

# Índice general

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>I</b>  | <b>Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>1.</b> | <b>Definición y breve historia de los MEMS</b>                                     | <b>3</b>  |
| 1.1.      | Aplicaciones y mercados . . . . .  | 9         |
| 1.2.      | Publicaciones periódicas, conferencias y sitios electrónicos . . . . .             | 13        |
| <b>2.</b> | <b>Tecnología para la fabricación de MEMS</b>                                      | <b>17</b> |
| 2.1.      | Materiales para la fabricación de MEMS . . . . .                                   | 17        |
| 2.1.1.    | Enlaces interatómicos . . . . .  | 17        |
| 2.1.2.    | Estructura de los materiales . . . . .   | 18        |
| 2.2.      | Diseño de Mems asistido por computadora . . . . .                                  | 18        |
| 2.2.1.    | Programas de diseño y simulación . . . . .   | 20        |
| 2.2.2.    | Creación de máscaras para la fabricación de MEMS . . . . .                         | 48        |
| <b>II</b> | <b>Principios físicos del funcionamiento de los Sistemas Microelectromecánicos</b> | <b>65</b> |
| <b>3.</b> | <b>Teoría de elasticidad</b>   | <b>67</b> |
| 3.1.      | Esfuerzo y deformación unitaria . . . . .  | 67        |
| 3.1.1.    | Esfuerzo . . . . .   | 67        |
| 3.1.2.    | Deformación unitaria . . . . .   | 69        |
| 3.1.3.    | Ley de Hooke . . . . .   | 73        |
| 3.1.4.    | Relaciones generales entre esfuerzo y deformación unitaria . . . . .               | 74        |
| 3.2.      | Esfuerzo y deformación unitaria en vigas . . . . .                                 | 77        |
| 3.2.1.    | Esfuerzo y deformación en una viga flexionada . . . . .                            | 77        |
| 3.2.2.    | Momento de flexión y momento de inercia . . . . .                                  | 79        |
| 3.2.3.    | Desplazamiento de vigas bajo peso . . . . .  | 82        |
| 3.2.4.    | Flexión por deformación residual de vigas compuestas . . . . .                     | 89        |
| 3.2.5.    | Desplazamiento angular de vigas sujetas a torsión . . . . .                        | 94        |
| 3.3.      | Método de la energía para el análisis de la frecuencia de oscilación . . . . .     | 97        |
| 3.3.1.    | Sistema masa-resorte . . . . .   | 97        |
| 3.3.2.    | Método de Rayleigh-Ritz . . . . .  | 100       |
| 3.3.3.    | Frecuencias de oscilación de una viga . . . . .                                    | 103       |
| 3.4.      | Modos de oscilación y flexión de una viga . . . . .                                | 107       |
| 3.4.1.    | Ecuación diferencial para la oscilación libre de una viga . . . . .                | 107       |
| 3.4.2.    | Frecuencias de oscilación de una viga doblemente anclada . . . . .                 | 109       |
| 3.4.3.    | Oscilación bajo la acción de una fuerza axial . . . . .                            | 112       |
| 3.4.4.    | Flexión de una viga doblemente anclada . . . . .                                   | 115       |
| 3.5.      | Vibraciones forzadas y amortiguadas . . . . .                                      | 118       |
| 3.5.1.    | Fuerza de amortiguamiento . . . . .  | 118       |
| 3.5.2.    | Vibraciones con amortiguamiento . . . . .  | 119       |
| 3.5.3.    | Oscilación provocada por una fuerza . . . . .                                      | 123       |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.5.4.    | Resonancia y factor de calidad . . . . .  | 126        |
| 3.5.5.    | Oscilación provocada por una vibración . . . . .  | 129        |
| <b>4.</b> | <b>Amortiguamiento por efecto del aire</b>  | <b>133</b> |
| 4.1.      | Efecto de arrastre de un fluido . . . . .   | 133        |
| 4.1.1.    | Viscosidad de un fluido . . . . .   | 133        |
| 4.1.2.    | Flujo viscoso de un fluido . . . . .  | 136        |
| 4.1.3.    | Amortiguamiento por la fuerza de arrastre . . . . .   | 140        |
| 4.1.4.    | Efectos del amortiguamiento debido al aire sobre la dinámica de los Microsistemas . . . . .                           | 141        |
| 4.2.      | Amortiguamiento por compresión de una película de aire . . . . .  | 142        |
| 4.2.1.    | Ecuación de Reynolds para amortiguamiento por presión sobre una película de aire . . . . .                            | 142        |
| 4.2.2.    | Placa rectangular larga . . . . .   | 147        |
