



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Micromaquinado y análisis de cavidades asféricas en silicio monocristalino (1 0 0), con una etapa de fotolitografía.

Presenta:

Maricruz Vargas Toxqui

Tesis sometida como requisito para obtener el grado de

Licenciada en electrónica

Supervisada por:

Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro

FCE-BUAP

Dr. Wilfrido Calleja Arriaga

CD MEMS INAOE

Junio del 2023 Puebla, Puebla



*A mi hija **Melissa C. Vargas**, cuyo amor y cariño han sido la mayor bendición en mi vida, te dedico esta tesis con la esperanza de que siempre sigas adelante y luches por tus sueños.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiar mis pasos y darme la fuerza necesaria para salir adelante.

*A mi pequeña **Melissa**, por entender los momentos de ausencia durante mis obligaciones académicas, por darle sentido a mi vida y motivarme a ser cada día mejor madre.*

*A mis padres **Martha Toxqui** y **Rafael Vargas**, por estar siempre en el momento preciso para extenderme su mano, por todo el esfuerzo que han hecho por mí y por mi educación. También por siempre creer en mí y animarme a seguir adelante.*

*A mis hermanas **Guadalupe Vargas** y **Dulce María Vargas**. En especial a **Lupita** por ser mi hermana mayor y una segunda madre para mi hija, también por todo el esfuerzo y apoyo que me ha brindado para lograr mis metas.*

*A mis sobrinos **Yamileth Gómez** y **Yorel Cuautle** por ser unos niños maravillosos que me motivan y me brindan cariño.*

*A mis abuelos **Clara†**, **Leandro†**, **Carment†** y **Alfonso†** por cuidarme.*

*A mis amigos **Guadalupe Varela**, **María Luisa Monterrosas**, **Eduardo Reyes**, **Jamid Sáenz**, **Valentín Velázquez**, **Ignacio Ramos**, **Ricardo Bolaños** y **Mauricio Huixtlaca** por su valiosa amistad durante todo este tiempo.*

*A mis asesores el Dr. **Roberto C. Ambrosio** y Dr. **Wilfrido Calleja**, por todo el apoyo, paciencia, enseñanzas y consejos para hacer realidad este trabajo.*

*A mis sinodales la Dra. **Sandra Jiménez**, Dra. **Dulce N. Castillo** y Dra. **Karen H. Estévez**, por sus observaciones y comentarios para mejorar esta tesis.*

*A la **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla** y a los **docentes de la FCE**, en especial al M.E. **Alejandro Pérez Gracia**, por todos los conocimientos y enseñanzas que me permitieron concluir mis estudios de licenciatura.*

*A los **técnicos de microelectrónica** del **INAOE** y al **CD MEMS INAOE** por sus instalaciones y contribución en este trabajo.*

*A todo el equipo de **Eureka Ludoteca** por todo su apoyo y enseñanzas.*

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta el uso de técnicas de microelectrónica para maquinar cavidades esféricas en silicio monocristalino (1 0 0), acompañado de un minucioso análisis en la morfología final y en la región gradual de alto índice.

Las microcavidades esféricas se pueden desarrollar utilizando un ciclo sencillo de fotolitografía y grabado húmedo anisotrópico. Donde el diseño geométrico de estas estructuras, se realiza considerando la simetría de los planos y la estructura atómica general en el silicio monocristalino (1 0 0). Logrando cavidades con un desarrollo controlado, morfología variada y excelente reproducibilidad. Su funcionamiento y posibles aplicaciones (como elementos ópticos) dependen directamente de su geometría final. Sin embargo, se ha identificado la falta de un análisis exhaustivo para este tipo de estructuras durante su evolución, particularmente sobre la región gradual de alto índice que se desarrolla dentro de cada cavidad. Esta zona bien definida abre amplias posibilidades para nuevos dispositivos cuyo funcionamiento depende de la orientación de la superficie. El objetivo principal de este trabajo es presentar un análisis a base de micrografías ópticas, micrografías SEM y reconstrucción de las curvaturas con perfilómetro alpha step, que en conjunto permiten el estudio morfológico inicial de la zona esférica de interés.

ABSTRACT

In this thesis work, the novel development of microelectronics techniques for the micromachining of aspheric cavities into monocrystalline silicon (1 0 0) is presented, additionally a thorough analysis on both the final morphology and the gradual high-index region is realized.

