

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | i |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| PROPUESTA DE TESIS DOCTORAL..... | 3 |
| HIPÓTESIS..... | 3 |
| OBJETIVOS. | 3 |
| Objetivo general:..... | 3 |
| Objetivos específicos, OE: | 3 |
| CAPÍTULO 1:..... | 4 |
| 1 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE..... | 4 |
| 1.1 Tecnología de paneles solares fotovoltaicos..... | 4 |
| 1.2 Principios físicos del fenómeno antirreflectante. | 8 |
| 1.3 Requisitos para generar antirreflectancia. | 10 |
| 1.4 Tipos de recubrimientos antirreflectantes..... | 10 |
| 1.4.1 Recubrimientos antirreflectantes homogéneos. | 10 |
| 1.4.2 Recubrimientos antirreflectantes heterogéneos. | 11 |
| 1.5 Tipos de arquitecturas de recubrimientos antirreflectantes..... | 11 |
| 1.5.1 Películas delgadas de una capa antirreflectantes. | 11 |
| 1.5.2 Películas delgadas de dos capas antirreflectantes..... | 12 |
| 1.5.3 Multicapas antirreflectantes..... | 13 |
| 1.5.4 ARC con gradiente de índice de refracción (<i>GRIN</i>). | 14 |
| 1.6 Técnicas de fabricación de recubrimientos antirreflectantes..... | 15 |
| 1.6.1 Fabricación mediante sol-gel..... | 16 |
| 1.6.2 Deposición química en fase vapor (<i>CVD</i>). | 17 |
| 1.6.3 Pulverización catódica o “ <i>sputtering</i> ”..... | 18 |
| 1.7 Mecanismo de nucleación y crecimiento de películas delgadas..... | 21 |
| 1.8 Películas delgadas base TiO ₂ , SiO ₂ y SiO ₂ -ZrO ₂ para aplicaciones ópticas. | 24 |
| 1.8.1 Películas delgadas a base de dióxido de titanio (TiO ₂). | 24 |
| 1.8.2 Películas delgadas a base de dióxido de silicio (SiO ₂). | 25 |
| 1.8.3 Películas delgadas a base de SiO ₂ -ZrO ₂ | 27 |
| 1.9 Influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas en capas delgadas..... | 28 |
| 1.10 Comportamiento al desgaste erosivo de películas delgadas..... | 30 |
| 1.10.1 Mecanismos de erosión por partículas sólidas (<i>SPE</i>). | 31 |

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| 1.10.2 | Mecanismos <i>SPE</i> dúctiles..... | 32 |
| 1.10.3 | Mecanismos <i>SPE</i> frágiles..... | 34 |
| 1.10.4 | Correlación de <i>SPE</i> con relaciones de parámetros materiales..... | 37 |
| CAPÍTULO 2: | | 39 |
| 2 | METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL..... | 39 |
| 2.1 | Crecimiento de películas delgadas de una capa..... | 39 |
| 2.1.1 | Películas delgadas de una capa de TiO ₂ , SiO ₂ y SiO ₂ -ZrO ₂ | 39 |
| 2.2 | Caracterización de películas delgadas de una capa..... | 41 |
| 2.2.1 | Caracterización de propiedades ópticas..... | 41 |
| 2.2.2 | Caracterización microestructural..... | 42 |
| 2.2.3 | Caracterización química..... | 42 |
| 2.3 | Crecimiento de multicapas..... | 43 |
| 2.3.1 | Multicapas de TiO ₂ y SiO ₂ | 43 |
| 2.3.2 | Multicapas de TiO ₂ /SiO ₂ /SiO ₂ -ZrO ₂ | 44 |
| 2.4 | Caracterización de multicapas..... | 45 |
| 2.4.1 | Caracterización de propiedades ópticas..... | 45 |
| 2.4.2 | Caracterización microestructural..... | 45 |
| 2.4.3 | Caracterización de propiedades mecánicas..... | 46 |
| 2.5 | Desgaste erosivo acelerado por partículas solidas..... | 47 |