| 4.2.3.    | Placa rectangular . . . . .   | 148        |
| 4.2.4.    | Placas circulares y anillos . . . . .   | 152        |
| 4.2.5.    | Placa perforada, infinita y muy delgada . . . . .   | 155        |
| 4.2.6.    | Amortiguamiento en vigas con movimiento oscilatorio . . . . .   | 157        |
| 4.2.7.    | Efectos de un coeficiente de presión pequeño . . . . .  | 161        |
| 4.3.      | Amortiguamiento de placas gruesas perforadas . . . . .  | 163        |
| 4.3.1.    | Ecuación modificada de Reynolds para placas perforadas . . . . .  | 163        |
| 4.3.2.    | Placa perforada larga y rectangular . . . . .   | 165        |
| 4.3.3.    | Aproximación del área efectiva de amortiguamiento . . . . .   | 168        |
| 4.4.      | Amortiguamiento por deslizamiento de superficies sobre una película de aire . . . . .                                 | 169        |
| 4.4.1.    | Ecuaciones básicas para el amortiguamiento por deslizamiento de superficies sobre una película de aire . . . . .      | 169        |
| 4.4.2.    | Modelo del flujo de Couette . . . . .   | 172        |
| 4.4.3.    | Modelo del flujo de Stokes . . . . .  | 174        |
| 4.4.4.    | Amortiguamiento por efecto del aire para un resonador con actuador electrostático lateral en forma de peine . . . . . | 176        |
| 4.5.      | Amortiguamiento en aire enrarecido . . . . .  | 178        |
| 4.5.1.    | Viscosidad efectiva del aire enrarecido . . . . .   | 178        |
| 4.5.2.    | Modelo de Christian para amortiguamiento provocado por aire enrarecido . . . . .                                      | 180        |
| 4.5.3.    | Modelo de transferencia de energía para amortiguamiento por presión sobre una película de aire . . . . .              | 182        |
| 4.5.4.    | Amortiguamiento en alto vacío . . . . .   | 188        |
| <b>5.</b> | <b>Actuación electrostática</b>   | <b>191</b> |
| 5.1.      | Fuerzas electrostáticas . . . . .   | 191        |
| 5.1.1.    | Fuerza normal . . . . .   | 191        |
| 5.1.2.    | Fuerza tangencial . . . . .   | 192        |
| 5.1.3.    | Efectos en los bordes . . . . .   | 193        |
| 5.2.      | Actuadores mecánicos impulsados por fuerzas electrostáticas . . . . .   | 195        |
| 5.2.1.    | Actuador de placas paralelas . . . . .  | 195        |
| 5.2.2.    | Actuador electrostático sujeto con vigas de torsión . . . . .   | 200        |
| 5.2.3.    | Actuador electrostático lateral en forma de peine . . . . .   | 204        |
| 5.3.      | Voltaje alterno y escalones aplicados a los actuadores electrostáticos . . . . .                                      | 206        |
| 5.3.1.    | Voltaje alterno . . . . .   | 206        |
| 5.3.2.    | Efecto de resorte negativo y frecuencia de vibración . . . . .  | 210        |
| 5.3.3.    | Actuación mediante voltaje de tipo alterno . . . . .  | 212        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>6. Registro de variaciones en sensores capacitivos</b>   | <b>215</b> |
| 6.1. Esquemas de medición de variaciones en la capacitancia . . . . .                             | 215        |
| 6.1.1. Mediciones a través de un voltaje directo de polarización . . . . .                        | 219        |
| 6.1.2. Medición mediante arreglos de diodos . . . . .   | 222        |
| 6.1.3. Medición mediante doble excitación . . . . .   | 225        |
| 6.1.4. Medición mediante balance de fuerzas electrostáticas . . . . .                             | 227        |
| 6.1.5. Medición mediante conmutación de capacitores . . . . .                                     | 230        |
| 6.1.6. Medición de la frecuencia . . . . .  | 232        |
| 6.2. Efectos de la excitación eléctrica en sistemas que reciben una aceleración cte. . . . .      | 234        |
| 6.2.1. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor simple . . . . .                        | 234        |
| 6.2.2. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor doble . . . . .                         | 238        |
| 6.2.3. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor configurado para el balanceo de fuerzas | 241        |
| 6.3. Efectos de la excitación en sistemas que reciben acel. con forma de escalón . . . . .        | 245        |
| 6.3.1. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor simple . . . . .                        | 245        |
| 6.3.2. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor doble . . . . .                         | 248        |