Aspheric microcavities can be developed using a simple cycle of photolithography and anisotropic wet etching. Where the geometrical design of these structures, is performed considering the symmetry of the planes and the atomic structure in (1 0 0) silicon. Achieving cavities with controlled development, varied morphology and excellent reproducibility. Their performance and possible applications (as optical elements) depend directly on their geometry. However, the lack of a comprehensive analysis for this type of evolving structures has been identified, particularly on the gradual high-index region that occurs within each cavity. This well-defined zone opens wide possibilities for new devices whose operation depends on the surface orientation. The main objective of this work is to present an analysis based on optical micrographs, SEM micrographs and alpha step profilometer scans, which combined allow a study of the aspheric zone of interest.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
CONTENIDO.....	v
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 HIPÓTESIS.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 METODOLOGÍA	3
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 EL SILICIO COMO SUSTRATO.....	5
2.2 TÉCNICAS DE MICROFABRICACIÓN	6
2.2.1 Oxidación Térmica	6
2.2.2 Fotolitografía Óptica	9
2.2.3 Grabado Químico	11
2.3 MICROMAQUINADO DE VOLUMEN DE SILICIO.....	13
2.3.1 Grabado húmedo anisotrópico del Silicio.....	14
2.3.2 Solución KOH: H ₂ O.....	16
CAPITULO 3. FABRICACIÓN	24
3.1 MASCARILLA (LAYOUT).....	24
3.2 MÉTODO DE FABRICACIÓN	26
3.3 MECANISMO DE GRABADO	27
CAPITULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	32
4.1 CAVIDADES DESARROLLADAS CON 3 HORAS DE GRABADO A “SUPERFICIE ABIERTA”.....	32
4.2 CAVIDADES DESARROLLADAS EN T=6 HORAS DE GRABADO A “SUPERFICIE ABIERTA”.....	40
4.3 ANÁLISIS FENOMENOLÓGICO DEL MECANISMO DE GRABADO	49
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.5 APLICACIONES.....	53
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	54
5.1 CONCLUSIONES.....	54
5.2 TRABAJO A FUTURO	55
REFERENCIAS	56

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

Los antecedentes en la fabricación de microcavidades esféricas se asocian a la producción de microlentes; suceso que se remonta al siglo XVII. Cuando Hooke fundió pequeños filamentos de vidrio y observó que la tensión superficial en el vidrio fundido formaba superficies esféricas lisas de dimensiones reducidas, entonces las utilizó como accesorios en sus microscopios. Los avances en la tecnología han permitido diseñar y fabricar microlentes mediante una variedad de métodos [1]. Biebuyck et al. introdujeron un método para formar microlentes empleando monocapas autoensambladas (SAM) que se utilizan para modelar regiones hidrofóbicas e hidrofílicas y así formar lentes [2]. Pan et al. introdujeron el método de moldeo el cual consiste en introducir plástico fundido en orificios de forma circular hasta la profundidad deseada, posteriormente por enfriamiento se forman las microlentes [3]. Choo et al. utilizaron un método diferente, mediante una impresora de inyección de tinta comercial lograron imprimir microlentes, que pueden producirse en la mayoría de superficies o estructuras [4].

Las microlentes han llamado mucho la atención en los últimos años debido a sus aplicaciones en sensores ópticos o bioquímicos, interconexión óptica y ojos compuestos [5]. La mayor parte de trabajos de investigación para fabricar estas estructuras usan diferentes materiales como polidimetilsiloxano (PDMS), vidrios, cristales líquidos, silicio, entre otros. Siendo el silicio el material que ha tomado mayor importancia por las ventajas que presenta, entre ellas la compatibilidad con técnicas de microelectrónica que pueden aplicarse a la fabricación de Circuitos Integrados (IC), Óptica Integrada y Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS). Actualmente por medio de fotolitografía y grabado químico de semiconductores, ha sido posible la fabricación de microlentes ópticas sobre sustratos de silicio monocristalino, con aplicaciones en el rango visible e infrarrojo [6].

En esta tesis se presenta un proceso de fabricación de microcavidades esféricas, que utiliza como referente el trabajo reportado por Kendall [7, 64]. El micromaquinado de volumen de silicio, es el enfoque principal para dar forma a las cavidades, a través de un mecanismo de grabado anisotrópico basado en la simetría de la familia de planos $\{1\ 0\ 0\}$ de la red cristalina del silicio, que permite el desarrollo controlado de las microcavidades esféricas con sagitas predecibles.

Las principales aplicaciones de estas cavidades en silicio monocristalino, se han encontrado en la óptica integrada, sin embargo, en su fabricación solo se verifica la obtención de superficies esféricas simétricas y reproducibles, sin abundar en los detalles del procedimiento de fabricación. Por lo anterior, se ha identificado la falta de un análisis detallado respecto a la morfología de las cavidades durante su evolución, principalmente en la zona esférica producida dentro de cada cavidad. El estudio de la zona esférica o zona gradual de alto índice abre grandes oportunidades para la física de superficies y aplicaciones relacionadas, y además conduce a nuevas posibilidades para obtener variadas microestructuras 3D.

Los capítulos de esta tesis están organizados de la siguiente manera: En el capítulo 2, se presenta el marco teórico donde se abordan aspectos básicos de los planos y direcciones de la red cristalina del silicio. Descripción básica de las técnicas involucradas en el proceso de fabricación, el micromaquinado de volumen, el grabado húmedo anisotrópico y el uso de hidróxido de potasio (KOH) como solución grabante. En el capítulo 3, se describe el mecanismo de grabado, y proceso de fabricación. En el capítulo 4 se presenta los resultados de las micro cavidades fabricadas con 3 y 6 horas de grabado en el segundo micromaquinado, el análisis fenomenológico y la discusión de resultados. Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y trabajo a futuro.

