanoindentación por AFM</b>                 | <b>59</b>  |
| 3.1. Muestras en estudio . . . . .   | 59         |
| 3.2. Curvas de indentación características . . . . .   | 61         |
| 3.3. Estimación del cociente $S_m^2/P_m$ . . . . .   | 66         |
| 3.4. Estimación de dureza y módulo elástico . . . . .  | 70         |
| 3.5. Conclusiones . . . . .  | 73         |
| <b>4. Análisis de indentación en materiales elasto-plásticos por elementos finitos</b>         | <b>75</b>  |
| 4.1. Introducción . . . . .  | 75         |
| 4.2. Modelado de indentación por elementos finitos . . . . .                                   | 78         |
| 4.2.1. Condiciones de simulación en ABAQUS-CAE . . . . .                                       | 79         |
| 4.2.2. Sistemas elasto-plásticos propuestos . . . . .  | 79         |
| 4.2.3. Refinamiento de malla y condiciones de borde . . . . .                                  | 80         |
| 4.2.4. Estimación de curvas $P(h)$ . . . . .   | 81         |
| 4.3. Resultados y discusión . . . . .  | 82         |
| 4.3.1. Campos de tensión y curvas $P(h)$ . . . . .   | 82         |
| 4.3.2. Análisis de la energía de deformación por indentación . . . . .                         | 84         |
| 4.3.3. Relación entre energía de deformación, dureza y modulo elástico . . . . .               | 87         |
| 4.3.4. Evaluación del comportamiento $H/E_r$ vs. $U_e/U_t$ . . . . .                           | 90         |
| 4.4. Conclusiones . . . . .  | 99         |
| <b>5. Efectos de espesor y microestructura en las propiedades mecánicas de películas de Cu</b> | <b>101</b> |
| 5.1. Introducción . . . . .  | 101        |
| 5.2. Aspectos experimentales . . . . .   | 103        |
| 5.2.1. Depósito de películas delgadas por <i>Sputtering</i> . . . . .                          | 104        |
| 5.2.1.1. Parámetros para el crecimiento de películas de Cu . . . . .                           | 105        |
| 5.2.1.2. Parámetros de los tratamientos térmicos . . . . .                                     | 106        |
| 5.2.2. Mediciones de nanoindentación por AFM . . . . .   | 107        |
| 5.2.3. Caracterización estructural por XRD . . . . .   | 109        |
| 5.3. Resultados y discusión . . . . .  | 111        |

---

|  |            |
|--|------------|
| 5.3.1. Efectos del espesor en la respuesta mecánica . . . . .                        | 111        |
| 5.3.2. Efectos microestructurales en la respuesta mecánica . . . . .                 | 116        |
| 5.4. Conclusiones . . . . .  | 123        |
| <b>6. Efectos de tamaño en el comportamiento electro-mecánico de películas de Cu</b> | <b>125</b> |
| 6.1. Introducción . . . . .  | 125        |
| 6.2. Aspectos experimentales . . . . .   | 127        |
| 6.3. Resultados y discusión . . . . .  | 127        |
| 6.3.1. Efecto del espesor en la disipación de energía por deformación . . . . .      | 127        |
| 6.3.2. Efecto del espesor en la resistividad eléctrica . . . . .                     | 131        |
| 6.3.3. Optimización del comportamiento electro-mecánico . . . . .                    | 133        |
| 6.4. Conclusiones . . . . .  | 135        |
| <b>7. Efectos del confinamiento 3d en la repuesta mecánica de nanodiscos de Ag</b>   | <b>137</b> |
| 7.1. Introducción . . . . .  | 138        |
| 7.2. Detalles experimentales . . . . .   | 139        |
| 7.2.1. Litografía por Interferencia Láser (ILL) . . . . .                            | 140        |
| 7.2.2. Preparación de obleas de silicio para ILL . . . . .                           | 142        |
| 7.2.3. Fabricación de arreglos periódicos de <i>anti-dots</i> por ILL . . . . .      | 142        |
| 7.2.4. Fabricación de nanodiscos de Ag mediante TE . . . . .                         | 144        |
| 7.2.5. Caracterización mecánica de nanodiscos de Ag . . . . .                        | 145        |
| 7.3. Resultados y discusión . . . . .  | 146        |
| 7.3.1. Efectos de sustrato en la resistencia mecánica de películas de Ag . . . . .   | 146        |
| 7.3.2. Análisis por elementos finitos de los efectos del confinamiento 3d . . . . .  | 149        |
| 7.3.2.1. Condiciones de simulación utilizadas en FEA . . . . .                       | 151        |
| 7.3.2.2. Condiciones de borde y estructura de la malla . . . . .                     | 151        |
| 7.3.2.3. Resultados obtenidos mediante elementos finitos . . . . .                   | 152        |
| 7.3.3. Efectos del confinamiento lateral en la respuesta mecánica . . . . .          | 155        |
| 7.4. Conclusiones . . . . .  | 161        |
| <b>8. Conclusiones generales y perspectivas</b>                                      | <b>163</b> |
| <b>Apéndice A: Fabricación de estructuras NPR/ARC/Si para ILL</b>                    | <b>167</b> |

---

|   |     |
|---|-----|
| Apéndice B: Calibración de “X Rotate” por deformación                 | 169 |
| Apéndice C: Calibración de “X Rotate” por análisis de improntas       | 173 |
| Apéndice D: Fabricación de estructuras NPR/ARC/Si para ILL            | 175 |
| Apéndice E: Procedimiento de revelado de arreglos de <i>anti-dots</i> | 177 |
| Apéndice F: Condiciones de depósito para las películas de Ag          | 179 |
| Apéndice G: Propiedades estructurales de las películas de Ag          | 181 |
| Apéndice H: Respuesta mecánica del substrato de Si (100)              | 183 |
| Bibliografía  | 185 |
| Publicaciones relacionadas al trabajo de doctorado                    | 205 |
| Publicaciones no relacionadas al trabajo de doctorado                 | 207 |
| Agradecimientos   | 209 |