

FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA DIFRACTIVA USANDO LA
TÉCNICA DE NANOLITOGRAFÍA DE OXIDACIÓN LOCAL POR MICROSCOPIA
DE FUERZA ATÓMICA (AFM)

CAROLINA MENDOZA LUNA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN FÍSICA
BUCARAMANGA
2016

FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA DIFRACTIVA USANDO LA
TÉCNICA DE NANOLITOGRAFÍA DE OXIDACIÓN LOCAL POR MICROSCOPIA
DE FUERZA ATÓMICA (AFM)

CAROLINA MENDOZA LUNA

Trabajo de grado para optar al título de
Magister en Física

Director:

Dr. ARTURO PLATA GÓMEZ

Codirectora:

Dra. ZANDRA YOANA LIZARAZO MEJIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN FÍSICA
BUCARAMANGA
2016

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que me han formado y alentado a seguir mis sueños, a mi hermano por su apoyo incondicional y a la familia Mendoza

Al Dr. Arturo Plata, deseo expresar no solo mi agradecimiento sino mi admiración y respeto, gracias por su apoyo, confianza, enseñanzas y por su valiosa amistad.

A la Dra. Zandra Lizarazo, agradezco su dedicación e interés en la realización de este trabajo y en el acompañamiento que me ha brindado a lo largo de este proceso.

A los integrantes del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales: Jaime Meneses, Jader Guerrero, María del Carmen, Rafael Torres, Yesid Torres y Cristian Acevedo, por sus enseñanzas, apoyo y consejos.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la UIS.

Al Dr. Carlos Ríos y al Laboratorio de Microscopia del Parque Tecnológico Guatiguará

Al laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Medellín a cargo del Dr. Hugo Armando Estupiñán por permitirme el uso de sus equipos y a la profesional encargada Sara Leal.

Al laboratorio de Ciencia de Superficies SurfLab del Parque Tecnológico Guatiguará por los resultados XPS.

A mis amigos y compañeros Alfredo, Mónica Florez, Janeth Fernandez, Mary Helena Torres.

A mis queridas amigas Sol y Olguita.

Gracias a la persona que me ha brindado apoyo, consejo y siempre la palabra precisa tanto como profesional e investigador como compañero de vida, la persona que me ha acompañado en los momentos más difíciles y la razón de los momentos más felices: Carlos Alberto Chacón.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	14
1.1. MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA	14
1.1.1. Principio de funcionamiento.....	14
1.1.2. Modos AFM	16
1.1.2.1. Modo Contacto	16
1.1.2.2. Modo Tapping	18
1.1.2.3. Modo no Contacto	18
1.1.3. Puntas AFM.....	18
1.2. TÉCNICAS DE NANOLITOGRAFÍA BASADAS EN MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA	19
1.2.1. Oxidación local anódica	20
1.2.1.1. El menisco de Agua.....	22
1.2.1.2. Cinética.....	22
1.2.1.3. El mecanismo de oxidación.....	23
1.3. DIFRACCIÓN.....	26
1.3.1. Aproximación de Fresnel y Fraunhofer.....	26
1.3.2. Rejilla de difracción.....	29
2. FABRICACIÓN.....	32
2.1. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	32
2.2. OXIDACIÓN LOCAL	34
2.3. FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS PERIÓDICAS DE ÓXIDO Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA.....	39
3. DESCRIPCIÓN DE LAS REJILLAS Y OBTENCIÓN DEL PATRÓN DE DIFRACCIÓN	44
3.1. DESCRIPCIÓN.....	44
3.2. SIMULACIÓN	45
3.3. MONTAJE ÓPTICO	49

4.	CONCLUSIONES	52
	BIBLIOGRAFÍA	54

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de los componentes del hardware y caminos de la señal para la operación del AFM.	15
Figura 2. Principio de funcionamiento del AFM.	16
Figura 3. Curva de fuerza interatómica en función de la distancia.	17
Figura 4. Ley de Hooke aplicada al movimiento de una punta AFM.	19
Figura 5. Esquema de oxidación local anódica.	21
Figura 6. Geometría de la difracción	27
Figura 7. a) Rejilla de transmisión, b) Esquema de una rejilla difracción de transmisión que muestra el orden m-ésimo difractado.	30
Figura 8. Esquema experimental ataque químico.	32
Figura 9. Espectro XPS del sustrato utilizado para la oxidación local.	33
Figura 10: a) Líneas de óxido a diferentes velocidades de barrido, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, y 1 $\mu\text{m/s}$ de izquierda a derecha. b) Perfil transversal correspondiente a la línea verde.	35
Figura 11. Gráfica del ancho de línea promedio en función del valor absoluto del voltaje aplicado.	36
Figura 12. Gráfica de la altura de línea promedio en función del valor absoluto del voltaje aplicado.	36
Figura 13. Gráfica del ancho de línea promedio en función de la velocidad de barrido. ...	37
Figura 14. Gráfica de altura de línea promedio en función de la velocidad de barrido.	38
Figura 15. Rejilla 1. a) Imagen SEM de la estructura completa, b) Imagen SEM a mayor magnificación, c) Imagen AFM 2D, d) Imagen AFM 3D.	40
Figura 16. Rejilla 2. a) Imagen SEM de la estructura completa, b) Imagen SEM a mayor magnificación, c) Imagen AFM 2D, d) Imagen AFM 3D.	41
Figura 17. Patrón 3. a) Imagen SEM de la estructura completa, b) Imagen SEM a mayor magnificación, c) Imagen AFM 2D, d) Imagen AFM 3D.	42

Figura 18. Perfil horizontal de la rejilla circular.....	44
Figura 19. a) Rejilla de difracción circular 1. b) Espectro de potencia. c) Visualización 3D del espectro de potencia.	46
Figura 20. a) Rejilla de difracción circular 2. b) Espectro de potencia. c) Visualización 3D del espectro de potencia.	47
Figura 21. a) Rejilla de difracción lineal. b) Espectro de potencia. c) Visualización 3D del espectro de potencia.	48
Figura 22. Montaje óptico. a) 1. Laser, 2. Atenuador, 3. Rejilla de difracción, 4. Micro-desplazamiento, 5. Lente, 6. Cámara. b) Esquema del montaje experimental.	49
Figura 23. Patrón de difracción a) Rejilla 1, b) Rejilla 2.	50
Figura 24: Patrón de difracción rejilla 3.	51

RESUMEN

TÍTULO: FABRICACIÓN DE UNA ESTRUCTURA PERIÓDICA DIFRACTIVA USANDO LA TÉCNICA DE NANOLITOGRAFÍA DE OXIDACIÓN LOCAL POR MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA (AFM)*

AUTOR: CAROLINA MENDOZA LUNA**

PALABRAS CLAVES: Nanolitografía por Oxidación Local Anódica, Microscopia de Fuerza Atómica, rejilla de difracción

Los últimos avances en el área de la nanociencia y nanotecnología conllevan al crecimiento del interés de los científicos en el estudio de diferentes fenómenos físicos que se presentan a escala nanométrica, en el área de la óptica se han presentado grandes desarrollos tanto teóricos como experimentales a partir del estudio de la interacción de la luz con estructuras fabricadas a escalas cada vez más pequeñas, como ejemplo de esto se encuentra el estudio de cavidades resonantes, antenas ópticas, diseño de estructuras difractivas, microscopia de campo cercano, óptica no lineal, entre otras. Estos avances son consecuencia de las nuevas habilidades para medir, fabricar y manipular estructuras a escala nanométrica. Debido a que la fabricación es una etapa importante para el estudio experimental de estos fenómenos se desea explorar el uso de la técnica de nanolitografía por oxidación local usando un microscopio de fuerza atómica.

En este trabajo se implementa la técnica de nanolitografía de oxidación local por AFM para la fabricación de estructuras periódicas difractivas con dimensiones y geometría controlables; con este fin se estudia la dependencia de las dimensiones del óxido con dos parámetros experimentales influyentes para la implementación de esta técnica de litografía, voltaje aplicado y velocidad de barrido; la siguiente etapa en la fabricación de la estructura difractiva incluye la caracterización morfológica de la estructura construida mediante técnicas de microscopia de alta resolución. Finalmente, se realiza un montaje óptico que permite obtener el patrón de difracción de las estructuras fabricadas.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en Física. Director: Arturo Plata, Dr. en Ciencias para la Ingeniería.

ABSTRACT

TITLE: FABRICATION OF A PERIODIC DIFFRACTIVE STRUCTURE USING LOCAL ANODIC OXIDATION NANOLITHOGRAPHY TECHNIQUE BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY (AFM)*

AUTHOR: CAROLINA MENDOZA LUNA**

KEY WORDS: Local Anodic Oxidation Nanolithography, Atomic Force Microscopy, Diffraction grating.

DESCRIPCIÓN:

The last advances in nanoscience and nanotechnology leads to an increase of the interest of the researchers in the study of the different physical phenomena that occur at the nanoscale, in the area of optics great development has been made, both theoretical and experimental, based on the study of the interaction of light with structures which dimensions are increasingly smaller; resonant cavities, optical antennas, diffractive structures, near field microscopy, non-linear optics, etc. are examples of these advances. This is allowed by the new abilities to measure, fabricate and manipulate structures at nanometric scale. Because fabrication is an important step in the experimental study of this phenomena is important to explore the use of the local oxidation nanolithography technique by Atomic Force Microscopy.

In this work the local oxidation nanolithography technique is implemented using an Atomic Force Microscope for the fabrication of periodic diffractive structures with controllable dimensions and geometry; for this purpose the dependence of oxide dimensions with two experimental parameters is studied, this two influential parameters are the applied bias and scanning speed. Next step in diffractive structure fabrication includes morphological characterization using high resolution microscopy techniques. Finally, an optical setup is realized allowing to obtain the diffraction pattern of the periodic structures fabricated.

* Master Thesis.

** Faculty of Sciences. School of Physics. Master in Physics. Director: Arturo Plata, Dr. In Sciences for Engineer.

INTRODUCCIÓN

La fabricación de dispositivos a escala micro y nanométrica es una parte fundamental de la investigación en nanociencia, nanotecnología y sus nuevas aplicaciones. Esto presenta un desafío tecnológico ya que requiere una técnica litográfica de alta resolución con el fin de definir, de forma precisa, la geometría de las estructuras deseadas.

La literatura reporta varias técnicas de nano-fabricación que han sido empleadas para este fin. Entre ellas se encuentran la litografía por haz de electrones (EBL), litografía con haz de iones focalizados (FIB), síntesis química, auto-ensamblado y técnicas de litografía basadas en escaneo de sonda (SPL) [4, 7, 24, 30, 33, 34].

En comparación con las demás técnicas, la litografía por escaneo de sonda (SPL por sus siglas en inglés) es definitivamente una alternativa a las técnicas fotónicas o de haces cargados debido a su versatilidad y bajo costo. La litografía SPL nace poco después de la aparición del microscopio de efecto túnel (STM) y ofrece la posibilidad de escribir patrones de forma directa a una escala inferior a 100 nm en condiciones ambientales y puede ser implementada a través de diversos mecanismos, la superficie de una muestra puede modificarse bajo la influencia de un campo eléctrico localizado muy intenso tal como en la oxidación local, descomposición o modificación de la superficie por efectos térmicos inducidos por un campo o por la indentación de la punta generada al aplicarle una fuerza, entre otras [4, 8, 21].

La técnica de oxidación ha sido ampliamente utilizada en materiales conductores y semiconductores para la fabricación directa de diferentes dispositivos [15], como barreras dieléctricas, máscaras para *etching* selectivo y plantillas. La combinación de este tipo de litografía con métodos químicos de modificación superficial permite la fabricación de un amplio rango de dispositivos electrónicos y mecánicos con escala nanométrica, incluyendo memorias para almacenamiento de datos, nanohilos conductores, transistores, transistores de un solo electrón, puntos y anillos cuánticos, microlentes, etc [8, 21, 25].

En este trabajo el interés se centra en evaluar el desempeño de la técnica de oxidación local analizando aspectos como el comportamiento del crecimiento del óxido en un sustrato de silicio con recubrimiento de nitruro de silicio y su aplicación en sistemas difractivos mediante la construcción de estructuras periódicas que permitan modificar el frente de onda de un haz incidente. Este sistema es interesante desde el punto de vista tecnológico, porque las películas de nitruro de silicio son ampliamente usadas en microsistemas y microelectrónica y presentan una buena selectividad como una máscara ante el *etching* químico y físico de silicio y óxido

de silicio [5]. Por otra parte, la construcción de estructuras de oro y otros metales con dimensiones controladas y geometría versátil son actualmente estudiadas ya que se ha demostrado su aplicabilidad en el campo de los dispositivos fotovoltaicos, el campo de la microscopia de campo cercano, antenas ópticas, entre otros [25, 5].

Este trabajo da continuidad al interés del *Laboratorio de Óptica y Tratamiento de Señales* de la Universidad Industrial de Santander en la implementación de técnicas de nanolitografía usando microscopia de fuerza atómica. El laboratorio, desde el año 2009 ha trabajado en la caracterización de propiedades de los materiales a escala nanométrica usando microscopia de fuerza atómica y ha dado algunos pasos hacia el estudio de los procesos de fabricación de nanoestructuras, inicialmente con la caracterización de materiales con memoria de forma, luego con la caracterización de propiedades tribológicas de materiales con recubrimientos de monocapas y multicapas (nanodureza y microdureza) [19, 17]. En el año 2012 se realizó un trabajo para la implementación de la técnica rayado mecánico usando un AFM en materiales poliméricos y el estudio de sus aplicaciones en el campo de la instrumentación óptica [22]. Siguiendo esta línea de trabajo se desea implementar la técnica de oxidación local, la cual ofrece grandes ventajas en el diseño y fabricación de estructuras, entre ellas se encuentran una mejor calidad en la reproducción de diseño de estructuras curvas y mayor facilidad en la modificación de la superficie de sustratos metálicos y semiconductores, ampliando de esta manera el tipo de sustratos que pueden modificarse superficialmente y las aplicaciones que pueden encontrarse.

Este tipo de estructuras generadas pueden emplearse en un amplio rango de áreas de investigación. Con respecto al área de interés de este trabajo, se encuentran aplicaciones como generadores de haces multipuntos, también conocidos como generadores de arreglos de haces o elementos *fan-out*, son elementos difractivos que dividen un haz laser incidente en un número infinito de haces con una distribución de intensidad específica. Estos pertenecen a la clase de componentes difractivos de campo lejano, o rejillas de Fourier. Generadores de multipuntos son usados como replicadores de imágenes, como divisores de haz o combinadores de haz, y como multiplexores espaciales en interconectores ópticos multicanal.