1.1 HIPÓTESIS.

Por medio del micromaquinado de volumen con solución acuosa de hidróxido de potasio (KOH:H₂O), sobre Si (1 0 0) se pueden fabricar estructuras simples; como son las cavidades esféricas. En la morfología interna de estas estructuras se ha identificado una superficie con curvatura compuesta, denominada región gradual de alto índice. La importancia de esta zona es su estudio, identificación y posible uso como sustratos monocristalinos de alto índice, que abre amplias posibilidades para fabricar nuevos dispositivos cuyo funcionamiento depende de la orientación cristalina de la superficie.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

La novedad se basa en aprovechar la simetría de la red cristalina de silicio con los planos {1 0 0}, para incorporar técnicas de microelectrónica y desarrollar microcavidades esféricas variadas en la superficie del silicio (1 0 0). Por otro lado, la técnica para la fabricación de las cavidades, necesita un estudio acucioso para aprovechar al máximo nuevas posibilidades de prototipos mediante el micromaquinado de volumen con grabado húmedo anisotrópico.

La fabricación de las estructuras será posible gracias a la tecnología existente en el laboratorio de microelectrónica del INAOE, los procesos bien caracterizados, lo reportado en la literatura y/o trabajos de investigación previos, que hacen viable la fabricación y análisis de nuevas variantes de microcavidades en silicio (1 0 0). Finalmente, este tipo de estructuras y los sustratos de alto índice, han sido la base para el desarrollo de proyectos de investigación con objetivos y/o aplicaciones en la fabricación de microestructuras y dispositivos novedosos en el INAOE.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo general.

Describir la morfología final para las diferentes microcavidades esféricas fabricadas sobre superficie de silicio (1 0 0), y presentar tres criterios de aproximación del diámetro y curvatura

que comprende la zona central que se comporta químicamente como superficie (1 0 0), estableciendo los principios del estudio que conduzca a proponer aplicaciones novedosas.

1.3.2 Objetivos específicos.

A fin de cumplir con el objetivo general, se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar el patrón geométrico (layout) en L-Edit para la fabricación de las mascarillas.
2. Revisar el proceso y fabricar las cavidades esféricas sobre Si (1 0 0) en dos tiempos de grabado, dos muestras con 3 horas de grabado y dos muestras con 6 horas de grabado (segundo micromaquinado).
3. Realizar inspección geométrica y mediciones de las cavidades y obtener imágenes con el microscopio óptico Leitz Orthoplan, después del primer y segundo micromaquinado.
4. Analizar y obtener micrografías con el microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) de las cavidades ya finalizadas.
5. Para realizar el análisis de las curvaturas dentro de cada cavidad, se realiza la reconstrucción de las estructuras con el perfilómetro de contacto alpha step, a través de un perfil de barrido de la siguiente manera: vertical H, horizontal T y contador de 45 grados N y B.

1.4 METODOLOGÍA.

Después de la fabricación se abordan aspectos generales sobre la evolución de las microcavidades y sus características morfológicas desarrolladas después de 3 y 6 horas de grabado (en el segundo micromaquinado), se discuten sus características más particulares de la morfología y la zona gradual de alto índice. La evolución de las características morfológicas se analiza con microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM). Finalmente, con el perfilómetro Alpha step se realiza la reconstrucción de la curvatura de cada cavidad, de la siguiente manera: barridos vertical H, horizontal T y diagonales a 45 grados N y B, tal como se muestra en la Fig.1.1. Para el análisis de la zona gradual de alto índice se añade un barrido dividido a la mitad, en escala semilogarítmica, donde se analiza el diámetro interno (D_i) de la zona circular que delimita la cavidad esférica.

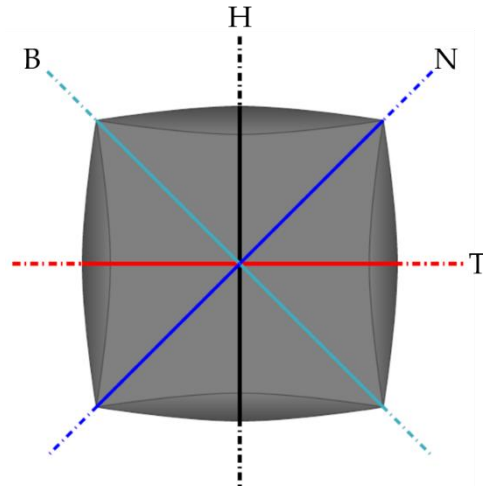


Figura 1. 1 Barridos H, T, N y B, con alphastep.