| 6.3.3. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor configurado para el balanceo de fuerzas | 249        |
| 6.4. Efectos de la excitación en sistemas que reciben una acel. con forma de pulso . . . . .      | 251        |
| 6.4.1. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor simple . . . . .                        | 251        |
| 6.4.2. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor doble . . . . .                         | 252        |
| 6.4.3. Efectos de la excitación eléctrica en un capacitor configurado para el balanceo de fuerzas | 253        |
| <br>  |            |
| <b>III Diseño de sensores inerciales micromaquinados</b>  | <b>255</b> |
| <br>  |            |
| <b>7. Antecedentes</b>  | <b>257</b> |
| 7.1. Sensores inerciales . . . . .  | 257        |
| 7.2. Aplicaciones . . . . .   | 262        |
| <br>  |            |
| <b>8. Conceptos básicos de los acelerómetros</b>  | <b>267</b> |
| 8.1. Descripción general . . . . .  | 267        |
| 8.2. Configuración geométrica de un acelerómetro micromaquinado . . . . .                         | 270        |
| 8.2.1. Masa móvil . . . . .   | 270        |
| 8.2.2. Suspensión . . . . .   | 271        |
| 8.2.3. Amortiguador . . . . .   | 284        |
| 8.2.4. Transductor mecánico-eléctrico . . . . .   | 287        |
| 8.2.5. Factor de calidad . . . . .  | 288        |
| <br>  |            |
| <b>9. Diseño de un acelerómetro micromaquinado en el proceso PolyMumps</b>                        | <b>289</b> |
| 9.1. Propuesta de los parámetros de diseño . . . . .  | 289        |
| 9.2. Simulación mediante ecuaciones diferenciales de parámetros concentrados . . . . .            | 309        |
| 9.2.1. Acelerómetro de 600 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 318        |
| 9.2.2. Acelerómetro de 600 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . .            | 322        |
| 9.2.3. Acelerómetro de 960 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 327        |
| 9.2.4. Acelerómetro de 960 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . .            | 331        |
| 9.2.5. Acelerómetro de 1200 x 360 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 336        |
| 9.2.6. Acelerómetro de 1200 x 360 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . .            | 340        |
| 9.2.7. Acelerómetro de 1200 x 480 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 345        |
| 9.2.8. Acelerómetro de 1200 x 480 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . .            | 349        |
| 9.3. Máscara final . . . . .  | 354        |
| 9.3.1. Acelerómetro de 600 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 359        |
| 9.3.2. Acelerómetro de 600 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . .            | 360        |
| 9.3.3. Acelerómetro de 960 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 361        |
| 9.3.4. Acelerómetro de 960 x 1200 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . .            | 362        |
| 9.3.5. Acelerómetro de 1200 x 360 [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . .            | 362        |

|   |            |
|---|------------|
| 9.3.6. Acelerómetro de $1200 \times 360$ [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . . | 363        |
| 9.3.7. Acelerómetro de $1200 \times 480$ [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión de caja . . . . . | 363        |
| 9.3.8. Acelerómetro de $1200 \times 480$ [ $\mu\text{m}^2$ ] con suspensión sagital . . . . . | 364        |
| 9.3.9. Verificación general automática de las reglas de diseño y aproximación de la geometría | 364        |
| 9.3.10. Formación del dado final . . . . .  | 364        |
| 9.4. Conclusiones y trabajo futuro . . . . .  | 365        |
| <b>A. Apéndice 1. Constantes físicas.</b>   | <b>369</b> |
| <b>B. Bibliografía</b>  | <b>371</b> |

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. La Ley de Moore expresa el incremento de la densidad de transistores por unidad de superficie en la fabricación microelectrónica a lo largo de los últimos 45 años. . . . .  | 7  |
| 2.1. Configuración general de un acelerómetro micromaquinado. . . . .   | 22 |
| 2.2. Modelo en Simulink del dispositivo mecánico de registro del acelerómetro micromaquinado, el cual es un sistema masa-resorte-amortiguador. . . . .  | 22 |