Aplicaciones de las rejillas incluyen generación de onda acústica, antenas, almacenamiento asociativo, codificación de haz, acople de haces, deflexión de haces, expansión de haz, división de haz, generación de luz coherente, almacenamiento de datos, metrología, filtrado, procesamiento de imágenes, conversor incoherente a coherente, instrumentación, interferometría, lentes, modulación, monocromador, generación de multiples haces, multiplexado, demultiplexado, reconocimiento de patrones, conjugación de fase, compresión y cambio de forma de pulsos, elementos ópticos holográficos, amplificación de imagen, concentración de luz solar, modulador espacial de luz, análisis espectral, etc.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

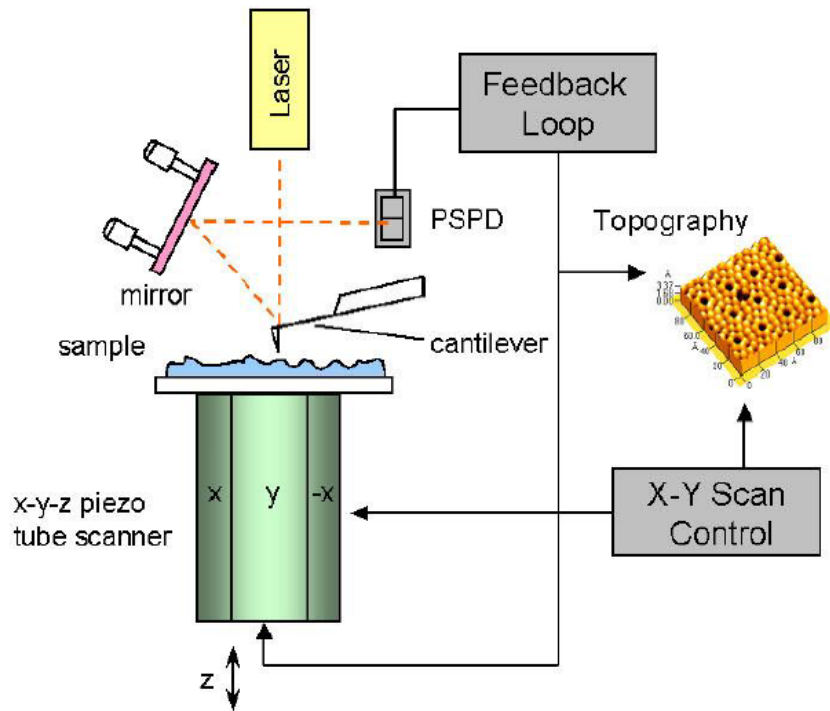
1.1. MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

La microscopia de fuerza atómica (AFM por sus siglas en inglés) es una técnica que amplía las posibilidades cuando se trata de la caracterización de superficies, permite obtener información tridimensional de la superficie de la muestra con resolución por debajo del nanómetro, dependiendo de la configuración del equipo, se alcanza incluso resolución atómica. El funcionamiento de este microscopio se basa en el principio físico de la interacción punta muestra y en su capacidad de censar fuerzas de Van der Waals para la adquisición de la información topográfica y otras propiedades físicas de la muestra; no solo permite realizar la caracterización del material sino que también permite modificar localmente la superficie del material, esta cualidad en particular, es de gran interés en el área de la fabricación de dispositivos que requieren la creación de estructuras de orden micro y nanométrico para aplicaciones en diferentes campos [6].

1.1.1. Principio de funcionamiento

La figura 1 muestra el esquema de funcionamiento de un microscopio de fuerza atómica, ésta configuración consiste en un tubo piezoeléctrico que permite el movimiento de la muestra en los ejes x , y y z ; un diodo laser cuyo haz se focaliza al final de un *cantiléver* que tiene una punta de radio nominal de decenas de nanómetros, el haz reflejado llega a un fotodetector de cuatro cuadrantes, la variación del voltaje medido entre los diferentes cuadrantes permite medir la deflexión del *cantiléver*.

Figura 1. Diagrama de los componentes del hardware y caminos de la señal para la operación del AFM.

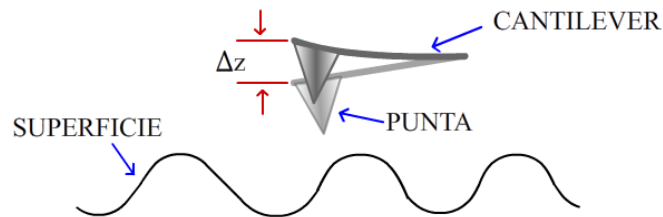


Fuente: [26].

Cuando la punta se acerca a la superficie de la muestra a una distancia de separación del orden de la separación interatómica, se detectan potenciales entre los átomos de la punta y los átomos de la superficie; este es el principio usado por el AFM para obtener imágenes de alta resolución. A medida que la muestra se mueve para que la punta realice un barrido, los potenciales interatómicos forzarán al *cantilever* a sufrir una deflexión hacia arriba y hacia abajo de acuerdo con la topografía de la superficie (figura 2). Por lo tanto, midiendo la deflexión del *cantilever*, las características topográficas pueden ser registradas. El AFM puede ser operado en dos modos principales: con control de retroalimentación y sin control de retroalimentación. Si la retroalimentación electrónica está habilitada, entonces el piezoposicionador puede responder a cualquier cambio en la fuerza, el cual detecta y modifica la separación punta-muestra para restaurar la fuerza a un valor predeterminado. Este modo de operación es conocido como fuerza constante y permite obtener una imagen topográfica fiable. Si la retroalimentación electrónica se deshabilita, entonces se dice que el microscopio es operado en modo altura constante; este es particularmente útil para obtener imágenes de muestras muy planas a alta resolución, esta imagen remueve las variaciones lentas en la topografía, pero realza los bordes de los elementos en la superficie [4, 8]. Teóricamente para cualquier material el cual tenga cierta rigidez es siempre posible producir imágenes de

superficies con resolución atómica ya que los últimos desarrollos en tecnología del láser han permitido que la deflexión del *cantilever* sea detectada por debajo de la escala del angstrom.

Figura 2. Principio de funcionamiento del AFM.



1.1.2. Modos AFM

Los modos de operación descritos anteriormente aplican para el “modo contacto”, pero la forma en la cual el contraste de la imagen es obtenido puede ser alcanzado en muchas maneras. Las tres clases principales de interacción son el modo contacto, el modo *tapping* y el modo no contacto. Pero el control de retroalimentación y los otros principios de operación son similares.

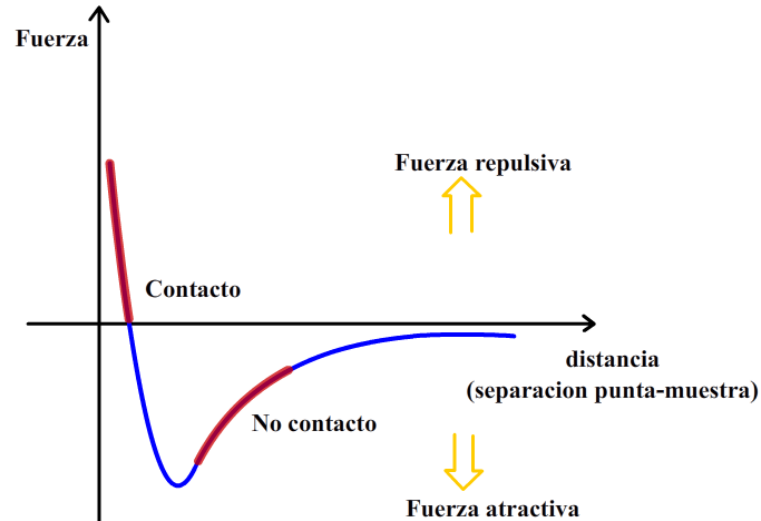
1.1.2.1. Modo Contacto

El modo contacto es el método más común de operación del AFM. Como el nombre sugiere, la punta y la muestra permanecen en contacto cercano mientras el barrido es realizado. La palabra “contacto” hace referencia al régimen repulsivo de la curva de fuerza intermolecular (figura 3) [4, 8].

En modo contacto la deflexión del *cantilever* es medida y comparada con el valor de deflexión deseado, si la deflexión medida es diferente del valor preseleccionado se aplica un voltaje al tubo piezoeléctrico para aumentar o disminuir la distancia relativa entre la muestra y la punta para así restaurar el valor deseado de deflexión. El voltaje que es aplicado al piezo es una medida de la altura de las estructuras de la superficie de la muestra y es mostrado como una función de la posición lateral de la muestra.

Es posible que se presenten algunos defectos en las imágenes obtenidas en modo contacto, causados por excesivas fuerzas de rastreo aplicadas por el *cantilever* a la muestra. Los efectos pueden ser reducidos minimizando la fuerza de barrido que puede ser controlada durante la adquisición de la imagen. La magnitud de la fuerza depende de los detalles de la geometría de la muestra, pero es típicamente del orden de 100 nN. Hay que considerar también que, bajo condiciones ambientales, la superficie de las muestras está cubierta por una película de gases absorbidos, consistente primariamente por vapor de agua y nitrógeno la cual tiene un espesor de 10-30 monocapas. Cuando la sonda toca esta película contaminante, un menisco se forma y el *cantilever* es halado por la tensión superficial hacia la superficie de la muestra. Esta fuerza del menisco y otras fuerzas atractivas como fuerzas capilares, fuerzas de Van der Waals, carga electrostática atrapada en semiconductores y aislantes pueden ser neutralizadas operando con la sonda y la muestra inmersas en líquido. Todas estas fuerzas se combinan para definir una fuerza mínima normal que pueda ser aplicada controlablemente por la sonda a la muestra. Esta fuerza normal crea una fuerza de fricción sustancial a medida que la sonda barre la muestra. En la práctica, estas fuerzas de fricción pueden dañar la muestra, desgastar la punta y distorsionar los datos resultantes [8].

Figura 3. Curva de fuerza interatómica en función de la distancia.



1.1.2.2. Modo Tapping

El modo *tapping* es el segundo modo más usado en AFM. Cuando es operado en aire u otros gases, el *cantilever* oscila a su frecuencia de resonancia (generalmente cientos de kHz) y se posiciona sobre la muestra de manera que solo dé ligeros “golpecitos” a la superficie durante una muy pequeña fracción de su periodo de oscilación [21]. Esto sigue estando en contacto con la muestra en el sentido que se definió anteriormente, pero el muy corto tiempo durante el cual éste contacto ocurre conlleva a que las fuerzas laterales sean drásticamente reducidas mientras la punta escanea la superficie. Cuando se toman imágenes de muestras pobremente inmovilizadas o suaves, el modo *tapping* puede ser una mejor elección que el modo contacto para realizar la imagen. Usualmente las puntas para el modo *tapping* tienen *cantilevers* mucho más cortos que otros y su constante de rigidez puede estar en el rango de 1-100 N/m la constante de resorte permite a la punta oscilar mucho mejor en modo *tapping* y también provee una interacción punta-muestra más fuerte que en modo contacto.

1.1.2.3. Modo no Contacto

El modo no contacto es otro método que se puede emplear cuando se adquieren imágenes con AFM. El *cantilever* debe oscilar sobre la superficie de la muestra a tal distancia que no se encuentra en el régimen repulsivo de la curva de fuerza intermolecular. Este es un modo difícil de operar en condiciones ambiente con el AFM. La película delgada de contaminante de agua que se forma sobre la superficie de la muestra forma un pequeño puente de capilaridad entre la punta y la muestra y causa que la punta entre en contacto. Incluso operando en líquidos y vacío la probabilidad de que la punta entre en contacto es extremadamente grande, y es probable que se obtenga la imagen en modo *tapping* en lugar de modo no contacto [8].

1.1.3. Puntas AFM

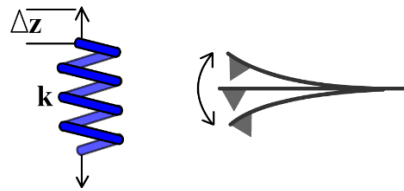
En una punta AFM convencional el *cantilever* está unido a una región de mayor volumen necesaria para la manipulación de las puntas con pinzas, normalmente todo el sistema está fabricado del mismo material, comúnmente silicio. En una representación más sencilla, el *cantilever* puede ser visto como un resorte con una constante de rigidez característica k

(figura 4). En el modo contacto, una fuerza de contacto F_c es aplicada entre la punta y la superficie de la muestra durante el escaneo con un cristal piezo-resistivo que realiza los movimientos en las direcciones x, y, z . A partir de la ley de Hooke y conociendo la constante de rigidez k del *cantilever* la fuerza F_c es calculada:

$$F_c = k\Delta z \quad (1)$$

donde Δz es la deflexión del *cantilever* fuera del equilibrio.

Figura 4. Ley de Hooke aplicada al movimiento de una punta AFM.



El hecho de mantener F_c mínima y constante, reduce la probabilidad de daño en la muestra debido a la punta AFM, la cual es usualmente más dura que el sustrato. Cuando la fuerza constante del *cantilever* es exactamente conocida, el AFM puede ser usado para detectar fuerzas ultra bajas en el rango de nano-Newton.

Actualmente se fabrica una gran variedad de puntas AFM, con características definidas para ser usadas en diferentes experimentos usando el AFM, por ejemplo puntas de silicio estándar o de diamante (monocristal), puntas con nanotubos adheridos a ella, puntas conductoras, etc.

1.2. TÉCNICAS DE NANOLITOGRAFÍA BASADAS EN MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

El potencial de los microscopios de barrido de sonda para la modificación y manipulación de materiales a escala nanométrica fue reconocido justo después de la invención del microscopio de efecto túnel a través de un paradigmático ejemplo de la manipulación de átomos individuales de Xenón en una superficie de Níquel. Desde ese entonces, un sinnúmero de

métodos han sido propuestos y aplicados para manipular superficies y formar estructuras de escala nanométrica y atómica. Sin embargo solo pocos de los métodos son rentables para el desarrollo de una litografía basada en barrido de sonda que pueda llevarse a gran escala para la fabricación de dispositivos, debido al requerimiento de condiciones de ultra alto vacío y bajas temperaturas o la definición de patrones no reproducibles, esto restringe considerablemente el número de métodos disponibles para estos propósitos litográficos.

En general, la técnica de litografía por barrido de sonda (SPL por sus siglas en inglés) es un área emergente de investigación en la cual el microscopio de efecto túnel o el microscopio de fuerza atómica es usado para crear patrones con detalles nanométricos. Los métodos incluyen patronamiento mecánico, tal como el rayado o la nanoindentación, la nanomanipulación [4, 8, 21], la oxidación local, la técnica *deep pen* para la deposición controlada de especies químicas, entre otras en las cuales se modifican localmente propiedades de la muestra tal como la piezoelectricidad.

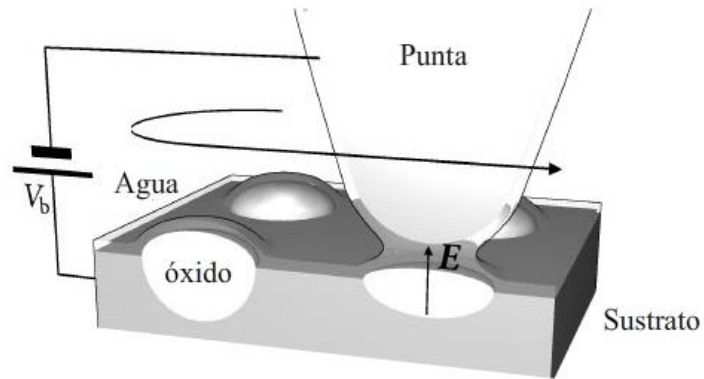
En términos de las posibilidades experimentales, las técnicas de nanolitografía disponibles para su implementación con un microscopio de fuerza atómica comercial operado en aire comprenden rayado mecánico, en la cual la punta AFM indenta la muestra para crear el patrón deseado; oxidación local anódica la cual es descrita en este trabajo y la combinación de las dos anteriores. La técnica de interés de este trabajo es la oxidación local anódica por AFM, la cual permite la fabricación de estructuras de geometría variada en la superficie de sustratos conductores y semiconductores, entre otras características, el proceso de modificación superficial y la adquisición de imagen operan independientemente, es decir, que las fuerzas de Van der Waals de largo rango y/o fuerzas repulsivas de corto rango son usadas para adquirir una imagen de la superficie mientras un voltaje externo es aplicado para inducir la oxidación local de la superficie. Otra característica relevante es que permite un control in situ de las características eléctricas y topográficas del dispositivo durante su fabricación.