Los patrones de interés tienen una dimensión inicial $d_1=6\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $16\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ y $200\mu\text{m}$. Para las cavidades con $d_1=6\mu\text{m}$ hasta $d_1=20\mu\text{m}$, el mecanismo de evolución a partir de las pirámides invertidas es igual, una vez establecida la sagita, después el análisis se encamina al grabado de las paredes laterales y amplitud de la cavidad. Para todas las cavidades grabadas, se propone un esquema de análisis de la superficie de fondo, con la intención de discernir sobre la amplitud de la supuesta región central plana, que se aproxima a una superficie (1 0 0). Para ello se proponen 3 alternativas que surgen a partir de la idea siguiente: con el establecimiento de la sagita, al proseguir el grabado y con la evidencia que la sagita no se modifica, entonces la superficie central plana debe poseer una extensión suficientemente amplia en proporción al perímetro de la cavidad bajo desarrollo. De lo anterior se proponen las 3 alternativas siguientes: a) analizar extensión de la región central con profundidad 0.3 micras, b) extensión de la región con profundidad 10% de la sagita y c) extensión de la región con profundidad 0.1 micras. A partir de estas 3 propuestas, al final se hará un análisis general de la morfología de las cavidades.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

Desde la década de 1950, hemos estado viviendo en el "mundo del silicio", como base de la microelectrónica. Después de décadas de avances y la incorporación de muchos materiales nuevos, la plataforma tecnológica central para la computación clásica y los dispositivos electrónicos actuales, sigue estando basada en este material [8]. El estudio del silicio se centró principalmente en la aplicación de circuitos integrados, pero en la actualidad ha sido posible su integración a componentes eléctricos y mecánicos sobre un mismo chip, dando origen a la tecnología de los Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS) o Tecnología de Microsistemas (MTS) [9]. Una de las principales técnicas para la fabricación de MEMS es el micromaquinado de volumen. Esta tecnología básica de fabricación es popular para realizar estructuras como sensores y actuadores, utilizando técnicas de grabado húmedo o seco. A su vez esta tecnología se puede dividir en dos categorías, micromaquinado de volumen y micromaquinado de superficie. Sin embargo, en este capítulo se hace énfasis en el micromaquinado de volumen, siendo el principal mecanismo de fabricación de las cavidades esféricas y tema de estudio del presente trabajo.

2.1 EL SILICIO COMO SUSTRATO.

El silicio (Si), es un elemento que se encuentra en el grupo IV de la tabla periódica. En su forma monocristalina, es más ligero y más duro que el acero. Sus propiedades eléctricas se pueden modificar introduciendo impurezas, es decir, elementos de los grupos III y V de la tabla periódica [9]. Se estima que es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre, lo que lo hace un material de bajo costo. Ningún otro material semiconductor puede competir con el silicio en términos de baja densidades de defectos, tiempos de vida prolongados de portadores minoritarios, perfección de la interface semiconductor/dieléctrico y alto control de dopaje [10].

Para su uso en la microelectrónica el silicio se encuentra tanto en forma monocristalina como policristalina. En el primero, todos los átomos están alineados en el mismo arreglo de red cristalina, en el segundo caso, el material está formado por diversos cristales de silicio más pequeños. Para los procesos de micromaquinado los sustratos de silicio utilizados son todos de forma monocristalina [11].

Para obtener las obleas de silicio que se utilizan en los procesos de microelectrónica, se crece un lingote de silicio por el método Czochralsky (CZ) o Zona Flotante (FZ), los extremos del lingote se cortan, para definir un cilindro con los extremos planos. Después de este paso, se maquina longitudinalmente para obtener un lingote con el diámetro uniforme, como se muestra en la Fig. 2.1a. Posteriormente, se cortan dos planos a lo largo del lingote para indicar la orientación del cristal y el tipo de dopaje.

El plano más grande se llama plano primario o principal y funciona como plano de referencia para el equipo de procesamiento automático y establece la dirección de referencia para alinear el patrón de mascarilla a lo largo de una dirección cristalográfica específica, particularmente se utiliza en el micromaquinado de volumen basado en grabado húmedo [9]. En el caso de las obleas $\{1\ 0\ 0\}$, se orienta convencionalmente a lo largo de alguna dirección $\langle 1\ 1\ 0 \rangle$.

Después de definir el plano primario, el lingote se corta en obleas individuales (Fig. 2.1b) utilizando una sierra de diamante o un corte con hilo de diamante. El corte de los sustratos determina cuatro parámetros de la oblea: orientación de la superficie, grosor, variación del grosor total (TTV) y curvatura radial.