| 2.3. Modelo en Simulink del acelerómetro completo. El modelo incluye la dinámica del sistema masa-resorte-amortiguador, el bloque de conversión de desplazamiento a capacitancia y el arreglo de realimentación. . . . .  | 23 |
| 2.4. Modelo a nivel de sistema en Orcad PSpice de un acelerómetro micromaquinado con un controlador PID en lazo cerrado. . . . .  | 25 |
| 2.5. L-Edit es el editor de máscaras de Mems Pro de la empresa gala MemsCap. . . . .  | 26 |
| 2.6. Modelo tridimensional de un motor electrostático diseñado en MEMSPro. . . . .  | 26 |
| 2.7. Simulación en T-Spice de la respuesta en el tiempo de un acelerómetro micromaquinado. . . . .  | 27 |
| 2.8. Diseño geométrico de un motor electrostático exportado hacia Ansys desde MemsPro para su simulación. . . . .   | 28 |
| 2.9. Diagrama de un acelerómetro con vigas voladas como resortes, masa móvil y sensores capacitivos capturado en S-Edit. . . . .  | 28 |
| 2.10. Flujo de diseño en MemsPro. . . . .   | 29 |
| 2.11. El diseño de las máscaras bidimensionales y la definición de los pasos del proceso de fabricación en Designer es la base del trabajo en CoventorWare. . . . .   | 31 |
| 2.12. Modelado de un microacelerómetro en CoventorWare. A la izquierda, modelo a nivel de sistema en Architect. A la derecha, modelo geométrico tridimensional en Designer. . . . .   | 32 |
| 2.13. Particionamiento (mallado) de una placa suspendida correspondiente a un capacitor variable para RF en Analyzer de CoventorWare. . . . .   | 32 |
| 2.14. Análisis del desplazamiento en un microinterruptor electrostático en Analyzer de CoventorWare. . . . .  | 33 |
| 2.15. CoventorWare puede simular Sistemas Microoptoelectromecánicos (MOEMS) como un microespejo. . . . .  | 33 |
| 2.16. Máscara creada con IntelliMask de IntelliSuite. . . . .   | 34 |
| 2.17. De la máscara al modelo tridimensional al mallado para la simulación multifísica. . . . .   | 35 |
| 2.18. Modelado tridimensional y mallado de un acelerómetro en IntelliFab de Intellisuite. . . . .   | 35 |
| 2.19. Simulación electromecánica de un sensor de presión piezoresistivo en IntelliSuite. . . . .  | 36 |
| 2.20. Modelado del fluido dentro de una boquilla de tinta con IntelliSuite. . . . .   | 37 |
| 2.21. Simulación con AnisE del micromaquinado en volumen de un acelerómetro fabricado en una oblea tipo [100]. . . . .  | 38 |
| 2.22. Procedimiento típico en Ansys Multiphysics. . . . .   | 39 |
| 2.23. Actuador electrotérmico conocido como HotArm. Al circular una corriente eléctrica entre los dos cojinetes se disipa energía en forma de calor (efecto Joule) lo que incrementa la temperatura del material y lo deforma. El efecto obtenido es un cabeceo hacia la izquierda. . . . . | 40 |
| 2.24. Imagen de un actuador electrotérmico fabricado en el proceso PolyMumps (Simon Fraser University, 2003). El actuador tiene una longitud de 200 $\mu\text{m}$ y es capaz de alcanzar un desplazamiento máximo de 10 $\mu\text{m}$ . . . . .   | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 2.25. Mallado de la placa y de las vigas de torsión del microespejo. La placa funciona como electrodo y superficie reflejante giratoria del dispositivo. . . . .  | 42 |
| 2.26. Mallado de la placa del microespejo, del sustrato y de la masa de aire que rodea al Microsistema. . . . .   | 42 |
| 2.27. Visualización de los contornos de voltaje para el microespejo gracias a las herramientas de post-procesamiento que Ansys proporciona a los diseñadores. . . . .   | 42 |
| 2.28. Visualización de la rotación y aproximación entre placas del Sistema Microelectromecánico. . . . .  | 43 |
| 2.29. Visualización con Ansys de los esfuerzos en las vigas de torsión del microespejo. . . . .   | 43 |
| 2.30. Estructura modular de ComSol Multiphysics. Entre los módulos que ofrece se encuentra uno especialmente orientado al modelado y simulación de Sistemas Microelectromecánicos; además, ComSol Multiphysics puede intercambiar información con Matlab y Simulink en formatos nativos. . . . .  | 44 |
| 2.31. Resultado de la simulación del actuador electrostático con forma de peine. La imagen muestra desplazamiento e intensidad de campo eléctrico. . . . .  | 45 |
| 2.32. Visualización tridimensional del desplazamiento del giroscopio afectado por el amortiguamiento debido a la compresión del aire atrapado entre el sustrato y la masa suspendida. . . . .   | 45 |
| 2.33. Diagrama que representa las distintas etapas necesarias para la simulación de Microsistemas con Algor. . . . .  | 47 |