1.2.1. Oxidación local anódica

La oxidación local anódica por microscopía de fuerza atómica es un método directo para definir estructuras a escala nanométrica en la superficie de un material, mediante la combinación de procesos físicos y químicos para la modificación local de la superficie del sustrato. La implementación de esta técnica de nanolitografía requiere el uso de un AFM con una punta conductora, un sustrato conductor o semiconductor y condiciones de humedad relativa superior al 30%. Una diferencia de potencial es aplicada entre la punta y la muestra para generar un campo eléctrico entre ellos; la presencia de este campo facilita la formación

de un menisco de agua creando un sistema similar a una celda electroquímica a escala nanométrica que permite el crecimiento de óxido, de forma local, en la superficie del sustrato.

Figura 5. Esquema de oxidación local anódica.



El esquema experimental para obtener la nano-oxidación se representa en la figura 5. Cuando la punta entra en contacto con la superficie usualmente se forma un menisco de agua en el ápice de la punta debido a condensación por capilaridad, este fenómeno se intensifica por la presencia del campo eléctrico. Al aplicar un voltaje negativo a la punta, las moléculas de agua se disocian en iones O^- y OH^- los cuales son conducidos por el campo eléctrico hacia el sustrato [16, 18].

En consecuencia, el menisco de agua, la magnitud del campo eléctrico y la concentración iónica son parámetros clave para determinar la cinética de la reacción de oxidación y el resultado de la oxidación dependerá de las condiciones experimentales como la velocidad de escritura, el voltaje aplicado y la humedad del ambiente [18, 32].

Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, el proceso de oxidación local comprende varios aspectos relevantes, el puente de agua, la cinética y el mecanismo de oxidación. A continuación se describen estos aspectos con más detalle.

1.2.1.1. El menisco de Agua

El puente de líquido o menisco de agua formado entre la punta y la superficie de la muestra tiene dos roles en el proceso de oxidación, el puente provee especies de oxígeno (en su mayoría OH^-) necesarias para oxidar la superficie, también provee el camino al campo eléctrico para inducir la oxidación. Otro aspecto importante es la diferencia entre la permitividad eléctrica dentro y fuera del puente de líquido la cual tiene un valor de 81 y 1 respectivamente [18], haciendo que el menisco actúe como una lente efectiva focalizando las líneas de campo al interior del menisco.

El modo de operación del AFM influye en la formación del menisco de agua. En modo contacto la formación del menisco de agua se da de manera espontánea, el tamaño lateral del menisco que influye en el tamaño del punto de óxido está relacionado con el tamaño del ápice de la punta, el carácter hidrofílico de las superficies y la presión de vapor de agua, lo cual deja al observador con pocas opciones para reducir el tamaño del menisco sin afectar el proceso en su totalidad. Al implementar la técnica en modo no contacto, una vez el menisco de agua es formado por la cercanía de la punta a la muestra y por la presencia del campo eléctrico, sus dimensiones pueden modificarse cambiando la separación punta-muestra.

1.2.1.2. Cinética

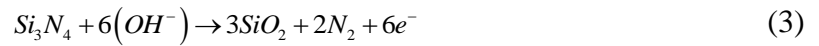
El estudio de la cinética y mecanismo de oxidación local es de importancia fundamental para desarrollar su potencial para aplicaciones litográficas. Esto ha sido el objetivo de un número de contribuciones en años pasados. Los esfuerzos han revelado factores dominantes que afectan la tasa de crecimiento del óxido, tales como el voltaje, la duración del pulso, el dopaje del sustrato, aumento de la carga espacial, humedad relativa y constante de fuerza del cantiléver y se han utilizado técnicas de caracterización como Espectrometría de masas de iones secundarios SIMS, Rayos X, Espectroscopia Auger y de fotoemisión para confirmar el crecimiento del óxido bajo la punta en experimentos de oxidación. Óxidos de silicio local muestran una estructura amorfa de acuerdo con análisis de sección transversal por microscopía electrónica de transmisión. Dependiendo del tipo de dopaje, los óxidos de silicio pueden mostrar densidad y estequiometría diferentes con respecto a los óxidos termales. Las corrientes de Faraday también han sido medidas durante la oxidación de una superficie de silicio, la corriente neta a través de la interface es muy cercana a la esperada para la oxidación anódica si se calcula a partir del volumen crecido.

Para disolver las moléculas de agua en iones en el puente de agua formado alrededor de la punta y la superficie de la muestra se requiere un campo eléctrico local mayor que el campo eléctrico crítico el cual es de alrededor de 1V/m [9, 12, 13], el proceso de oxidación está acompañado de corrientes extremadamente pequeñas del orden del pico-amperios. Estas observaciones junto con la presencia del menisco de agua hacen ver la naturaleza electroquímica del proceso.

La descomposición de las moléculas de agua se da de acuerdo con [12]:



Para el nitruro de silicio las reacciones en la nano-celda se describen por la siguiente reacción en la que los iones, producto de la disociación de las moléculas de agua, reaccionan con el sustrato para formar SiO_2 :



La difusión lateral de estos iones oxidantes OH^- juega un papel crítico en la determinación de la resolución de las estructuras de óxido formadas. En una etapa inicial de la aplicación del voltaje la oxidación generada es altamente localizada en la vecindad del ápice de la punta, cuando el crecimiento vertical se satura, el crecimiento lateral predomina debido a que la difusión lateral de los iones prevalece.

Mientras la oxidación toma lugar en el ánodo la generación de hidrógeno ocurre en el cátodo para completar la reacción electroquímica



1.2.1.3. El mecanismo de oxidación

Para que la oxidación local por microscopia de fuerza atómica sea una técnica reproducible y confiable requiere una descripción física realista del modelo de mecanismo de crecimiento, una relación de dependencia de la altura del óxido $h(t)$, ancho $w(t)$ y razón de aspecto h/w , con los parámetros de exposición como por ejemplo el voltaje aplicado entre punta y muestra y el tiempo de duración del pulso. La descripción del mecanismo de oxidación local por AFM, ha sido un tema de estudio reciente ya que los primeros trabajos se centraron en la obtención de las estructuras de óxido y su descripción topográfica [2, 3, 18], pero adicional

al estudio de la cinética del proceso de oxidación local varios modelos también han sido propuestos para explicar el mecanismo de oxidación, aunque ninguno de estos modelos parece explicar el amplio rango de datos experimentales.

Información de la cinética del experimento puede obtenerse a partir de las medidas del volumen del óxido, corriente, y carga residual incorporada en la película de óxido y en la interface. Primeros estudios en la cinética de la oxidación local recaían primariamente en la medida de la altura, la cual era conveniente para obtener de la topografía SPM. Luego, el ataque selectivo y la microscopia electrónica de transmisión a la sección transversal fueron incluidas para estimar la densidad de óxido con respecto al crecimiento termal de óxido de silicio de alta calidad.

Actualmente, se desea obtener un entendimiento detallado tanto de la cinética de la reacción como de la mecánica de oxidación y la naturaleza auto-limitante del crecimiento del óxido. Varios modelos se han propuesto para dar explicación a estos cuestionamientos, el modelo Cabrera – Mott que indica que el espesor del óxido está gobernado por el campo eléctrico limitante de la difusión [2, 3, 18, 29]. El modelo de ley de potencia, indica que la oxidación es observada solo para voltajes que exceden un umbral que depende del dopaje del sustrato sobre el cual la cinética de la oxidación sigue una ley de potencia. El modelo de cinética logarítmica, en el cual se muestra que la altura de la estructura de óxido h es proporcional al $\log(1/V)$ y la existencia de un comportamiento lineal entre $1/h$ y $\log(V)$. El modelo de carga espacial, la aplicación de una diferencia de potencial entre la superficie y la punta en una atmósfera con presencia de humedad, induce la oxidación de forma localizada.

En 1995 Gordon sugiere que la teoría Cabrera-Mott era apropiada; se reportó en 1997 con significativo progreso en esta dirección por Stievenard y Avouris quien llegó a una forma logaritmo-inversa, $1/h(t) = k(V) - \log t$, comenzando con las condiciones de Cabrera-Mott e introduciendo un campo límite dependiente del espesor $E_L = V/h_L$. Avouris posee una forma logaritmo-directa, $h(t) = k'(V)\log t$. Es notable que Stievenard y Avouris llegaron a ajustar satisfactoriamente sus datos experimentales a estas alternativas de forma de crecimiento, ya que cada ecuación es derivada de condiciones muy diferentes.

Reconociendo que la forma directa es la apropiada para la oxidación por SPM, se examinan las condiciones usadas para derivarla. Uhlig obtiene la forma directa [29], $h(t) = k''(V)\log(k_u t + 1)$, asumiendo que la tasa de control de paso involucra la interacción de oxianiones con especies electrónicas (huecos y electrones) y defectos en una interfase metal-óxido. En particular el modelo de Uhlig unifica los conceptos claves reconocidos por Stievenard y Avouris con las conjeturas sobre la influencia de la carga espacial en el crecimiento de óxido por SPM. De acuerdo con este modelo la producción de defectos de

carga conlleva a construir una carga espacial dentro del óxido y la inhibición del crecimiento cuando la duración del pulso de voltaje es grande. Al seguir a Uhlig en atribución al cambio relacionado con el espesor en la energía de activación en la carga espacial más que al estrés como se ha sugerido en anteriores trabajos, se llega a un total acuerdo con Avouris en la forma de la ley de crecimiento de óxido por SPM. Se puede también invocar la teoría de Uhlig para proveer una base física para el campo límite de Stievenard, ya que es simplemente el potencial al cual la carga espacial en el óxido anula el campo externamente aplicado. Como Uhlig ha indicado, este es el punto en el cual el rápido crecimiento en la dirección vertical cesa.

Para explicar la forma logarítmica directa observada experimentalmente en muchos experimentos de oxidación local, Dagata uso el modelo de Uhlig. Uhlig obtuvo la forma log-directo, $h(t) = k^-(V) \log(k_v t + 1)$ asumiendo que la rata que controla el paso involucra la interacción de oxianiones ya sea con huecos o electrones, y defectos en una interfaz metal (semiconductor)-óxido. Para deducir la ecuación anterior, Uhlig también consideró que el óxido tiende a adquirir exceso de carga negativa así sea que el óxido tenga gran afinidad electrónica o mayor función de trabajo que el metal (en este caso semiconductor). La producción de defectos cargados lleva al aumento de carga espacial dentro del óxido el cual inhibe un futuro crecimiento sobre largos pulsos de tiempo.

Un análisis posterior de los datos de oxidación local lleva a la conclusión que una sola tasa global no provee suficiente información acerca de cómo los oxianiones, sitios de trampa y especies electrónicas interaccionan. Dagata propuso un modelo que incluye un cruce espacial de predominantemente crecimiento vertical a crecimiento lateral acoplado. Infortunadamente, el modelo involucra la solución de un sistema de ecuaciones acopladas que solo pueden resolverse numéricamente. Además, la confirmación de este modelo requiere de tiempos de oxidación más largos (varios segundos) lo cual es difícil de lograr experimentalmente sin introducir considerables errores experimentales, entre otras cosas, a la interacción mecánica del *microcantilever* con el crecimiento del óxido.

Ahora se sabe que las leyes de potencia del tiempo están asociadas con conceptos de carga atrapada; este principio unificador es clave en el desarrollo de un modelo para describir el mecanismo de oxidación. La primera observación directa de carga atrapada local dentro de las estructuras de óxido por microscopia de fuerza atómica sugiere el rol de la carga espacial en la cinética. De hecho, la influencia en la cinética de una distribución de la carga atrapada no uniforme en una película de óxido crecido fue reconocido tiempo atrás por Uhlig derivando la forma de logaritmo directo.

Mientras estos acercamientos han proveído una guía significativa para el entendimiento de la mecánica del crecimiento del óxido aún no se ha presentado un modelo definitivo para la descripción de este fenómeno.

1.3. DIFRACCIÓN

La difracción es un fenómeno ondulatorio que explica numerosos efectos de la propagación de la radiación que no pueden ser explicados por la óptica geométrica, incluyendo la desviación de las ondas al encontrar un obstáculo o atravesar una rendija.

La solución rigurosa de problemas de difracción satisface las ecuaciones de Maxwell y las condiciones de frontera apropiadas. Pero existe una aproximación más simple basada en el principio de Huygens-Fresnel, el cual define la fundamentación de la teoría escalar de la difracción

De acuerdo al principio de Huygens-Fresnel, cualquier perturbación del haz de luz puede matemáticamente describirse como un número infinito de fuentes puntuales a lo largo del frente de onda del haz. La superposición de las ondas emitidas de todas estas fuentes puntuales es una forma efectiva de modelar los efectos de interferencia de la luz que ocurre en los bordes de una interface. Los detalles de esta aproximación se describen a continuación.

1.3.1. Aproximación de Fresnel y Fraunhofer

El patrón de difracción producido por un elemento difractivo es generalmente estudiado usando las aproximaciones de Fresnel y Fraunhofer según la distancia a la que se encuentra el punto de observación. Estas aproximaciones se derivan del principio de Huygens-Fresnel que puede ser expresado como [14]

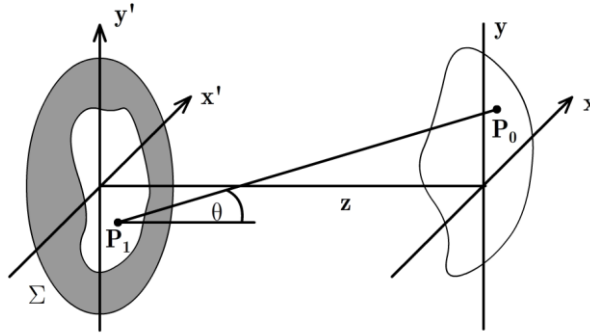
$$U(P_0) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U(P_1) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos \theta ds \quad (5)$$

Donde θ es el ángulo entre la normal exterior \hat{n} y el vector r_{01} que apunta del punto P_0 a P_1 . El término $\cos \theta$ está exactamente dado por

$$\cos \theta = \frac{z}{r_{01}} \quad (6)$$

Como muestra la figura 6, se asume la apertura difractante en el plano (x', y') , y es iluminada en la dirección Z positiva. Se calcula el campo ondulatorio a través del plano (x, y) , el cual es paralelo al plano (x', y') y está ubicado a una distancia normal Z de este. El eje Z atraviesa ambos planos en sus orígenes.

Figura 6. Geometría de la difracción



Fuente: [14].

Por consiguiente, el principio de Huygens-Fresnel puede ser escrito

$$U(x, y) = \frac{z}{j\lambda} \iint_{\Sigma} U(x', y') \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}^2} dx' dy' \quad (7)$$

Donde la distancia r_{01} está dada exactamente por

$$r_{01} = \sqrt{z^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (8)$$

La expresión anterior puede aproximarse de dos maneras, una es la aproximación inherente en la teoría escalar, en la segunda aproximación se asume que la distancia de observación corresponde a muchas longitudes de onda con respecto a la apertura, $r_{01} \gg \lambda$.