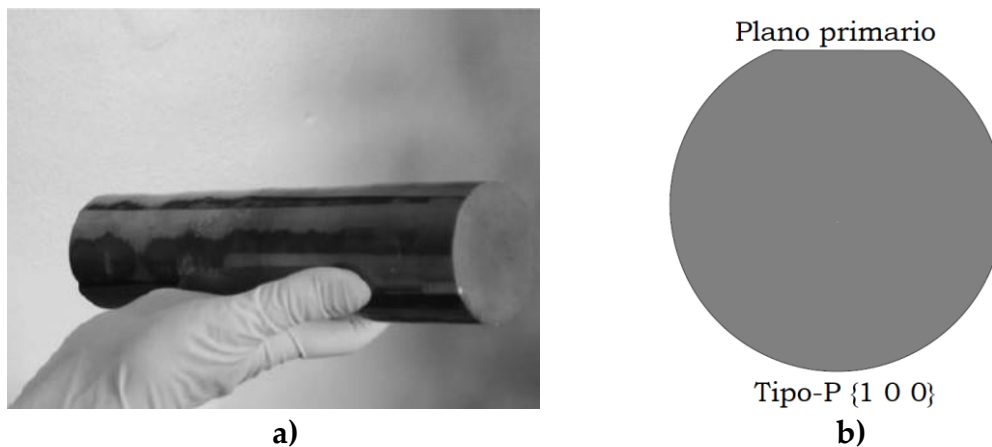


Figura 2. 1 a) Lingote de silicio [9], b) oblea de silicio.

2.2 TÉCNICAS DE MICROFABRICACIÓN.

A continuación, se resumen brevemente tres técnicas de microelectrónica (oxidación térmica, fotolitografía y grabado) necesarias para la fabricación de las cavidades. Estas técnicas también son fundamentales en la fabricación de circuitos integrados y MEMS.

2.2.1 Oxidación Térmica.

El óxido de silicio (SiO_2) generalmente se usa como material enmascarante o aislante en el proceso de fabricación de circuitos integrados [11, 16]. La configuración básica del sistema de oxidación térmica para el crecimiento del SiO_2 , consta de un horno calentado por resistencia eléctrica, un tubo cilíndrico de cuarzo fundido que contiene las obleas de silicio colocadas verticalmente sobre un soporte de cuarzo ranurado y una fuente de oxígeno seco o alternativamente un sistema de ebullición para producir vapor de agua (Fig. 2.2) [17].

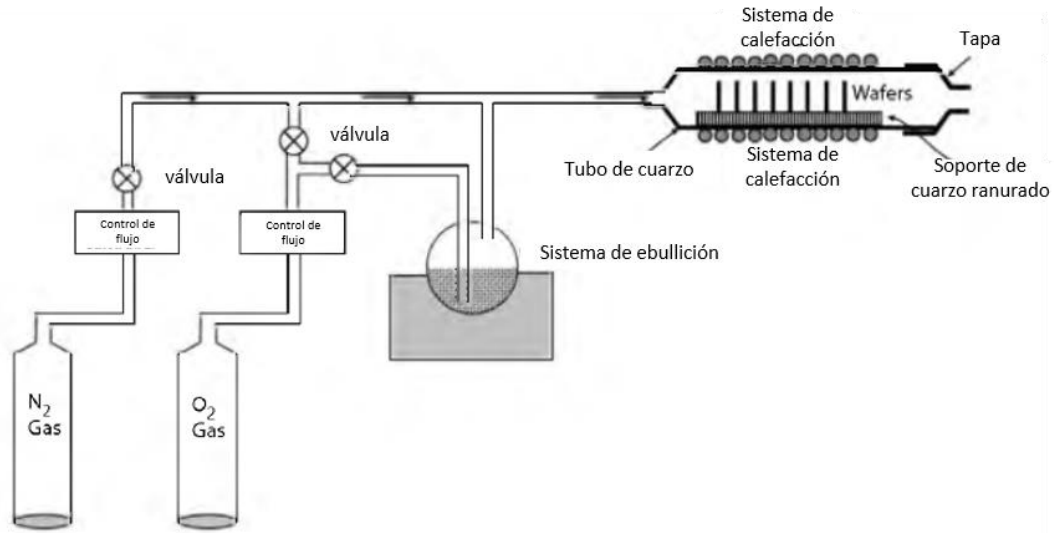
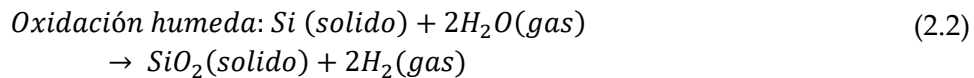
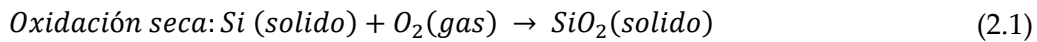


Figura 2. 2 Configuración básica del sistema de oxidación térmica [11].

La oxidación térmica se clasifica en seca y húmeda. En el proceso de oxidación seca, el oxígeno fluye directamente al tubo que se ajusta a la temperatura de oxidación deseada, mientras que, en la oxidación húmeda, el oxígeno pasa a través del agua desionizada en ebullición. La temperatura de oxidación generalmente está en el rango de 900°C a 1200 °C [19].



Durante el proceso de oxidación del silicio, en la superficie de la oblea se genera una reacción química en la que el silicio reacciona con el oxígeno y se convierte gradualmente en óxido de silicio (SiO₂), ver Fig. 2.3. Sin embargo, el proceso de crecimiento es lento, debido a que las moléculas de oxígeno tienen que difundirse a través de la capa bajo crecimiento del SiO₂ antes de que puedan reaccionar con el silicio.