| 2.34. Visualización de esfuerzos obtenida mediante la simulación electromecánica de una microbomba piezoeléctrica usada en aplicaciones biomédicas tales como: la creación de dosificadores automáticos de medicamentos para pacientes con diabetes o bajo tratamiento de quimioterapia. . . . .  | 47 |
| 2.35. Análisis de las fuerzas electrostáticas generadas cuando se aplica un voltaje al actuador electrostático de peine con forma radial. . . . .   | 48 |
| 2.36. Capacitor variable simulado con Abaqus. En la gráfica se visualiza el desplazamiento de la placa y de las vigas que la sostienen con lo cual varía la capacitancia del dispositivo. Los varactores son parte de los Sistemas Microelectromecánicos para Radio Frecuencia. Sus aplicaciones más comunes están en los controladores de frecuencia y los generadores de armónicos. . . . . | 49 |
| 2.37. Interruptor micromaquinado simulado con Abaqus. En la imagen se aprecia el desplazamiento de la viga volado que cierra el circuito entre los dos cojinetes inferiores. La viga volada se flexiona por efecto de la fuerza electrostática presente entre ella y el cojinete inferior más grande. . . . .   | 49 |
| 2.38. Ciclo del proceso de micromaquinado de superficie. . . . .  | 50 |
| 2.39. Ejemplo de aproximación mediante un polígono cerrado frente a la entidad geométrica original. . . . .   | 51 |
| 2.40. Pantalla del ambiente de diseño MemsPro. La barra de herramientas del proceso se encuentra en el costado izquierdo de la pantalla. El proceso que muestra es PolyMumps de la empresa MemsCap. . . . .   | 51 |
| 2.41. Capas de material estructural y de sacrificio del proceso de fabricación de Sistemas Microelectromecánicos PolyMumps. También se muestra el trabajo de socavado realizado sobre la primera capa de sacrificio (primer óxido) llamado Dimples (postes). . . . .  | 52 |
| 2.42. La periferia de la masa y los agujeros de liberación son descritos por una secuencia continua de segmentos de línea para formar polígonos cerrados en una sola capa. . . . .  | 55 |
| 2.43. La masa es dibujada en una capa y los agujeros en otra, así, la descripción se logra en dos capas separadas. . . . .  | 55 |
| 2.44. Cortes seccionales de varios Sistemas Microelectromecánicos: a) actuador electrotérmico, b) resonador, c) placa levadiza y d) capacitor variable. . . . .   | 56 |
| 2.45. Simulación de capas de polisilicio ancladas entre sí. . . . .   | 57 |
| 2.46. Visualización del corte seccional de un poste creado en MemsPro. Intencionalmente se violan las reglas de diseño para compactar el perfil del poste. . . . .  | 57 |
| 2.47. Cojinete de contacto. Elemento indispensable en el diseño de Sistemas Microelectromecánicos para ingresar y extraer señales eléctricas mediante puntas de prueba o conductores soldados. . . . .  | 58 |
| 2.48. Anillo rotacional. Elemento básico para la creación de engranes, motores electrostáticos, levas y palancas. . . . .   | 59 |
| 2.49. Viga volada. Elemento básico para la creación de resortes, masas suspendidas, actuadores electrotérmicos, actuadores electrostáticos y microinterruptores, entre otros. . . . .   | 60 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.50. Bisagra. Elemento que permite a una placa de polisilicio girar alrededor de un eje paralelo a la placa de sustrato. . . . .   | 61  |
| 2.51. Revisión automática de las reglas de diseño sobre una máscara creada con L-Edit. La ventana de revisión de errores señala cada una de las violaciones y conduce al diseñador hasta la sección de la máscara en dónde se encuentra la falla. . . . . | 63  |
| 2.52. Conjunto de celdas estándar en PolyMumps: a) actuador electrostático rotacional en forma de peine, b) suspensión en forma de cangrejo, c) actuador electrostático lineal y d) motor electrostático. . . . .   | 64  |
| 2.53. Motor electrostático hecho completamente a partir de celdas estándar disponibles en MemsPro. . . . .  | 64  |
|   |     |
| 3.1. Componentes del tensor de esfuerzos. . . . .   | 68  |
| 3.2. Deformación de un material unidimensional. . . . .   | 69  |
| 3.3. Deformación en un material tridimensional. . . . .   | 70  |
| 3.4. Deformación angular debido a esfuerzos cortantes. . . . .  | 72  |
| 3.5. Un elemento con forma de paralelepipedo sometido a un esfuerzo normal. . . . .   | 73  |
| 3.6. Sección elemental de una viga. . . . .   | 77  |
| 3.7. Combadado de una viga bajo la acción de un momento de flexión. . . . .   | 78  |
| 3.8. Las fuerzas provocan un momento de flexión. . . . .  | 80  |