| 2.5.1 | Técnicas de caracterización para el análisis del desgaste erosivo..... | 49 |
| CAPÍTULO 3: | | 52 |
| 3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 52 |
| 3.1 | Crecimiento de películas delgadas de una capa de SiO₂ y TiO₂ y SiO₂-ZrO₂..... | 52 |
| 3.1.1 | Caracterización química de películas delgadas de una capa de SiO ₂ y TiO ₂ | 53 |
| 3.1.2 | Caracterización fisicoquímica de películas delgadas de una capa de SiO ₂ y TiO ₂ | 54 |
| 3.1.3 | Caracterización óptica de películas delgadas de una capa de SiO ₂ y TiO ₂ | 55 |
| 3.1.4 | Caracterización química de películas delgadas de una capa de SiO ₂ -ZrO ₂ | 57 |
| 3.1.5 | Caracterización óptica de películas delgadas de una capa de SiO ₂ -ZrO ₂ | 59 |
| 3.2 | Diseño del recubrimiento <i>ARC</i>..... | 60 |
| 3.3 | Crecimiento y caracterización del sistema multicapas de TiO₂/SiO₂..... | 61 |
| 3.3.1 | Control del proceso de crecimiento del <i>ARC</i> a partir de <i>OES</i> | 62 |
| 3.3.2 | Influencia de la temperatura de recocido en las propiedades microestructurales del <i>ARC</i> | 63 |
| 3.3.3 | Influencia de la temperatura de recocido en las propiedades ópticas del <i>ARC</i> sobre vidrio..... | 69 |
| 3.3.4 | Propiedades mecánicas del <i>ARC</i> sobre vidrio..... | 71 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 3.4 | Crecimiento y caracterización del sistema multicapa de TiO₂/SiO₂/TiO₂/SiO₂-ZrO₂. | 76 |
| 3.4.1 | Caracterización microestructural del sistema multicapa <i>ARZr</i> . | 77 |
| 3.4.2 | Caracterización óptica del sistema multicapa <i>ARZr</i> sobre vidrio. | 82 |
| 3.4.3 | Propiedades mecánicas del sistema multicapa <i>ARZr</i> sobre vidrio. | 84 |
| 3.5 | Desgaste erosivo y caracterización de los mecanismos de daño en muestras <i>ARZr</i> sobre vidrio | 88 |
| CAPÍTULO 4: | | 97 |
| 4 | CONCLUSIONES | 97 |
| 5 | SUGERENCIAS: | 99 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 100 |
| 6 | ANEXOS | 117 |
| 6.1.1 | Efecto de la temperatura sobre las constantes ópticas <i>n</i> y <i>k</i> de la película delgada de una sola capa de TiO ₂ . | 117 |
| 6.1.2 | Monitoreo del proceso de crecimiento de la multicapa de TiO ₂ /SiO ₂ usando <i>OES</i> . | 117 |
| 6.1.3 | Simulación de sistemas <i>ARC</i> usando diferentes capas y configuraciones usando el software TFCalc™. | 118 |
| 6.1.4 | Composición química en profundidad del sistema multicapa SiO ₂ /TiO ₂ . | 118 |
| 6.1.5 | Influencia de la temperatura de recocido en el tamaño de grano en las muestras <i>ARC</i> . | 119 |
| 6.1.6 | Daño de la muestra <i>ARZr</i> por el haz de electrones en <i>TEM</i> y mapeo composicional. | 120 |
| 6.1.7 | Curvas del modelo matemático aplicado a las propiedades mecánicas de los sistemas antirreflectantes con y sin dopante de ZrO ₂ . | 121 |
| 6.1.8 | Algoritmo matemático a través de Matlab de las propiedades mecánicas para películas delgadas. | 121 |
| 6.1.9 | Caracterización del sustrato de vidrio usado para estudiar el comportamiento al desgaste y el efecto antirreflectante de los sistemas <i>ARZr</i> . | 125 |