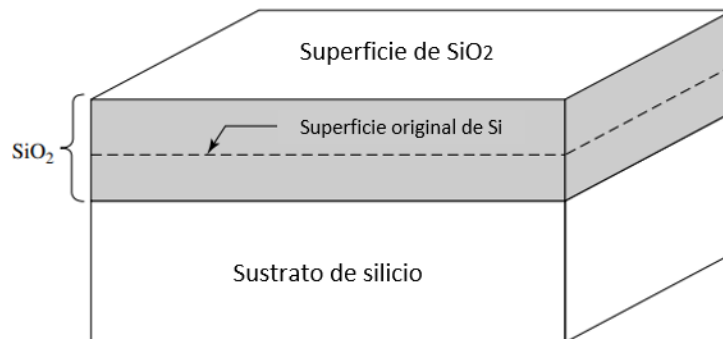


Figura 2.3 Desarrollo de la interfase silicio-SiO₂ durante el crecimiento del óxido [19].

Para la fabricación de transistores MOS modernos, el grosor del óxido de compuerta se puede reducir hasta aproximadamente 1.5 nm, pero estas películas pueden tener grosores de hasta algunas decenas de nanómetros [4]. En la Fig. 2.4 se presenta la velocidad de crecimiento del óxido según el tipo de oxidación, se observa que la velocidad de crecimiento es mayor cuando se emplea vapor de agua como oxidante.

En la fabricación de las microcavidades el SiO₂ servirá como material enmascarante durante la primera etapa de micromaquinado y como protección de la cara posterior durante todo el proceso de grabado, por lo que el espesor de la película dependerá de varios factores, principalmente del tiempo y temperatura del grabado. Entonces es importante considerar la velocidad de grabado del óxido, que no es insignificante al entrar en contacto con hidróxido de potasio (KOH), esta velocidad se discutirá más adelante.

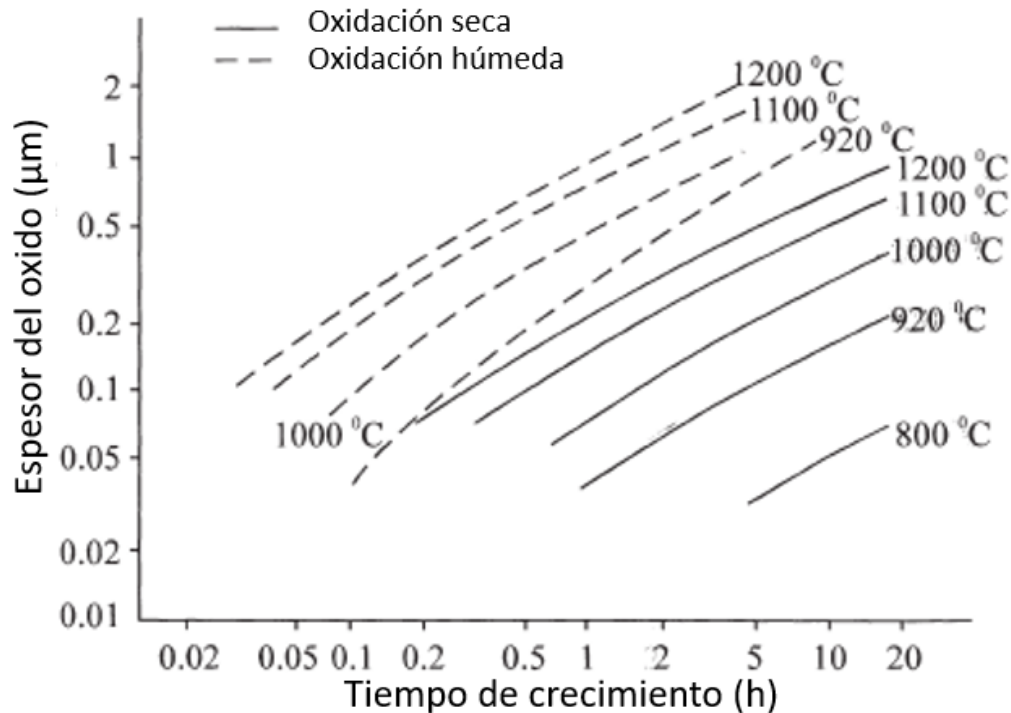


Figura 2.4 Grosor de la capa de SiO₂ crecida térmicamente en función del tiempo, para diferentes temperaturas [18].