| 3.9. Corte seccional de una viga trapezoidal. . . . .   | 81  |
| 3.10. Viga volada con carga concentrada en un extremo. . . . .  | 83  |
| 3.11. Viga volada con carga distribuida. . . . .  | 84  |
| 3.12. Viga doblemente anclada (puente) y sus características. . . . .   | 86  |
| 3.13. El dibujo esquemático de una estructura formada por dos vigas voladas sosteniendo una masa. . . . .   | 87  |
| 3.14. Flexión del par de vigas voladas que sostienen una masa por efecto del peso. . . . .  | 87  |
| 3.15. Distribución del esfuerzo sobre la superficie de la viga. . . . .   | 88  |
| 3.16. Viga compuesta por dos capas: óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y silicio (Si). . . . .   | 90  |
| 3.17. Viga compuesta por $n$ capas. . . . .   | 93  |
| 3.18. Sección transversal de la barra de torsión rectangular. . . . .   | 96  |
| 3.19. Microestructura con barras de torsión. A la izquierda una perspectiva del dispositivo. A la derecha una vista seccional. . . . .  | 96  |
| 3.20. Modelo masa-resorte. . . . .  | 98  |
| 3.21. Análisis de la energía potencial en una viga. . . . .   | 101 |
| 3.22. Función de forma aproximada para el primer modo superior de vibración. . . . .  | 107 |
| 3.23. Fuerzas y momentos actuando sobre la sección de una viga en movimiento oscilatorio. . . . .   | 108 |
| 3.24. Fuerzas y momentos actuando sobre la sección de una viga bajo la acción de una fuerza axial. . . . .  | 112 |
| 3.25. Flexión (combadado) de una viga doblemente anclada. . . . .   | 115 |
| 3.26. Modelo simplificado de un sistema oscilatorio con amortiguamiento. . . . .  | 119 |
| 3.27. Grafica con las atenuaciones de amplitud de oscilación en sistemas con diferentes coeficientes de amortiguamiento. . . . .  | 121 |
| 3.28. Respuesta a una fuerza con forma de escalón para diferentes coeficientes de amortiguamiento. . . . .  | 123 |
| 3.29. Relaciones entre la amplitud y la frecuencia para diferentes coeficientes de amortiguamiento. . . . .   | 125 |
| 3.30. Corrimiento de fase de vibraciones forzadas para diferentes coeficientes de amortiguamiento. . . . .  | 126 |
| 3.31. Oscilación inducida por una vibración mecánica. . . . .   | 130 |
|   |     |
| 4.1. Mecanismo de viscosidad en líquidos. . . . .   | 134 |
| 4.2. Mecanismo de viscosidad en un gas. . . . .   | 134 |
| 4.3. Esfuerzos cortantes sobre la superficie de un elemento cúbico en un líquido. . . . .   | 136 |
| 4.4. Flujo de un fluido en una tubería muy larga. . . . .   | 137 |
| 4.5. Presión ejercida por un movimiento de compresión sobre el aire contenido entre dos placas. . . . .   | 142 |
| 4.6. Flujo de masa dentro y fuera de un elemento unitario. (a) una columna elemental, (b) las tasas de flujo. . . . .   | 143 |
| 4.7. Compresión de un gas debida a la acción de un pistón. . . . .  | 146 |
| 4.8. Amortiguamiento debido a la compresión del aire por una placa rectangular. . . . .   | 147 |
| 4.9. Distribución de la presión bajo una larga placa rectangular. . . . .   | 148 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.10. Placa rectangular con dimensiones de ancho y largo comparables. . . . .   | 149 |
| 4.11. Dependencia del factor $\beta$ respecto de la relación dimensional B/L. . . . .   | 152 |
| 4.12. Placa circular. (a) vista superior y sistema de referencia polar y (b) vista de la sección transversal. . . . .   | 153 |
| 4.13. Placa anular. (a) vista superior y sistema de referencia polar y (b) vista de la sección transversal. . . . .   | 154 |
| 4.14. Dibujo esquemático de las perforaciones sobre una placa delgada. (a) arreglo cuadrangular y (b) arreglo hexagonal. . . . .  | 155 |
| 4.15. La dependencia del factor $k$ respecto de $\beta$ . . . . .   | 157 |
| 4.16. Modelo de una cadena de discos para el amortiguamiento por efecto del aire en una viga (vista superior). . . . .  | 159 |
| 4.17. Esquema de la estructura de una placa perforada. (a) vista superior y (b) vista de la sección transversal. . . . .  | 164 |
| 4.18. Geometría de una larga placa rectangular perforada ( $b \gg a$ ). En la figura no se muestran los agujeros. . . . .   | 166 |
| 4.19. Dependencia de la distribución normalizada de presión respecto de $a/l$ . . . . .   | 167 |
| 4.20. Distribución de la presión (normalizada) para una placa rectangular cuyo ancho, $a$ , es diez veces mayor que la longitud de atenuación: $l$ . . . . .  | 168 |
| 4.21. Aproximación de la distribución de la presión para una placa rectangular con $a$ diez veces mayor que $l$ . . . . .   | 169 |