Las aproximaciones para la distancia r_{01} entre P_1 y P_0 están basadas en la expansión binomial de la raíz cuadrada en la ecuación (8) dada por

$$\sqrt{1+b} = 1 + \frac{1}{2}b - \frac{1}{8}b^2 + \dots \quad (9)$$

Donde b es un número menor que uno, el número de términos necesarios para una precisión dada depende de la magnitud de b . Entonces, usando sólo los primeros dos términos de la expansión (9), tenemos

$$r_{01} \approx z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x-x'}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y-y'}{z} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Para el r_{01}^2 que aparece en el denominador de la ecuación (7), el error introducido despreciando todos los términos excepto z es, en general, aceptablemente pequeño. Sin embargo, para el r_{01} que aparece en el exponente, el error es mucho más crítico ya que el cambio de fase de una pequeña fracción de un radián puede cambiar el valor de la exponencial significativamente. Por esta razón se conservan ambos términos de la aproximación binomial en la exponencial. La expresión resultante para el campo en (x, y) por consiguiente se convierte

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ U(x', y') e^{j\frac{k}{2z}(x'^2+y'^2)} \right\} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda z}(xx'+yy')} dx' dy' \quad (11)$$

La cual se reconoce (aparte de los factores multiplicativos) como la trasformada de Fourier del producto del campo complejo justo a la derecha de la apertura y un factor de fase exponencial.

El resultado (11) es conocido como la integral de difracción de Fresnel. Cuando ésta aproximación es válida, se dice que el observador está en la región de la difracción de Fresnel, o equivalentemente en el campo cercano de la apertura.

Se considera otra aproximación más rigurosa la cual, cuando es válida, gratamente simplifica los cálculos. Según la ecuación (11), en la región de difracción de Fresnel, la potencia del campo observado $U(x, y)$ puede ser encontrada calculando la trasformada de Fourier del producto de la distribución de la apertura $U(x', y')$ y una función de fase cuadrática. Si a la aproximación de Fresnel se adiciona la aproximación (Fraunhofer),

$$z \gg \frac{k(x'^2 + y'^2)_{\max}}{2} \quad (12)$$

Esto se satisface cuando el factor de fase cuadrático bajo el signo de integral en la ecuación (11) es aproximadamente uno sobre toda la abertura, la potencia del campo observado puede ser encontrada directamente de la transformada de Fourier de la distribución de la abertura en sí misma. De esta manera en la región de difracción de Fraunhofer (o de forma equivalente, en el campo lejano) el campo observado es,

$$U(x, y) = \frac{e^{jkz} e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)}}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x', y') \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(xx' + yy')\right] dx' dy' \quad (13)$$

aparte de los factores de fase multiplicativos que anteceden la integral, esta expresión es sencillamente la transformada de Fourier de la distribución de la apertura.

Los patrones de difracción de Fraunhofer pueden ser observados a distancias mucho más cercanas que las implicadas en la ecuación (12) con tal que la apertura sea iluminada por una onda esférica convergente hacia el observador, o si una lente positiva es correctamente situada entre el observador y la apertura.

1.3.2. Rejilla de difracción

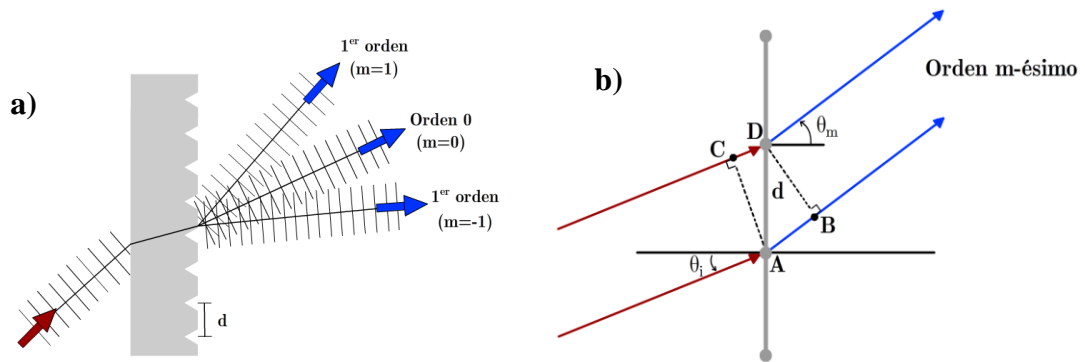
Una rejilla de difracción es un conjunto de elementos difractores de una onda emergente, ya sean aberturas u obstáculos, que tienen el efecto de producir alteraciones periódicas en la fase, amplitud o ambas, el resultado es que un haz monocromático de luz es dividido en múltiples haces llamados órdenes de difracción como se muestra en la figura 7a. El ángulo de estos haces depende del espaciamiento de la rejilla, el ángulo de incidencia y la longitud de onda del haz incidente. Hay un amplio rango de tipos de rejillas de difracción dependiendo de cómo son fabricadas y para que aplicaciones han sido pensadas. Si las variaciones de la rejilla están relacionadas con cambios en la absorción, reflectancia o transmitancia característica del material, es considerada una rejilla de amplitud ya que la rejilla afectará la amplitud de la luz. Si la modulación viene dada por el cambio en el índice de refracción del material o cambios en la distancia recorrida en el material antes de una interface, es llamada rejilla de fase porque afecta la fase de la luz. Dependiendo del material usado, si es transparente o reflectivo, la rejilla puede usarse como un elemento por transmisión o reflexión.

Las rejillas de difracción pueden tener diferentes perfiles tales como las rejillas de perfil sinusoidal, rejillas cuadradas o binarias, triangular o tipo *blazed*. El perfil de la rejilla puede afectar las propiedades de la rejilla como la eficiencia de difracción

Uno de los más simples de tales conjuntos es la configuración de rendijas múltiples, al pasar a través del sistema, el frente de onda se encuentra con regiones opacas y transparentes alternadas, experimentando una modulación en amplitud, una configuración múltiple de rendijas se denomina rejilla de transmisión de amplitud. Otra forma más común de rejilla de transmisión se hace rayando o raspando unas hendiduras paralelas en la superficie de una lámina de cristal clara y plana. Cada hendidura actúa como una fuente de luz esparcida, formando un conjunto regular de fuentes lineales paralelas. Cuando la red es totalmente transparente, de tal manera que la modulación en amplitud sea despreciable, las variaciones regulares del espesor óptico a través de la red dan una modulación en fase obteniendo lo que se denomina rejilla de transmisión de fase (figura 7a) [31].

Cuando la luz incide sobre la superficie de la rejilla esta es difractada por las rendijas. En efecto, cada rendija se convierte en una pequeña fuente de luz reflejada y/o transmitida. La utilidad de las rejillas se deriva del hecho que existe un único conjunto de ángulos donde la luz dispersada de todas las facetas está en fase. La distancia entre rendijas adyacentes y el ángulo de las ranuras afectan el patrón de difracción y la eficiencia de la rejilla.

Figura 7. a) Rejilla de transmisión, **b)** Esquema de una rejilla difracción de transmisión que muestra el orden m-ésimo difractado.



De la figura 7b se observa que la diferencia de camino geométrico entre la luz difractada por rendijas sucesivas en una dirección θ_m está dado por [25, 31]:

$$AB - CD = d(\sin \theta_m - \sin \theta_i) \quad (14)$$

El principio de interferencia dicta que sólo cuando esta diferencia es igual a la longitud de onda de la luz, o un múltiplo entero de ella, la luz estará en fase. En todos los otros ángulos habrá interferencia destructiva entre las onditas originadas en rendijas sucesivas.

La propiedad de las rejillas de difractar la luz incidente en direcciones claramente distinguidas está expresada en una sencilla ecuación, llamada la ecuación de la rejilla:

$$d(\sin \theta_m - \sin \theta_i) = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (15)$$

Donde d es el espacio entre las rendijas, m es un entero llamado orden de difracción, y θ_m es el ángulo de difracción. Se asume que la onda incidente es monocromática y perfectamente colimada y que el plano de incidencia es perpendicular a las rendijas.

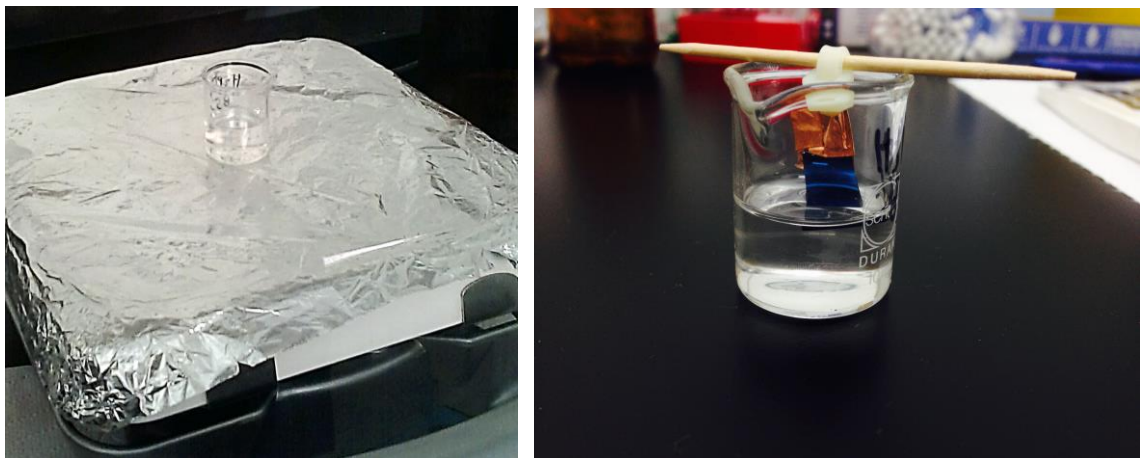
Las rejillas de difracción lineal tienen un amplio rango de aplicaciones en la tecnología moderna, las rejillas circulares comparten propiedades similares a las de su contraparte lineales, pero debido a su simetría circular, pueden ser usadas en una variedad de aplicaciones bidimensionales, por ejemplo las rejillas circulares pueden emplearse en el diseño de un amplio rango de elementos ópticos difractivos como lentes kinoformes, Axicon y lentes híbridas. Sensores ópticos pueden beneficiarse de la geometría bidimensional de las rejillas circulares para reducir la dependencia direccional de las rejillas mientras se intensifica la sensibilidad mediante el uso de plasmones superficiales. Un beneficio adicional de las nuevas técnicas de manufactura empleada para hacer estas rejillas es que pueden ser usadas para la miniaturización de instrumentos y elementos ópticos.

2. FABRICACIÓN

2.1. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

El sustrato utilizado para el proceso de oxidación local anódica por AFM, es una oblea de silicio tipo p con orientación (100) resistividad 0,001-0,005 Ωm con recubrimiento de Si_3N_4 de 100 nm de espesor obtenida por LPCVD estándar según las especificaciones dadas por el fabricante (Waffer University). Pruebas de oxidación local fueron realizadas sobre esta muestra, pero debido al espesor de la capa, no se logró obtener el resultado ya que el Si_3N_4 es un material cerámico. Para obtener un resultado exitoso, la muestra fue sometida a un ataque químico con H_3PO_4 al 80% a una temperatura de 165 °C, esta solución ataca selectivamente el Si_3N_4 . La temperatura requerida se obtuvo usando una placa cerámica de calentamiento (figura 8a), se esperó hasta que la solución alcanzara la temperatura deseada y se procedió a sumergir la muestra controlando el tiempo, este procedimiento debe hacerse en una cabina de extracción. Se trabajó con diferentes tiempos, 10 min, 30 min, 1 hora, 1,5 horas y 2 horas, luego de limpiar la muestra con agua destilada, se procedió a realizar la prueba de oxidación local en cada una de ellas, encontrando que se genera crecimiento de óxido inducido en la muestra que fue sumergida en ácido durante 2 horas.

Figura 8. Esquema experimental ataque químico.



Con el fin de conocer la composición química elemental de la superficie de la muestra se empleó la técnica de Espectroscopia Fotoelectrónica de Rayos X (XPS por sus siglas en inglés). Este tipo de espectroscopia es una técnica ampliamente usada para el análisis superficial que provee información de la composición química de la superficie del material que está siendo estudiado. La profundidad promedio de análisis para una medida XPS es de aproximadamente 5nm. Los espectros XPS se obtienen excitando la superficie de la muestra con Rayos X mono-energéticos de Al $\text{K}\alpha$, generando la emisión de foto-electrones provenientes de la superficie de la muestra. Un analizador de energía de electrones es usado para medir la energía de los fotoelectrones emitidos. A partir de la energía de enlace y la intensidad de los picos es posible determinar los elementos presentes, el estado químico y la cantidad de cada uno de ellos.

Los análisis cuantitativos se realizan mediante estudio de la relación de áreas delimitadas por cada pico para los diferentes elementos. Introduciendo los factores de corrección propios del software de control del dispositivo, se puede determinar el porcentaje de cada elemento presente

Los resultados obtenidos para la muestra atacada durante 2 horas se muestran en la figura 9 y la tabla 1.

Figura 9. Espectro XPS del sustrato utilizado para la oxidación local.

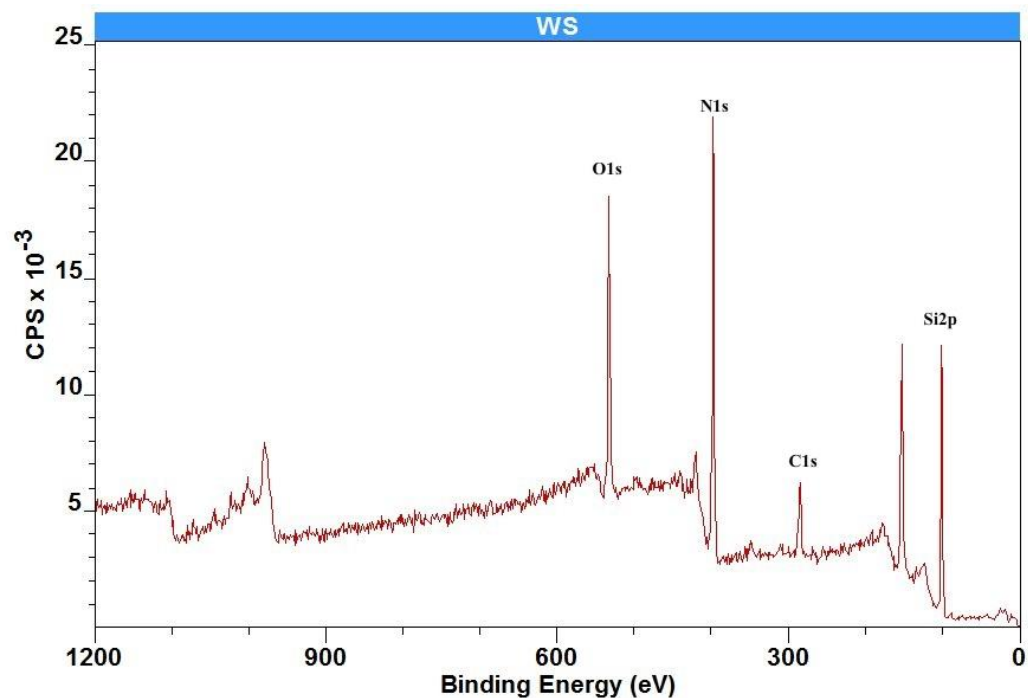


Tabla 1. Composición elemental de la superficie del sustrato.

Elemento	% Concentración
O 1s	11,128
N 1s	26,61
C 1s	12,768
Si 2p	46,493

El espectro obtenido y la tabla de porcentajes de concentración de cada uno de los elementos indican la presencia de nitrógeno en la superficie de la muestra. Esto muestra que el espesor de la capa de nitruro de silicio fue reducido mediante el ataque selectivo pero no eliminada en su totalidad, este resultado se tuvo en cuenta para describir la cinética de la reacción de oxidación (sección 1.2.1.2.). El porcentaje de carbono y oxígeno en la muestra indica la presencia de contaminantes orgánicos en la superficie.