2.2.2 Fotolitografía Óptica.

La fotolitografía es un proceso de transferencia de patrones geométricos de una mascarilla a una capa delgada de material sensible a la radiación ultra violeta (UV) llamado fotoresina, ésta puede ser de tipo positiva o negativa y es depositada sobre la superficie de la oblea de silicio [19]. Una mascarilla es una placa transparente acorde al tamaño de la oblea, generalmente están hechas de vidrio, sobre ella se tiene una fina capa de cromo o una emulsión fotográfica, sobre la cual se imprime el diseño de los patrones geométricos generados por computadora (layout). La litografía óptica (o fotolitografía ultravioleta [UV]) es la más utilizada porque tiene un alto rendimiento, buena resolución, bajo costo y facilidad de operación [11, 19]. A su vez existen dos tipos de exposición por contacto y por proximidad. En la Figura 2.5 se ilustra la fotolitografía óptica con exposición por contacto (utilizada para el proceso de fabricación de las microcavidades). En este procedimiento la oblea de silicio recubierta con fotoresina se pone en contacto físico con la mascarilla, y posteriormente se expone a luz ultravioleta durante un tiempo determinado.

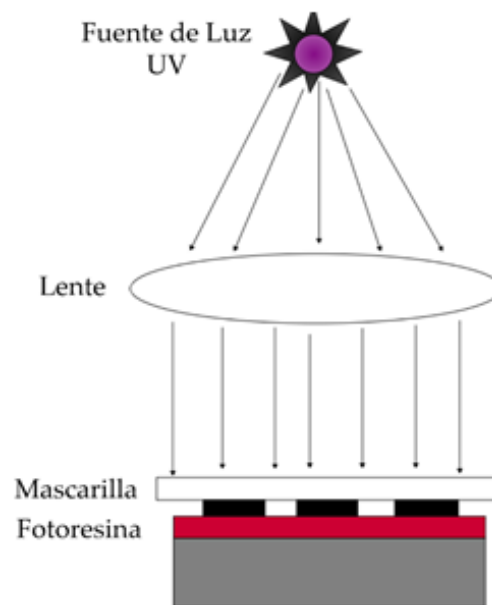


Figura 2.5 Fotolitografía por contacto [11].

La Figura 2.6 ilustra el resultado de la transferencia de patrones según el tipo de fotoresina. Si se usa una fotoresina negativa, la fotoresina expuesta se endurece y no se disuelve en el revelador, como se muestra en el lado derecho de la Figura 2.6c. Después, la oblea pasa por un proceso que graba selectivamente la capa de óxido expuesta (pero no graba la fotoresina), como se muestra en la Figura 2.6d. Finalmente, se remueve la fotoresina restante (usando solventes o grabado con plasma), dejando en la capa enmascarante el patrón geométrico que es igual al de la mascarilla (lado izquierdo de la Figura 2.6e). Para la fotoresina positiva, el procedimiento descrito es similar, con la diferencia que durante el revelado se elimina la fotoresina de las áreas que fueron expuestas a la luz UV.