| 4.22. Amortiguamiento por deslizamiento sobre una delgada película de aire. (a) esquema de la estructura y (b) modelo simplificado. . . . .   | 170 |
| 4.23. Decaimiento efectivo de la distancia, $\delta$ , como función de la frecuencia. . . . .   | 172 |
| 4.24. Placa que oscila lateralmente sobre el sustrato. . . . .  | 173 |
| 4.25. Esquema de un resonador basado en un actuador electrostático en forma de peine. . . . .   | 176 |
| 4.26. Colisiones frontales de la placa oscilante con las moléculas de gas. . . . .  | 180 |
| 4.27. La velocidades de la placa y de una molécula. (a) antes de una colisión y (b) después de una colisión. . . . .  | 183 |
| 4.28. Compresión de aire en un ambiente de baja presión (enrarecimiento de gases). . . . .  | 185 |
| 4.29. Dependencia del factor de calidad de la presión del aire. . . . .   | 188 |
| 6.1. Ejemplos de actuadores de placas paralelas. (a) Microrresonador con peine electrostático para movimiento lateral (consignado en <i>The MEMS Handbook: design and fabrication</i> , editado por Mohamed Gad-el-Hak, CRC Press, 2006). (b) Giroscopio con actuadores de placas paralelas dispuestos en pila vertical (consignado en <i>Robust Micromachined Vibratory Giroscopes</i> , Cenk Acar, University of California, 2004). (c) Scanner bidimensional con peines electrostáticos verticales (consignado en <a href="http://www.stanford.edu/~wibool/research.html">http://www.stanford.edu/~wibool/research.html</a> , 2009). (d) Micromotor electrostático (consignado en <i>Comprehensive Microsystems</i> editado por Yogesh B. Gianchandani, Elsevier, 2008). . . . .   | 216 |
| 6.2. Acelerómetro basado en un sistema masa-resorte con sensores capacitivos del tipo diferencial. . . . .  | 217 |
| 6.3. Ejemplos de sensores capacitivos de placas paralelas. (a) Parte de un acelerómetro diseñado por la empresa Freescale en el que se muestra un sensor capacitivo diferencial (consignado en <i>The MEMS Handbook, Applications</i> , editado por Mohamed Gad-el-Hak, CRC Press, 2006). (b) Parte de un giroscopio vibratorio en el que se aprecia el uso de sensores capacitivos de placas paralelas para registrar el movimiento de una masa de prueba (consignado en <i>Robust Micromachined Vibratory Giroscopes</i> , Cenk Acar, University of California, 2004). (c) Vista superior de un arreglo de cinco sensores de presión basados en diafragmas con un capacitor de referencia al centro (consignado en <i>Comprehensive Microsystems</i> , editado por Yogesh B. Gianchandani, Elsevier, 2008). (d) Giroscopio vibratorio con electrodos de actuación, registro y control (consignado en <i>Comprehensive Microsystems</i> , editado por Yogesh B. Gianchandani, Elsevier, 2008). . . . . | 218 |
| 6.4. Esquema de medición de variaciones de capacitancia a través de un voltaje directo de polarización. . . . .   | 219 |
| 6.5. Sensor de presión basado en placas paralelas. . . . .  | 220 |
| 6.6. Circuito basado en diodos rectificadores (puente de Wheatstone) para el registro de variaciones en la capacitancia. . . . .  | 222 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.7. Puente de Wheatstone para registrar cambios en un capacitor variable diferencial. . . . .  | 224 |
| 6.8. Puente de Wheatstone con carga externa. . . . .  | 224 |
| 6.9. Circuito para el registro de variaciones en la capacitancia mediante la aplicación de dos señales sinusoidales. . . . .  | 226 |
| 6.10. Circuito para el registro de variaciones en la capacitancia mediante la aplicación de dos señales sinusoidales y realimentación. . . . .  | 227 |
| 6.11. Técnica para registro de variaciones en la capacitancia y balance de fuerzas electrostáticas presentes en el sensor. . . . .  | 228 |
| 6.12. Diagrama del circuito para el registro de variaciones en la capacitancia a través de conmutación de capacitores. . . . .  | 230 |
| 6.13. Diagrama del circuito de conmutación de capacitores para registrar variaciones en un capacitor variable diferencial. . . . .  | 231 |
| 6.14. Diagrama de un puente autobalanceado para medir un capacitor variable diferencial. . . . .  | 232 |
| 6.15. Diagrama con un oscilador de Schmitt para medir cambios en la frecuencia de oscilación de un circuito. . . . .  | 233 |
| 6.16. Variante en el uso de un oscilador de Schmitt para el registro de cambios en la frecuencia de oscilación de un circuito. . . . .  | 234 |
| 6.17. Esquema con la estructura de un dispositivo capacitivo simple. . . . .  | 235 |