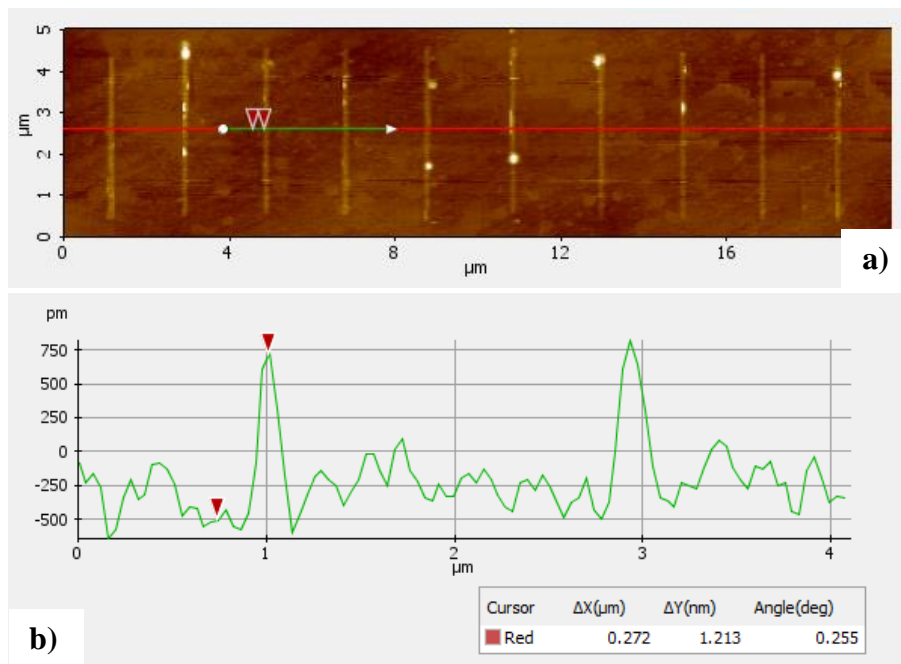
2.2. OXIDACIÓN LOCAL

Para la implementación de la técnica de oxidación local anódica, el primer paso es el estudio de los parámetros experimentales que influyen en el proceso de oxidación. La humedad del ambiente, las características de la punta, el voltaje aplicado y la velocidad de barrido son parámetros que afectan las dimensiones del óxido creado [23]. En este caso se explora la dependencia de las dimensiones del óxido con dos de estos parámetros experimentales: el voltaje aplicado y la velocidad de barrido, los cuales se pueden manipular directamente. Con este fin se realizaron líneas paralelas en el sustrato usando un microscopio de fuerza atómica Park System NX10 [10, 26] operado en aire y en modo contacto, usando una punta de silicio con recubrimiento duro de cobalto-cromo, radio nominal 35 nm y constante de fuerza $k = 1-5$ N/m. Este estudio se realizó en dos etapas, en la primera se realizaron líneas paralelas trabajando con diferentes valores de voltaje aplicado desde 1 V hasta 10 V, que es el voltaje máximo que entrega el sistema, a una velocidad constante de $0,5\mu\text{m/s}$. En la segunda etapa las líneas generadas se realizaron con un valor de voltaje aplicado constante de -8V , variando la velocidad de barrido desde $0.01\mu\text{m/s}$ hasta $10\mu\text{m/s}$.

El objetivo de este estudio preliminar fue conocer las posibilidades en cuanto a las dimensiones del óxido localmente inducido en la superficie y de allí extraer los parámetros

adecuados para la realización del patronamiento; con este fin se midió el ancho y la altura de cada una de las líneas diez veces para encontrar el valor promedio y se calculó la desviación estándar como medida de la homogeneidad del parámetro medido. La cuantificación de las dimensiones de interés se realizó con el software para el tratamiento de imágenes XEI Version 4.1.0, midiendo el ancho y altura de la línea en el perfil transversal (Figura 10) este procedimiento se realizó 10 veces para cada una de las líneas trazadas, se calculó el promedio aritmético y la desviación estándar.

Figura 10: a) Líneas de óxido a diferentes velocidades de barrido, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, y 1 $\mu\text{m/s}$ de izquierda a derecha. b) Perfil transversal correspondiente a la línea verde.



Las figuras 11, 12, 13 y 14 corresponden a las gráficas de los resultados obtenidos en la primera etapa de este análisis experimental en el cual se realizaron líneas tomando valores de voltaje entre -1 a -10 V con un paso de 1V, a partir de los datos se puede observar la relación existente entre las dimensiones del óxido y el valor absoluto del voltaje aplicados los cuales muestran una dependencia lineal tanto para el ancho como la altura de la línea.

Figura 11. Gráfica del ancho de línea promedio en función del valor absoluto del voltaje aplicado.

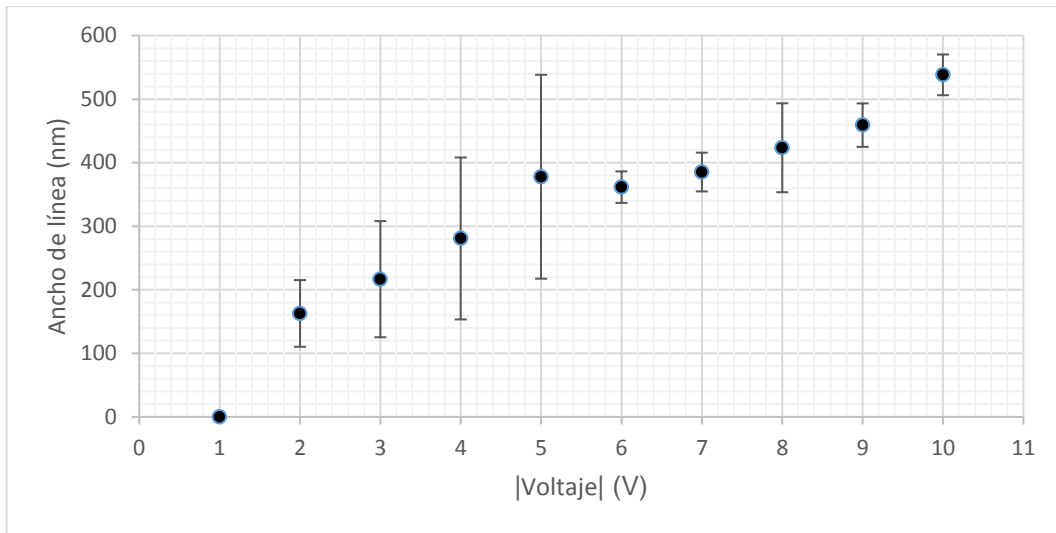
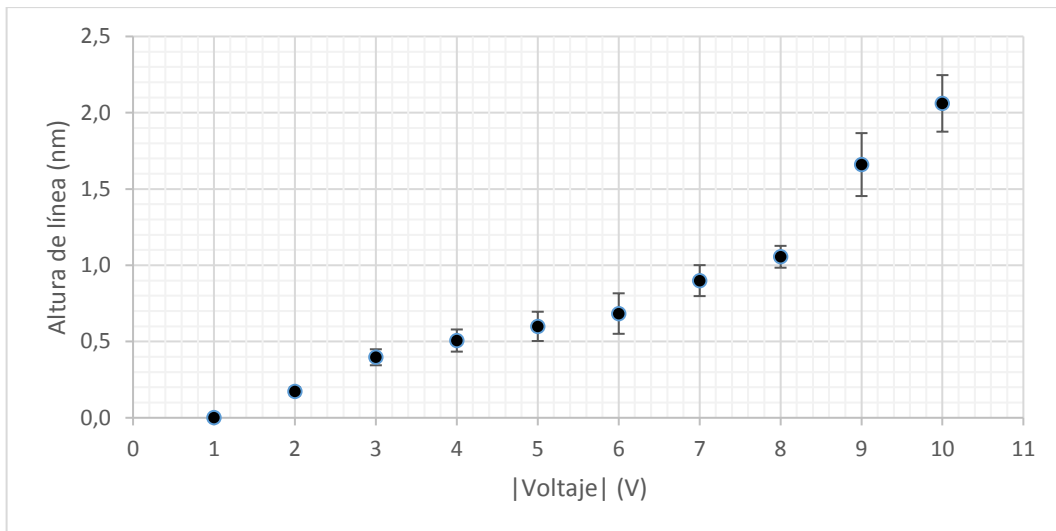


Figura 12. Gráfica de la altura de línea promedio en función del valor absoluto del voltaje aplicado.



Se realizó una regresión lineal usando los datos consignados en las gráficas 11 y 12, cuyo resultado (ecuaciones 16 y 17) respalda la tendencia lineal que se observa en los datos, permitiendo establecer que existe un comportamiento lineal entre el ancho y la altura de línea y el valor absoluto del voltaje aplicado hallando un valor mínimo para la dimensión lateral

del óxido de 162 nm a un voltaje de -2 V. Cabe indicar que no se obtuvo resultado para el voltaje más bajo, -1V.

$$w(V) = 49,9V + 45,6; \quad R^2 = 0,91 \quad (16)$$

$$h(V) = 0,2V - 0,3; \quad R^2 = 0,91 \quad (17)$$

Los resultados de la segunda etapa de este procedimiento experimental se muestran en las figuras 13 y 14, en esta etapa se varía la velocidad de barrido tomando los siguientes valores: desde 0,01 $\mu\text{m/s}$ hasta 0,09 $\mu\text{m/s}$ con paso de 0,01 $\mu\text{m/s}$, desde 0,1 $\mu\text{m/s}$ hasta 0,9 $\mu\text{m/s}$ con paso de 0,1 $\mu\text{m/s}$, desde 1 $\mu\text{m/s}$ hasta 10 $\mu\text{m/s}$ con paso de 1 $\mu\text{m/s}$. el voltaje aplicado manteniendo la velocidad constante. A partir de estas gráficas es posible escoger los parámetros de velocidad y voltaje adecuados para la realización del patrón periódico, la humedad relativa del ambiente, la cual es un parámetro no controlado en este experimento, fue medida con un termo-hidrómetro arrojando un valor de 50%.

Figura 13. Gráfica del ancho de línea promedio en función de la velocidad de barrido.

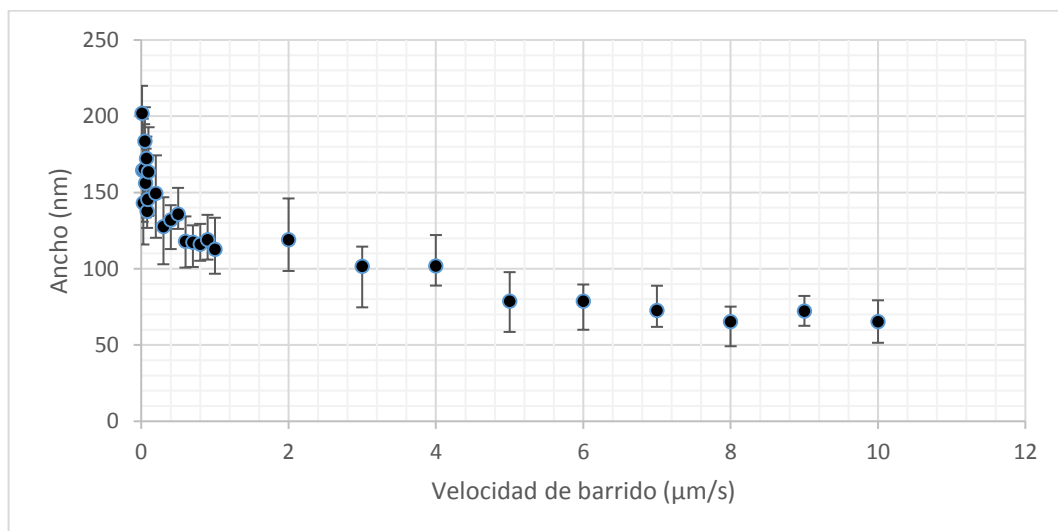
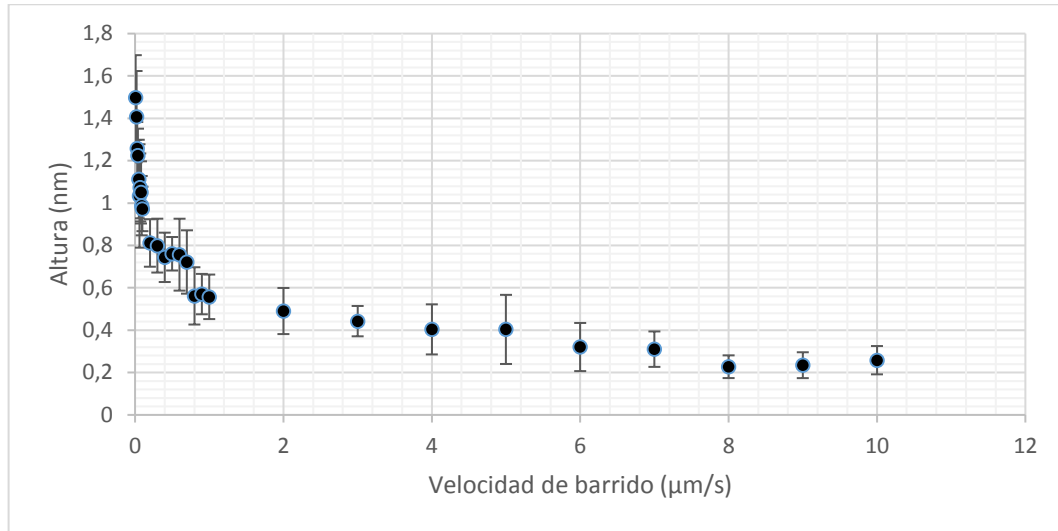


Figura 14. Gráfica de altura de línea promedio en función de la velocidad de barrido.



En las figuras 13 y 14 se puede observar el comportamiento logarítmico del tamaño del óxido con referencia a la variación de la velocidad de barrido, lo cual concuerda con la predicción teórica.

Los datos muestran una dependencia logarítmica tanto de la altura como el ancho con el tiempo. Los resultados de arriba implican un proceso de oxidación que se caracteriza por una alta tasa inicial de crecimiento, que decae rápidamente y se satura.