| 6.18. Gráfica de aceleración ( $q$ ) en función del desplazamiento relativo ( $x/d$ ) para distintos valores de voltaje ( $p$ ) en un capacitor simple. . . . .                           | 237 |
| 6.19. Esquema con la estructura de un dispositivo capacitivo diferencial (doble capacitor). . . . .   | 238 |
| 6.20. Gráfica de aceleración ( $q$ ) en función del desplazamiento relativo ( $x/d$ ) para distintos valores de voltaje ( $p$ ) en un capacitor diferencial (doble). . . . .              | 239 |
| 6.21. Gráfica de la relación entre la aceleración máxima ( $f$ ) y voltaje ( $p$ ) para las configuraciones de capacitor simple y doble. . . . .  | 240 |
| 6.22. Versión simplificada de la estructura de un sensor capacitivo realimentado para lograr el balanceo de fuerzas eléctricas. . . . .   | 241 |
| 6.23. Gráfica de la relación aceleración ( $f$ ) en función del desplazamiento relativo ( $x/d$ ) para distintos valores de voltaje de realimentación ( $\beta$ ). . . . .                | 243 |
| 6.24. Gráfica de la relación aceleración ( $f$ ) en función del desplazamiento relativo ( $x/d$ ) para distintos valores de voltaje de realimentación ( $\beta$ ). . . . .                | 244 |
| 6.25. Esquema de la estructura básica de un sensor capacitivo simple sometido a una aceleración con forma de escalón. . . . .   | 246 |
| 6.26. Dependencia de la aceleración máxima ( $q_c$ ) respecto del voltaje ( $p$ ) para una aceleración constante y una aceleración con forma de escalón. . . . .                          | 247 |
| 6.27. Esquema de la estructura básica de un sensor capacitivo diferencial (doble) sometido a una aceleración con forma de escalón. . . . .  | 248 |
| 6.28. Dependencia de la aceleración crítica ( $q_c$ ) respecto del voltaje de alimentación ( $p$ ) para distintos arreglos en los capacitores y aceleración con forma de escalón. . . . . | 249 |
| 6.29. Esquema de la estructura básica de un sensor capacitivo diferencial (doble) con realimentación para el balanceo de fuerzas sometido a una aceleración con forma de escalón. . . . . | 250 |
| 6.30. Dependencia de $f(p)$ respecto de $p$ para configuraciones en el capacitor variable con un sólo lado, diferencial y diferencial con realimentación. . . . .                         | 252 |
| 7.1. Esquema y fotografía del acelerómetro pendular diseñado y fabricado por la empresa Bosch. . . . .  | 258 |
| 7.2. Fotografía del llamado G-Chip desarrollado por la empresa Insouth Microsystems. . . . .  | 259 |
| 7.3. Fotografía del acelerómetro ADXL50 desarrollado y comercializado por la empresa Analog Devices Inc. . . . .  | 260 |
| 7.4. Fotografía retocada de una celda G desarrollada por Motorola. . . . .  | 260 |
| 8.1. Suspensión formada a partir de vigas voladas sometidas a flexión lateral con restricciones de giro en su extremo adherido a la masa móvil. . . . .                                   | 273 |
| 8.2. Equilibrio de fuerzas y momentos. . . . .  | 274 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.3. Suspensión formada a partir de una viga volada doblada. . . . .   | 275 |
| 8.4. Suspensión formada a partir de un par de vigas voladas dobladas y conectadas entre sí. . . . .  | 276 |
| 8.5. Suspensión tipo serpiente. Muy útil en microensambles. . . . .  | 277 |
| 8.6. Suspensión tipo caja con bordes rectangulares. . . . .  | 278 |
| 8.7. Suspensión de caja con bordes circulares. . . . .   | 279 |
| 8.8. Suspensión sagital. Muy sensible pues puede amplificar un movimiento por factores mayores a 10. . . . .   | 280 |
| 8.9. Suspensión en forma de doble V. . . . .   | 281 |
| 8.10. Suspensión tipo patas de cangrejo. Normalmente el segmento más largo se coloca de forma ortogonal a la dirección de movimiento. . . . .  | 282 |
| 8.11. Suspensión tipo langosta. Se utilizan cuatro, una en cada esquina, para sostener una placa rectangular. . . . .  | 283 |
| 8.12. Suspensión tipo X, este tipo de suspensión toma su nombre debido a que se colocan cuatro soportes inclinados (dos por lado) para una placa (masa) móvil. . . . .   | 284 |
| 8.13. Suspensión en forma de espiral. La masa móvil se encuentra sujeta al centro de la espiral y se presenta un par como entrada. . . . .   | 285 |
| 9.1. Modelo tridimensional del actuador y sensor electrostático. Se aprecian las anclas de los electrodos diferenciales fijos y las pistas de Poly0 que sirven para la conexión eléctrica y corren por debajo de los electrodos (vigas) suspendidos. . . . . | 358 |