Usando un ajuste logarítmico de los datos se obtiene la siguiente relación entre el ancho de línea w y la velocidad de barrido ν

$$w(\nu) = -16,95 \text{Ln}(\nu) + 112,71 \quad (18)$$

Y una relación entre la altura de línea h y la velocidad de barrido ν

$$h(\nu) = -0,175 \text{Ln}(\nu) + 0,61 \quad (19)$$

Las cuatro expresiones obtenidas de los datos experimentales (ecuaciones 16 a la 19) concuerdan con las relaciones acopladas para el voltaje aplicado y el tiempo de oxidación obtenidas por otros autores como Avouris y Stievenard [18],

$$\begin{aligned}h &= h_0(V) + h_1(V) \ln(t/t_0) \\w &= w_0(V) + w_1(V) \ln(t/t_0)\end{aligned}\tag{20}$$

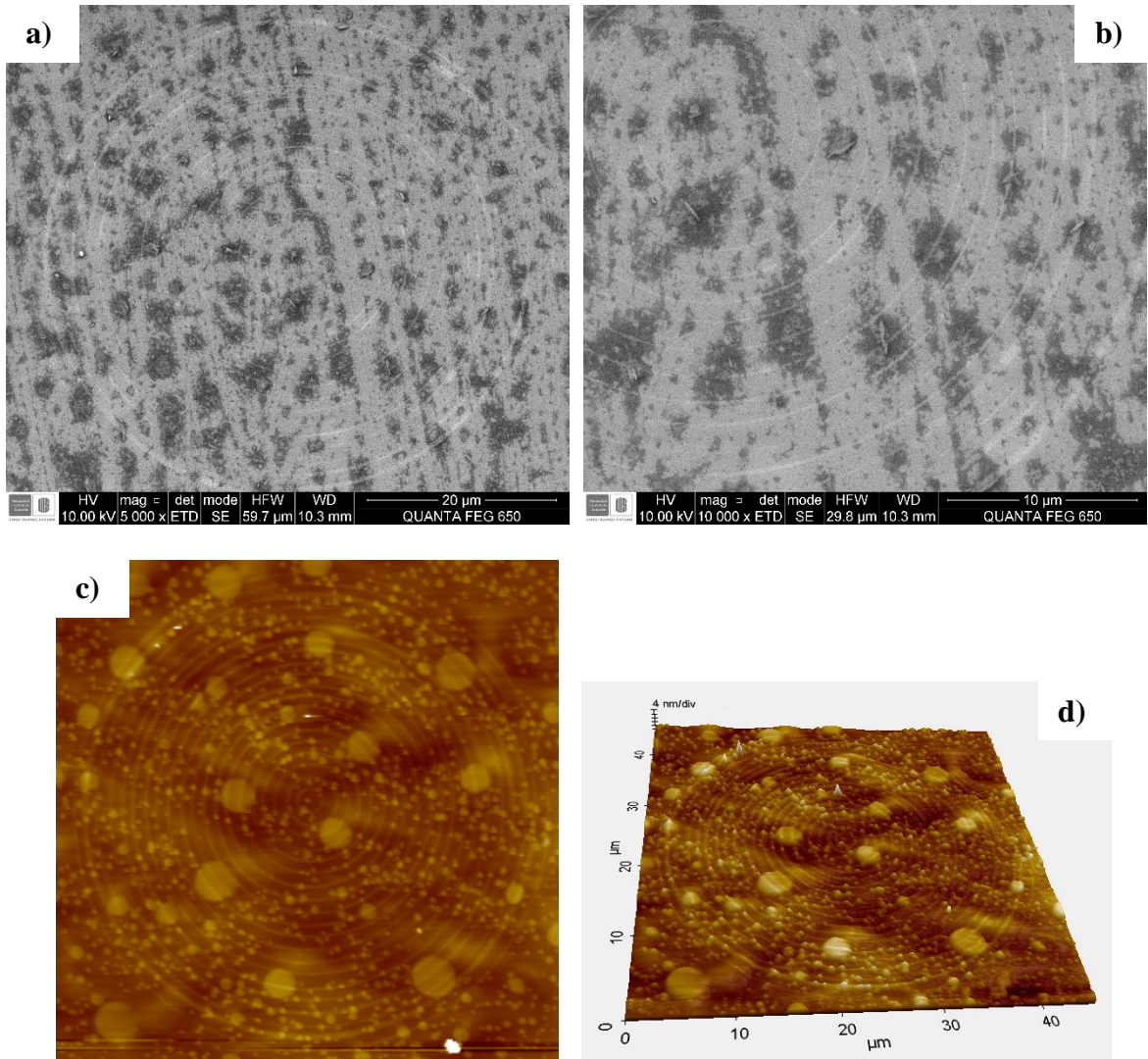
Donde h_0 , h_1 , w_0 y w_1 muestran una dependencia dominante lineal con el voltaje v . En la ecuación el tamaño, el voltaje y el tiempo están expresados en nm, volts, segundos respectivamente. En algunos de los casos los datos pueden ajustarse aproximadamente tanto por leyes de dependencia logarítmica y de potencia [3, 2, 18, 29].

2.3. FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS PERIÓDICAS DE ÓXIDO Y CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA

A partir de los datos obtenidos en el paso anterior se diseñó el patrón a fabricar a través del software de nanolitografía XEL Ver 2.0.0 y se procedió a la escritura de la estructura con el microscopio de fuerza atómica, en total se realizaron tres rejillas cuyas características se describen a continuación. El resultado del proceso de oxidación se verifica a través de imágenes de microscopia de fuerza atómica y electrónica de barrido.

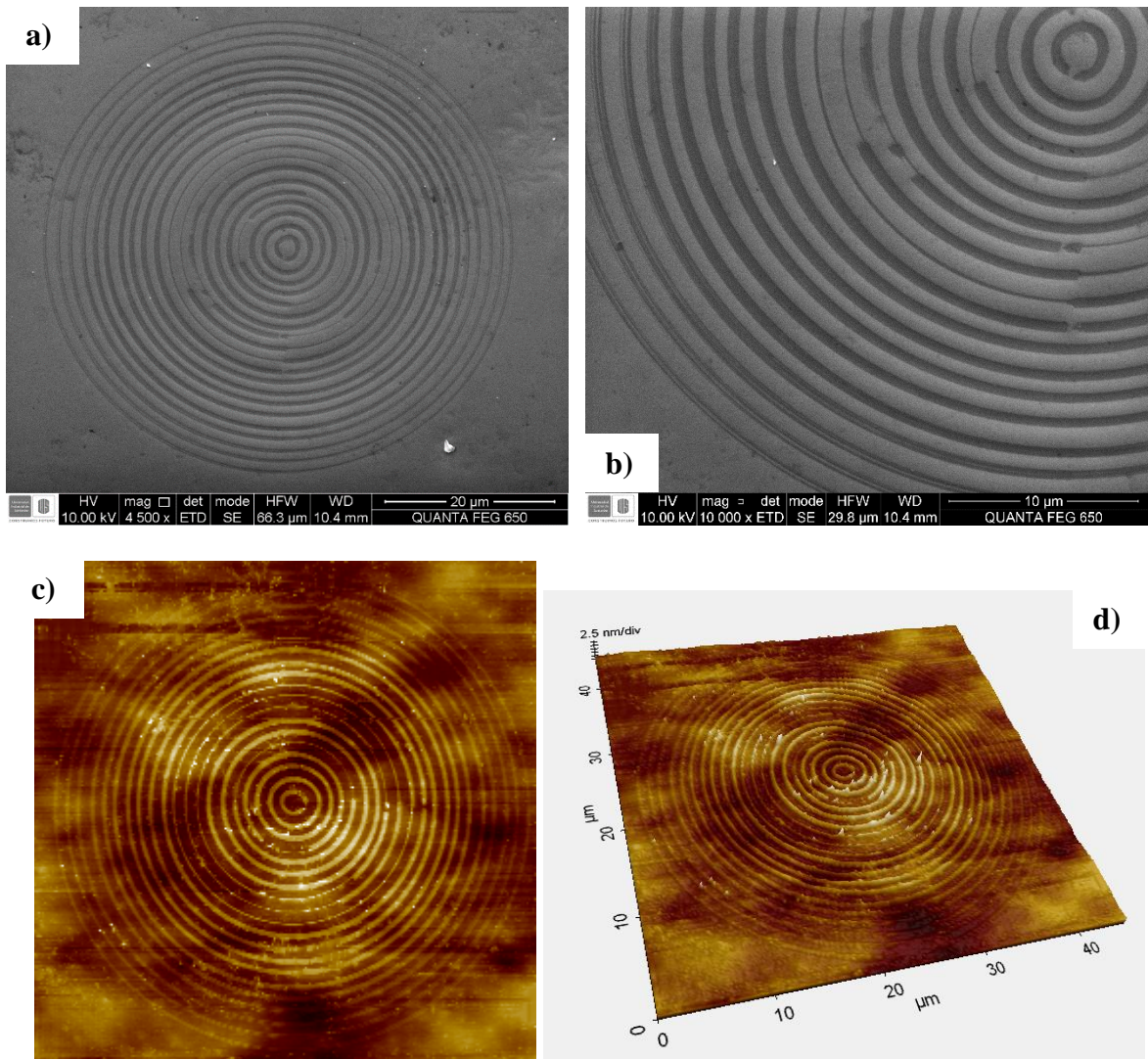
Rejilla 1: el diseño consta de 20 círculos concéntricos con una separación de $1\mu\text{m}$. El grabado de los patrones de óxido se realiza usando las siguientes condiciones experimentales, voltaje aplicado: -8V , velocidad de barrido de $0,5\mu\text{m/s}$, humedad relativa: 50%, Set Point: 12nN y área: $45\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$ (figura 15).

Figura 15. Rejilla 1. **a)** Imagen SEM de la estructura completa, **b)** Imagen SEM a mayor magnificación, **c)** Imagen AFM 2D, **d)** Imagen AFM 3D.



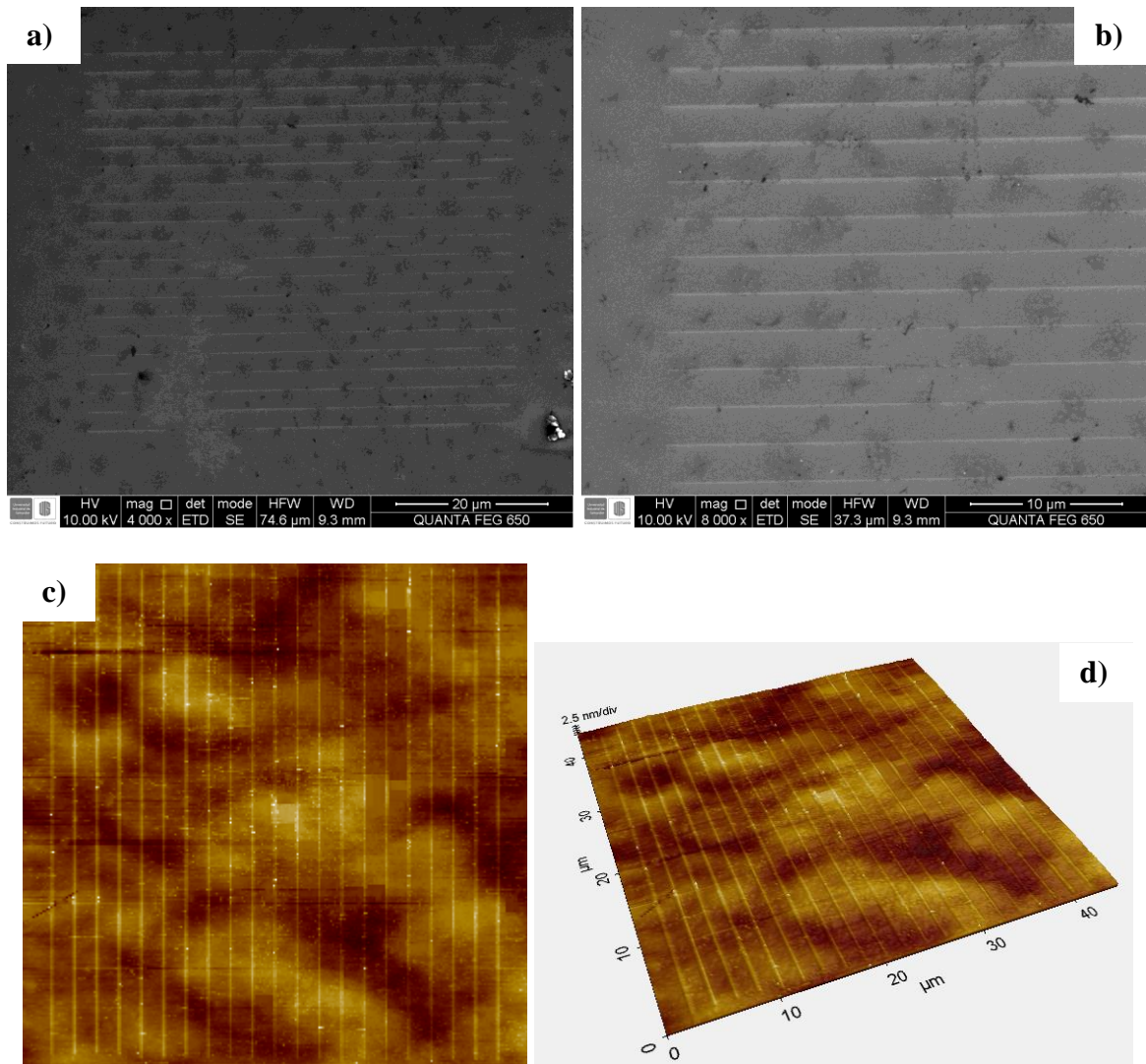
Rejilla 2: el diseño consta de 20 círculos concéntricos con una separación de 1 μm. El grabado de los patrones de óxido se realiza usando las siguientes condiciones experimentales, voltaje aplicado: -9 V, velocidad de barrido de 0,4 μm/s, humedad relativa: 50%, Set Point: 10 nN y área: 45 μm x 45 μm (figura 16).

Figura 16. Rejilla 2. **a)** Imagen SEM de la estructura completa, **b)** Imagen SEM a mayor magnificación, **c)** Imagen AFM 2D, **d)** Imagen AFM 3D.



Rejilla 3: el diseño consta de 21 líneas paralelas con una separación de $2\mu\text{m}$. El grabado de los patrones de óxido se realiza usando las siguientes condiciones experimentales, voltaje aplicado: -10 V , velocidad de barrido de $1\mu\text{m/s}$, humedad relativa: 50%, Set Point: 10 nN y área: $45\mu\text{m} \times 45\mu\text{m}$ (figura 17).

Figura 17. Patrón 3. **a)** Imagen SEM de la estructura completa, **b)** Imagen SEM a mayor magnificación, **c)** Imagen AFM 2D, **d)** Imagen AFM 3D.



Para cada uno de los patrones realizados es de interés conocer la separación entre líneas, el ancho y la altura de línea. Para obtener un valor promedio se tomaron 200 datos en cada caso y se calculó la desviación estándar como medida de la homogeneidad de las líneas grabadas y la capacidad de reproducir de forma experimental el patrón deseado. La medición de estas dimensiones de interés fue realizada usando el software para tratamiento de imágenes XEI ver. 4.1.0 de Park Systems. Los valores promedio se registran en la tabla 2.

Tabla 2. Valor promedio de las dimensiones de interés para los tres patrones generados.

Dimensión Estructura	Separación entre líneas (μm)	Ancho de línea (nm)	Altura de línea (nm)
Rejilla 1	$1,1 \pm 0,1$	372 ± 62	$1,2 \pm 0,4$
Rejilla 2	$1,1 \pm 0,1$	497 ± 71	$1,2 \pm 0,3$
Rejilla 3 (lineal)	$1,90 \pm 0,05$	420 ± 60	$0,8 \pm 0,2$

Las estructuras circulares (rejillas 1 y 2) están conformadas por círculos concéntricos manteniendo una separación entre líneas aproximada al diseño original, al medir el valor promedio se obtiene un valor de $1,1 \mu\text{m}$ con una desviación estándar de $0,1 \mu\text{m}$ (tabla 2). Se observan variaciones en el ancho de línea para estos patrones (Figuras 14 y 15) la cuales pueden atribuirse a inhomogeneidades o contaminación presente en la superficie de la muestra, también debe tenerse en cuenta que la humedad del ambiente la cual es un parámetro fundamental en el proceso de oxidación y es una variable experimental no controlada en este trabajo. Las inhomogeneidades en el ancho de las circunferencias se presentan en mayor medida en la rejilla 2, situación evidenciada por la desviación estándar que toma los valores más grandes.

La estructura periódica lineal, rejilla 3, presenta una separación entre líneas de $1,9 \mu\text{m}$ con una desviación estándar de $0,05$, la cual es pequeña en comparación a la desviación calculada para las estructuras circulares, lo que sugiere que los patrones lineales se replican de forma más confiable. La tabla 2, muestra que la desviación para las dimensiones laterales del óxido son las más pequeñas, recordando que en nuestro caso la desviación estándar es una medida de la homogeneidad de la dimensión correspondiente.

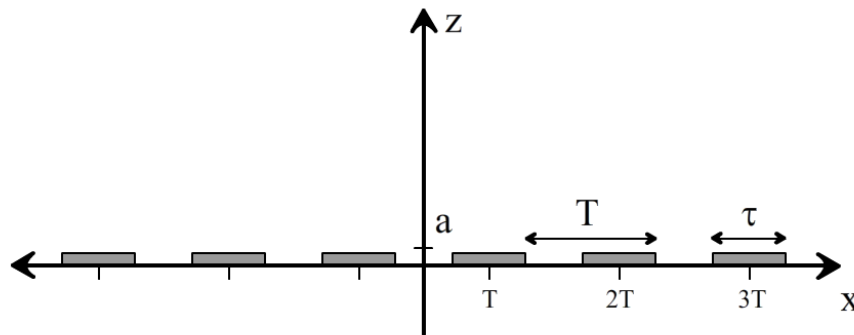
3. DESCRIPCIÓN DE LAS REJILLAS Y OBTENCIÓN DEL PATRÓN DE DIFRACCIÓN

3.1. DESCRIPCIÓN

Cuando la luz incide sobre la superficie de la rejilla esta es difractada por las rendijas. En efecto, cada rendija se convierte en una pequeña fuente de luz reflejada y/o transmitida. La distancia entre rendijas o periodo y el perfil de las mismas afectan el patrón de difracción y la eficiencia de la rejilla [1, 28].

Cada una de las rejillas circulares construidas puede describirse como una rejilla circular binaria a través de una función radialmente periódica cuyo perfil corresponden a funciones rectángulo, mostrado en la figura 18. Esta función puede verse como la superficie 2D la cual se obtiene girando la dirección x positiva de la función unidimensional sobre el eje vertical.

Figura 18. Perfil horizontal de la rejilla circular.



Las rejillas circulares (1 y 2) pueden expresarse a través de:

$$g(r) = a \sum_{n=1}^N \left\{ \text{rect} \left[\frac{r}{2(nT + \tau/2)} \right] - \text{rect} \left[\frac{r}{2(nT - \tau/2)} \right] \right\} \quad (21)$$

Donde T es el periodo de la estructura, τ es el ancho de cada línea de óxido creada y a corresponde a la altura de la línea, la razón τ/T está relacionada con los parámetros medidos anteriormente para las rejillas circulares 1 y 2. La distribución de intensidad en el campo lejano está dada por el espectro de Fourier cuya expresión es:

$$G(q) = a \sum_{n=1}^N \left\{ 4 \left(nT + \frac{\tau}{2} \right)^2 \times \text{jinc} \left[2 \left(nT + \frac{\tau}{2} \right) q \right] - 4 \left(nT - \frac{\tau}{2} \right)^2 \times \text{jinc} \left[2 \left(nT - \frac{\tau}{2} \right) q \right] \right\} \quad (22)$$

Donde $\text{jinc}(q) = J_1(\pi q)/2q$ y J_1 corresponde a la función de Bessel de primer orden. Esta expresión nos muestra que el patrón de difracción de las rejillas circulares está dado por una sumatoria de funciones de Bessel y que las variaciones de valores de T y τ modifican esta distribución de intensidad.

3.2. SIMULACIÓN

Usando Matlab 7.10.0.499 (R2010a) se realizó un código que permite obtener el patrón de difracción calculando la transformada rápida de Fourier la cual corresponde al patrón de difracción de la estructura en campo lejano, tal como lo indica la aproximación de Fraunhofer [14, 28, 27 31]. Las estructuras periódicas fueron simuladas como rejillas de perfil rectangular conservando las relaciones medidas T/τ de cada una de las estructuras construidas, los resultados se muestran a continuación

Figura 19. a) Rejilla de difracción circular 1. b) Espectro de potencia. c) Visualización 3D del espectro de potencia.

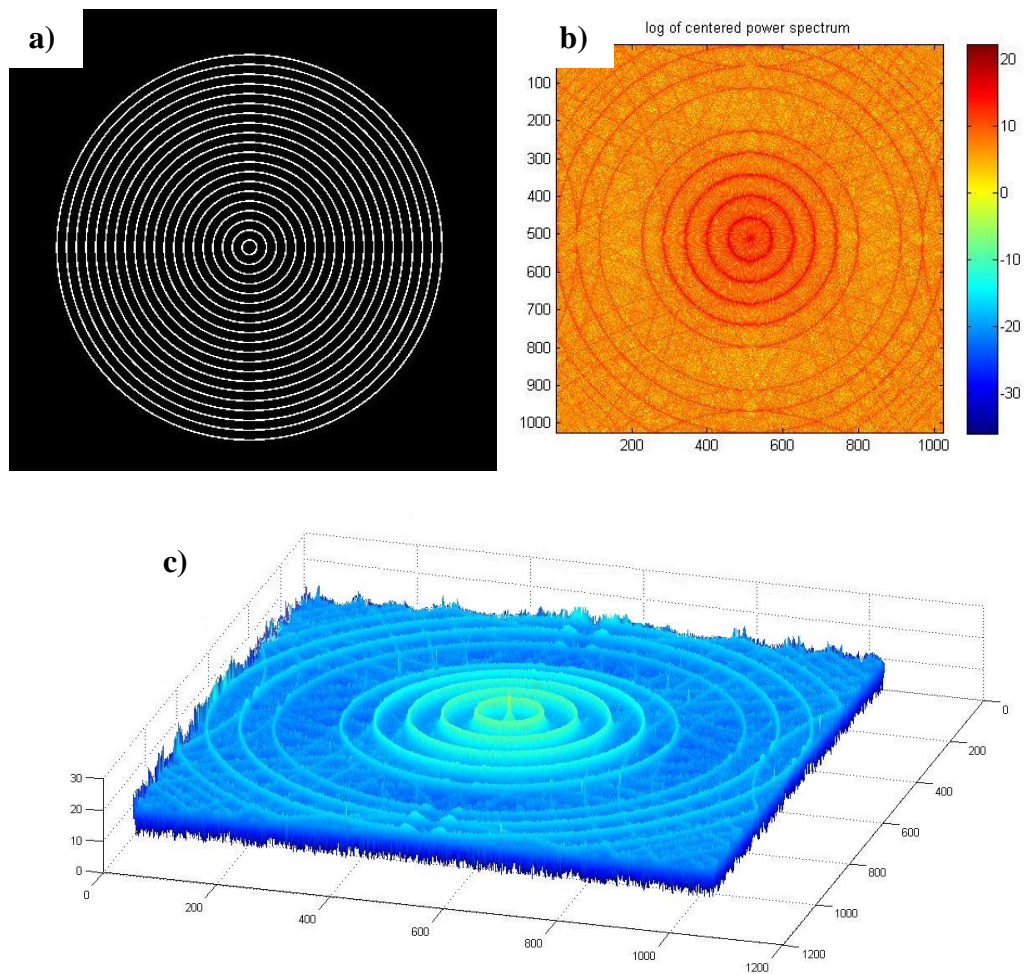
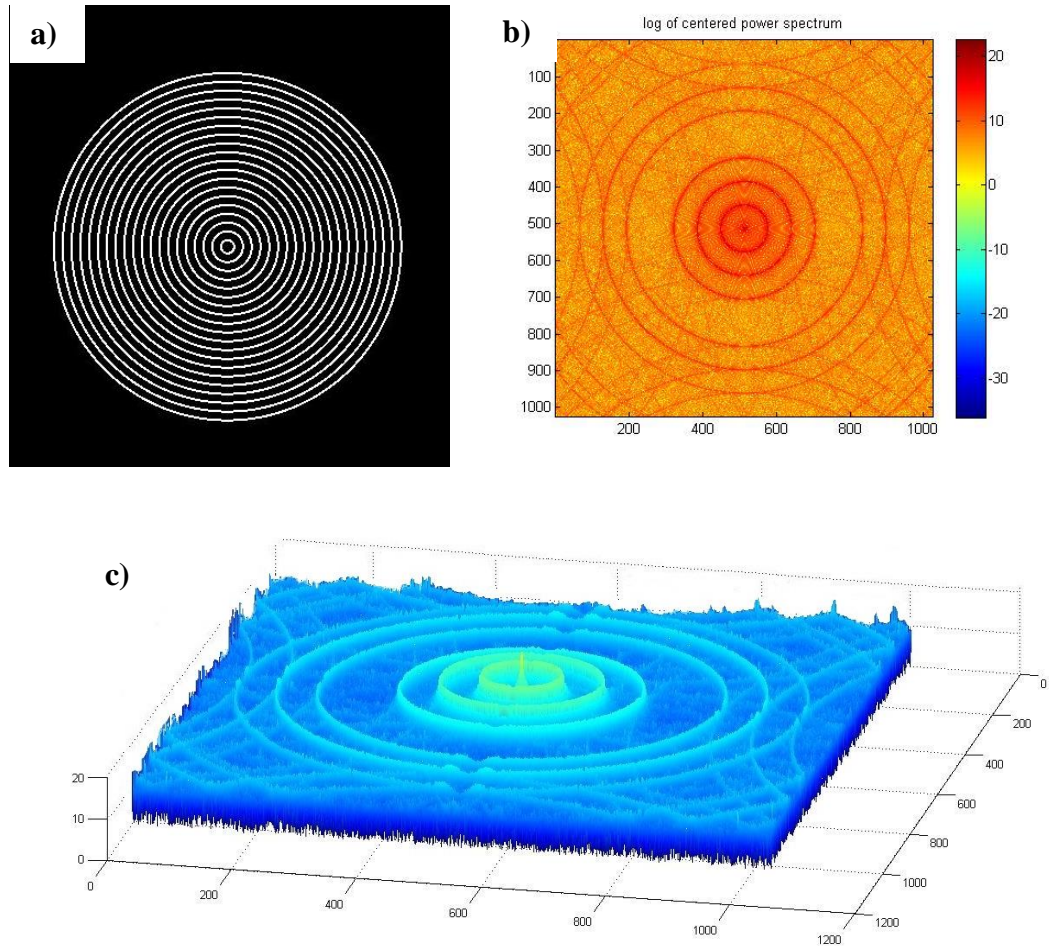
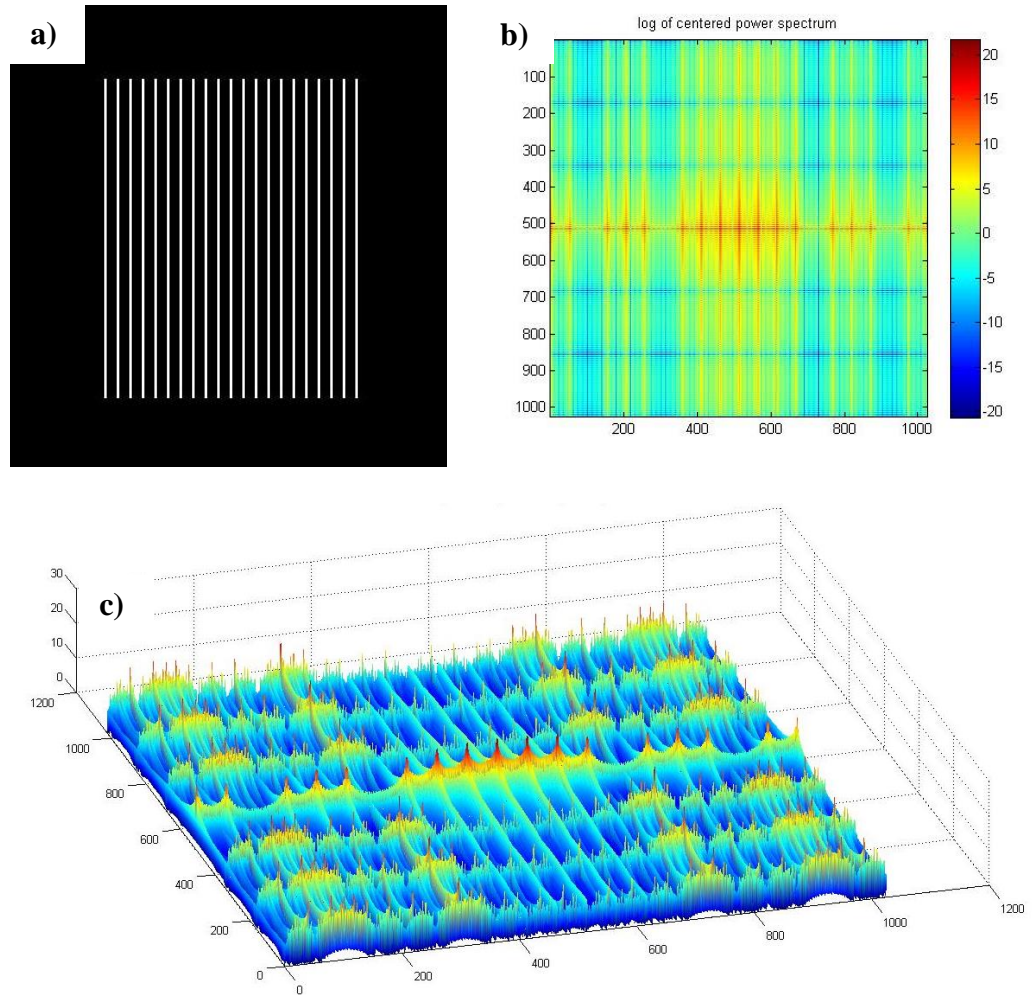


Figura 20. a) Rejilla de difracción circular 2. b) Espectro de potencia. c) Visualización 3D del espectro de potencia.



Las figuras 19 y 20 corresponden a la transformada de Fourier de las rejillas circulares que fueron modeladas con un perfil rectangular (figuras 19 a y 20 a) manteniendo la relación entre el periodo y ancho de la rendija, estas distribuciones de intensidad representan los patrones de difracción esperados para las rejillas de difracción circular y corresponden a círculos concéntricos, vemos que para el caso de la rejilla 2 los anillos se encuentran más espaciados en comparación a la rejilla 1. Se debe tener en cuenta que algunos defectos en los espectros de potencia mostrados se deben a los cálculos numéricos en los bordes, inherentes al cálculo de la transformada de Fourier bidimensional.

Figura 21. a) Rejilla de difracción lineal. b) Espectro de potencia. c) Visualización 3D del espectro de potencia de potencia.

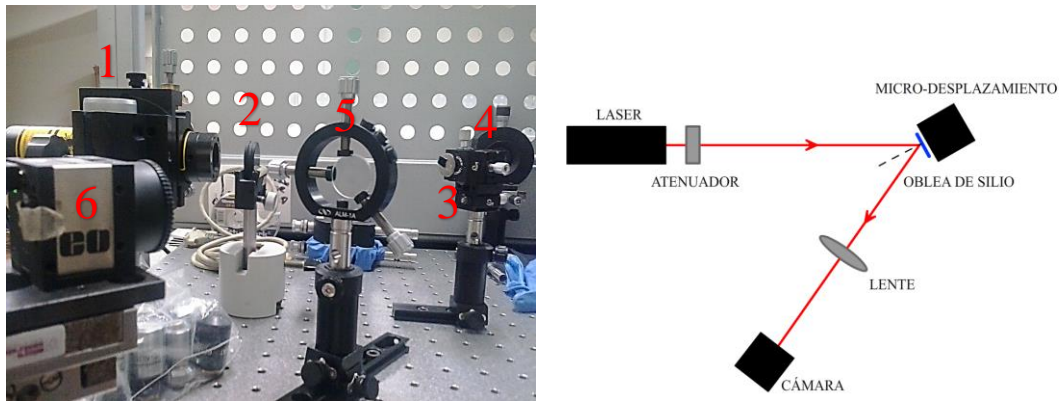


La figura 21 corresponden a la trasformada de Fourier de la rejilla de rendijas rectangulares que fue modelada con un perfil rectangular (figura 21 a) manteniendo la relación entre el periodo y ancho de la rendija, estas distribuciones de intensidad representan los patrones de difracción esperados para esta rejilla.

3.3. MONTAJE ÓPTICO

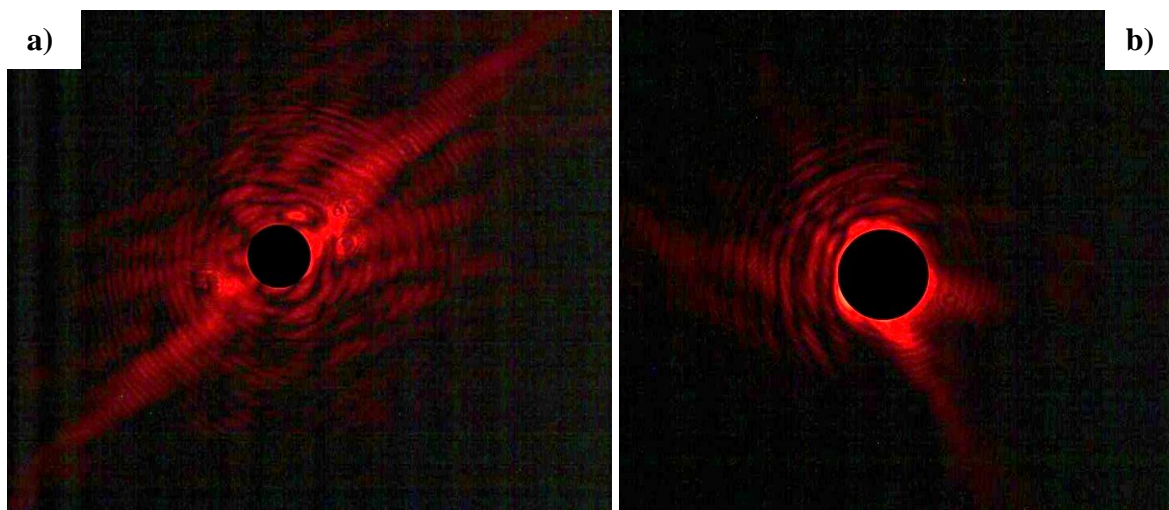
Para la obtención de los patrones de difracción generados por las estructuras periódicas construidas se realizó el montaje óptico mostrado en la figura 22, este arreglo experimental consta de un láser rojo ($\lambda = 633 \text{ nm}$), un atenuador, un micro-desplazamiento con tres grados de libertad en el cual se fija la rejilla de difracción, una lente convergente de 175 mm de distancia focal efectiva y un sensor CMOS con área de censo de $6.5 \times 4.9 \text{ mm}$, 2048 x 1536 píxeles y tamaño de píxel $3.2 \mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$.

Figura 22. Montaje óptico. **a)** 1. Láser, 2. Atenuador, 3. Rejilla de difracción, 4. Micro-desplazamiento, 5. Lente, 6. Cámara. **b)** Esquema del montaje experimental.



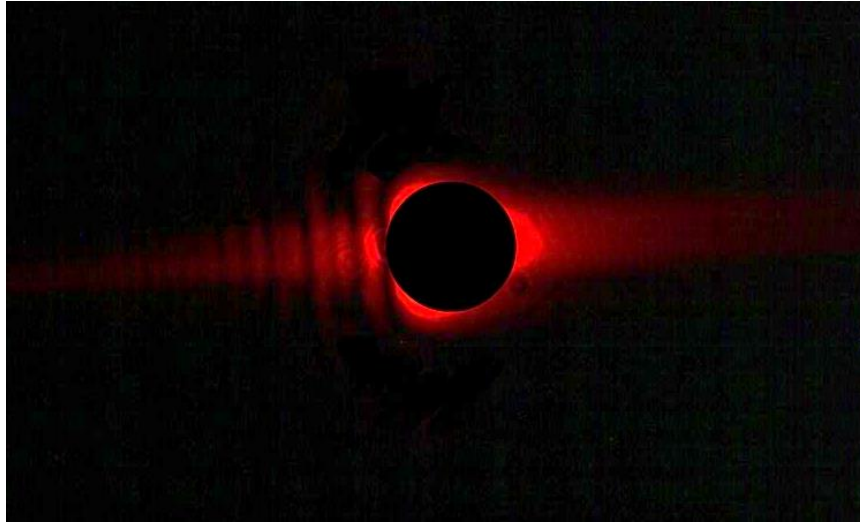
El montaje experimental consiste de un láser rojo de 633 nm de longitud de onda, se coloca frente al haz un atenuador para reducir la intensidad incidente y evitar la saturación de la cámara. El haz láser incide sobre la rejilla de difracción construida a un ángulo de incidencia de 50° con la normal, el haz difractado pasa por una lente de 175 mm de distancia focal y luego es capturado por la cámara. Para lograr que el haz láser incida en el área de interés la cual tiene dimensiones de $45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$, se realiza un barrido del haz sobre la superficie de la muestra, mientras el haz láser permanece fijo, la muestra se desplaza de forma sistemática usando el micro-desplazamiento en el eje x y el eje y. Los resultados obtenidos se muestran a continuación

Figura 23. Patrón de difracción a) Rejilla 1, b) Rejilla 2.



La figura 23 muestra los patrones de difracción obtenidos para las rejillas circulares fabricadas cuya forma concuerda, en gran medida, con la distribución de intensidad esperada en campo lejano (figuras 19 y 20). En todos los patrones fue eliminado el orden central para mejorar la visualización de los demás órdenes de difracción. La obtención de estos patrones muestran que la estructura fabricada puede modificar el frente de onda del haz laser incidente actuando como rejillas de difracción.

Figura 24: Patrón de difracción rejilla 3.



La figura 24 corresponde al patrón de difracción producido por la rejilla lineal, vemos que tiene correspondencia con la forma predicha por la aproximación de Fraunhofer, aunque se evidencia una falta de simetría del patrón.

En los patrones de la figura 23 se observan conjuntos de anillos aunque presentan discontinuidades y distorsión en el patrón de Fraunhofer, estas anomalías son indicio de desviaciones en la forma de la rejilla de difracción y tal como vimos en las figuras 15 y 16, las rejillas presentan defectos en su geometría, estas variaciones en los patrones de difracción obtenidos pueden también estar influenciadas por el ángulo de incidencia del haz laser y presencia de contaminación en la superficie de la muestra.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones se presentan de acuerdo a dos etapas en las que puede dividirse el trabajo, una etapa de fabricación y una etapa de verificación del comportamiento de las estructuras fabricadas.

Etapas de fabricación.

- Los datos obtenidos muestran que existe una relación entre el voltaje aplicado y las dimensiones del óxido cuyo comportamiento es lineal.
- Las dimensiones del óxido muestran una dependencia logarítmica con la velocidad de barrido y por consiguiente con el tiempo de oxidación. Para velocidades bajas ($0,01 \mu\text{m/s}$) presenta dimensiones de $201,9 \text{ nm}$ y $1,5 \text{ nm}$ para el ancho y alto del óxido respectivamente, al aumentar la velocidad de barrido, hasta $10 \mu\text{m/s}$ las dimensiones disminuyen en gran medida, en nuestro caso hasta $65,4 \text{ nm}$ y $0,2 \text{ nm}$ respectivamente (figuras 13 y 14).
- Se fabricaron dos rejillas de anillos concéntricos y una rejilla lineal en áreas de $45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$ con óxido de silicio en un sustrato de silicio con una capa delgada de nitruro de silicio usando la técnica de oxidación local por microscopía de Fuerza Atómica.
- Se comprueba la versatilidad de la técnica de nanolitografía de oxidación local para realizar patrones curvos y lineales ampliando así el espectro de posibles aplicaciones de esta técnica de litografía.
- Se recomienda complementar el estudio de la dependencia del tamaño del óxido con el voltaje aplicado, ya que el sistema usado tiene un valor límite de voltaje de $\pm 10\text{V}$, por lo que se recomienda trabajar con valores de voltaje mayor; para este fin es necesario acoplar una fuente externa de voltaje siguiendo las especificaciones del fabricante del AFM.
- Se recomienda realizar experimentos de oxidación bajo una atmósfera controlada, en la cual se garantice el valor de humedad relativo deseado, para este fin es necesario aislar el microscopio mediante una cámara externa que permita controlar la presión y la inyección de gases como nitrógeno.

Etapas de verificación del comportamiento de las estructuras periódicas.

- Las estructuras de óxido fabricadas se comportan como elementos difractivos, es decir que la manipulación directa de la superficie usando la técnica de nanolitografía de oxidación local permite fabricar dispositivos para la manipulación del frente de onda de un haz incidente.
- Las líneas de las rejillas circulares 1 y 2 realizadas con diferente velocidad y voltaje son círculos concéntricos y la rejilla 3 corresponde a líneas paralelas equidistantes. Apartir de las imágenes de microscopia electrónica y de fuerza atómica adquiridas se realiza un análisis morfológico, en el que se observan defectos de fabricación los cuales son atribuidos a posibles variaciones locales de la humedad relativa durante el proceso de oxidación local y presencia de contaminación en la superficie de la muestra. En el patrón de difracción obtenido se evidencian las inhomogeneidades o defectos presentes en las rejillas construidas ya que se observan discontinuidades en el patrón y falta de simetría.
- Se realizó un montaje experimental que permite la obtención del patrón de difracción a campo lejano, generado por cada una de las rejillas construidas las cuales ocupan un área de $45\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$.
- Se recomienda realizar un montaje óptico para el estudio de la respuesta de la rejilla ante diferentes valores de longitud de onda incidente y con diferentes estados de polarización de la luz.

BIBLIOGRAFÍA

- AMIDROR, Isaac. “Fourier spectrum of radially periodic images”. *J. Opt. Soc. Am. A*. Vol. 14 Abril 1997.
- AVOURIS, P. MARTEL, R. & HERTEL, T. “Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication”. *Appl. Phys. Lett.* 71, 285 1997.
- AVOURIS, P. MARTEL, R. HERTEL, T. & SANDSTROM, R. “AFM-tip-induced and current-induced local oxidation of silicon and metals”. *Applied Physics A Materials Science & Processing*. 66, S659–S667, (1998).
- BHUSHAN, Bharat. Springer Handbook of nanotechnology, 3rd revised and extended edition. Berlin: Springer-Verlag, 2010, 1964 p.
- BIAGIONI, Paolo. HUANG, Jer-Shing & HECHT, Bert. “Nanoantennas for visible and infrared radiation”. *Reports on progress in physics*, 2011.
- BRAGA P. C., RICCI D. *Methods in Molecular Biology*, vol. 242: Atomic Force Microscopy: Biomedical Methods and Applications, Totowa, NJ: Humana Press Inc.
- CHOU, S.Y. KRAUSS, P. R. & RENSTROM, P. J. “Imprint lithography with 25-nanometer resolution”. *Science*, 272:85–87, 1996.
- CUI, Zheng. *Nanofabrication Principles, Capabilities and Limits*. New York: Springer, 2008.
- DAGATAA, J. A. PEREZ-MURANO, F. G. & MORIMOTO, Abadal K. “Predictive model for scanned probe oxidation kinetics”. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 76, Num. 19, 2000.
- diNanolithography V. 1.8 for CPII Operation & Reference Guide, Santa Bárbara, California: Veeco Metrology Group, 2005.
- FANG, T. H. WENG, C. I. & CHANG, J. G. “Molecular dynamics simulation of nanolithography process using atomic force microscopy”. *Surf. Sci.*, 501:138–147, 2002.

FERNANDEZ, Irene. BORRISÉ, Xavier & PÉREZ, Francesc. “Atomic force microscopy local oxidation of silicon nitride thin films for mask fabrication”, *Institute of physics publishing nanotechnology, Nanotechnology* 16 (2005) 2731–2737, 2005.

GARCIA, Ricardo. MARTINEZ, Ramsés & MARTINEZ, Javier. “Nano-chemistry and scanning probe nanolithographies”. *Chemical Society Reviews*, 2005.

GOODMAN, J. W. Introduction to Fourier Optics. Second Edition. New York: McGraw-Hill, 1996.

HONG, Xaio. Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.

HU, Kexiang. WANG, Qingkang & WANGYANG, Peihua. “Role of electric field distribution in local anodic Oxidation”. *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*. 2012.

JEREZ, Martha *et al.* “Characterization of the structure of the coating of multilayers using AFM and Interferometric Microscopy” 2011 *J. Phys.: Conf. Ser.* **274** 012033.

KALININ, Sergei & GRUVERMAN, Alexei. Scanning Probe Microscopy, electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale Volume II. North Carolina: Springer, 2007, 1002 p.

LARA, L. *et al.* “Nanocharacterization of TiN films obtained by Ion Vapor deposition” 2011 *J. Phys.: Conf. Ser.* **274** 012070.

LENG, Yang. Materials characterization Introduction to Microscopic and Spectroscopic Methods. Singapore: JohnWiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2008.

MAJUMDAR, A. ODEN, P. I. CARREJO, J. P. NAGAHARA, L. A. GRAHAM, J. J. & ALEXANDER, J. Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 61:2293–2295, 1992.

MENDOZA, Carolina. Construcción y análisis de una rejilla de difracción usando técnicas de microscopía de fuerza atómica (AFM). Trabajo de grado para optar al título de Físico. Bucaramanga: UIS, 2012.

Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/144412.pdf>

MENDOZA, C. PLATA, A. LIZARAZO Z. & CHACÓN, C. “Analysis of the influence of the applied voltage and the scan speed in the atomic force microscopy local oxidation technique”. *Journal of Physics: Conference Series* 687 2016.

MOHAMMAD, Ali. MUHAMMAD, Mustafa. DEW & Steven K. STEPANOVA Maria. Fundamentals of Electron Beam Exposure and Development. Springer-Verlag/Wien, 2012.

NOVOTNY, Lukas & HECHT, Bert. Principles of Nano-optics. Cambridge, 2006.

NX10 User's manual. Park Systems Corporation, 2013.

ORFANIDIS, Sophocles J. Electromagnetic Waves and Antennas. New Jersey: Rutgers University press, 2004, 1043 p.

O'SHEA, Donald C. SULESKI, Thomas J. KATHMAN, Alan D. & PRATHER Dennis W. Diffractive Optics Design, Fabrication, and Test. Washington: Spie press, 2004, 253p.

REVIE, R. Winston & UHLIG, Herbert H. CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008, 513 p.

SCHAEFER, Hans-Eckhardt. Nanoscience: The Science of the Small in Physics, Engineering, Chemistry, Biology and Medicine, springer, 2010.

SOSKIND, Yakov. Field Guide to diffractive optics. Washington: Spie press, 2011, 135p.

TELLO, Marta. GARCÍA, Fernando & GARCÍA, Ricardo. "Linewidth determination in local oxidation nanolithography of silicon Surfaces". *Journal of applied physics*. Vol. 92, Number 7, 2002.

VILLANUEVA, Luis Guillermo. VAZQUEZ, Oscar. MARTIN, Cristina. SAVU, Veronica. SIDLER, Katrin & BRUGGER Juergen. "Resistless Fabrication of Nanoimprint Lithography (NIL) Stamps Using Nano-Stencil Lithography". *Micromachines* 2013, 4, 370-377.

XIE, X.N. CHUNG, H.J. SOW, C.H. & WEE, A.T.S. "Nanoscale materials patterning and engineering by atomic force microscopy nanolithography". *Materials Science and Engineering*, 2006.