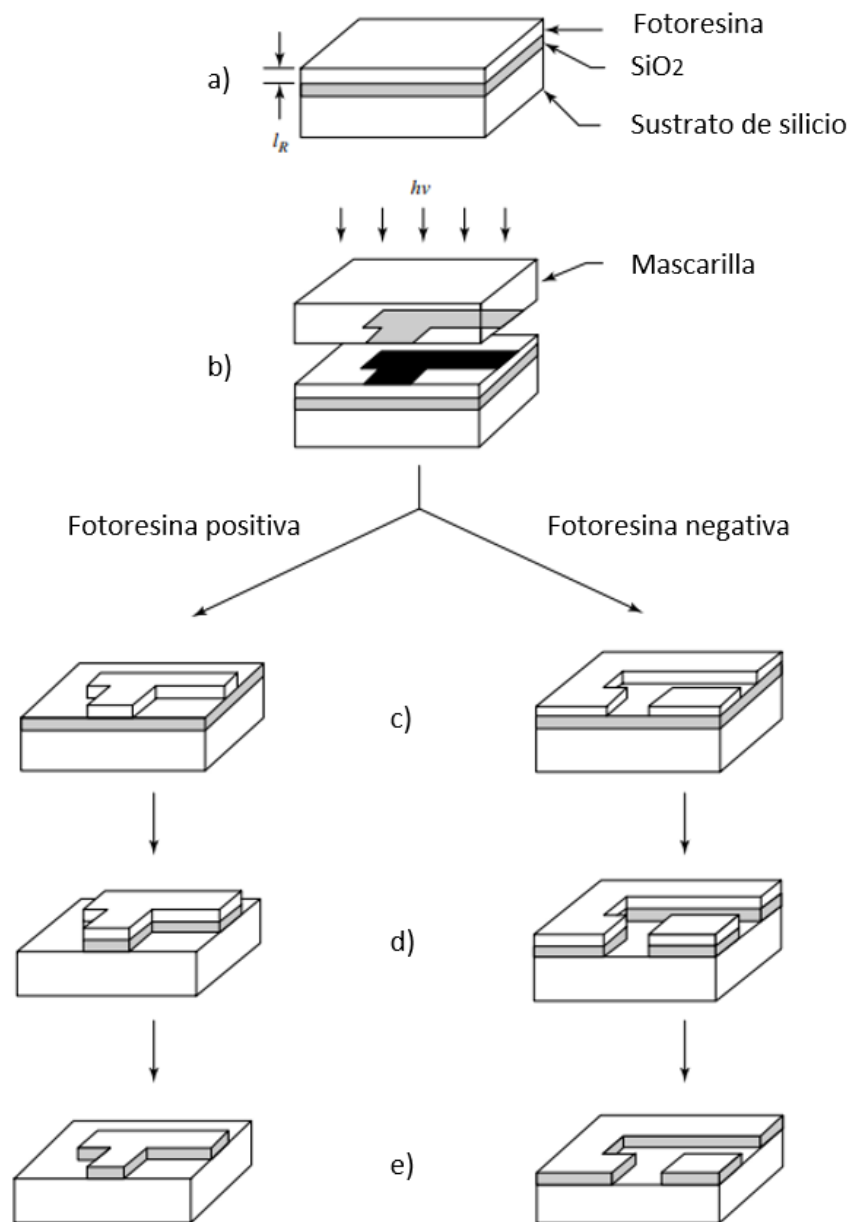


Figura 2.6 Proceso fotolitográfico para la transferencia de patrones: (a) aplicación de fotoresina; (b) exposición; (c) revelado; (d) grabado selectivo del enmascarante; (e) resultado final [19].

2.2.2 Grabado Químico.

El grabado químico es una técnica que consiste en corroer el material de una película o sustrato [20]. Existen dos tipos de grabado; grabado húmedo y grabado seco, en el primero se emplean como grabantes soluciones acuosas, y en el segundo, grabantes en estado de vapor o plasma [21–23]. El mecanismo de grabado consiste en cuatro pasos [11] y se ilustran en la Fig.2.7.

- (1) Difusión (o transporte) de las moléculas reactivas a la superficie del silicio
- (2) Adsorción de las moléculas en la superficie
- (3) Reacción química entre el grabante y los átomos de la superficie
- (4) Desorción de los productos de la reacción y disolución de los productos desorbidos en el volumen principal.

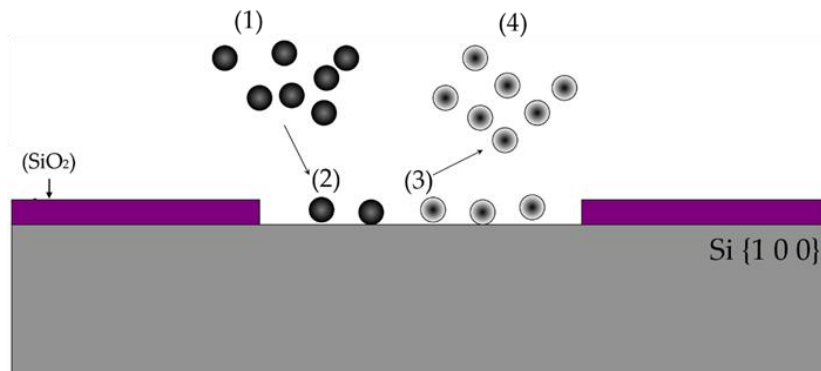


Figura 2.7 Pasos básicos involucrados en el proceso de grabado químico húmedo [11].

Existen varios parámetros de grabado que son comúnmente utilizados y deben ser entendidos [11]:

i) Enmascarante. Es una capa crecida o depositada sobre la superficie del sustrato, encargada de proteger las regiones donde no se requiere grabar el material.

ii) Isotropía. La velocidad de grabado es la misma en todas las direcciones, es decir, la velocidad de grabado lateral es aproximadamente la misma que la velocidad de grabado vertical (ver Fig. 2.8a). En el caso de grabar silicio monocristalino, con grabantes isotrópicos la velocidad de grabado no depende de la dirección cristalográfica.

iii) Anisotropía. La velocidad de grabado es diferente en todas las direcciones (ver Fig. 2.8b). Cuando se graba silicio monocristalino con grabantes anisotrópicos húmedos, la velocidad de grabado depende de las direcciones cristalográficas.

iv) Selectividad. Es la razón entre la velocidad de grabado del material que se va a grabar (R1) y la del material que no se va a grabar (sustrato subyacente o enmascarante) (R2), y está dada por:

$$S = \frac{R_1}{R_2} \quad 2.3$$

Si R1 es mayor que R2, entonces $S > 1$ el proceso es selectivo. Si $R_1 < R_2$ implica que $S < 1$ y se dice que el proceso no es selectivo [24].

v) Uniformidad de la velocidad de grabado. La variación de la velocidad de grabado a lo largo de la superficie que se va a grabar se denomina "uniformidad" y está dada por:

$$\begin{aligned} & \text{uniformidad de vel. de grab. (\%)} \\ &= \frac{\text{vel. de grabado}_{\max} - \text{vel. de grabado}_{\min}}{\text{vel. de grabado}_{\max} + \text{vel. de grabado}_{\min}} \end{aligned} \quad 2.4$$

Considerando estos parámetros, para la fabricación de las cavidades asféricas se requiere de un grabado altamente anisotrópico, selectivo y uniforme, pero es importante saber que no siempre es posible lograr que estos tres factores se logren simultáneamente.

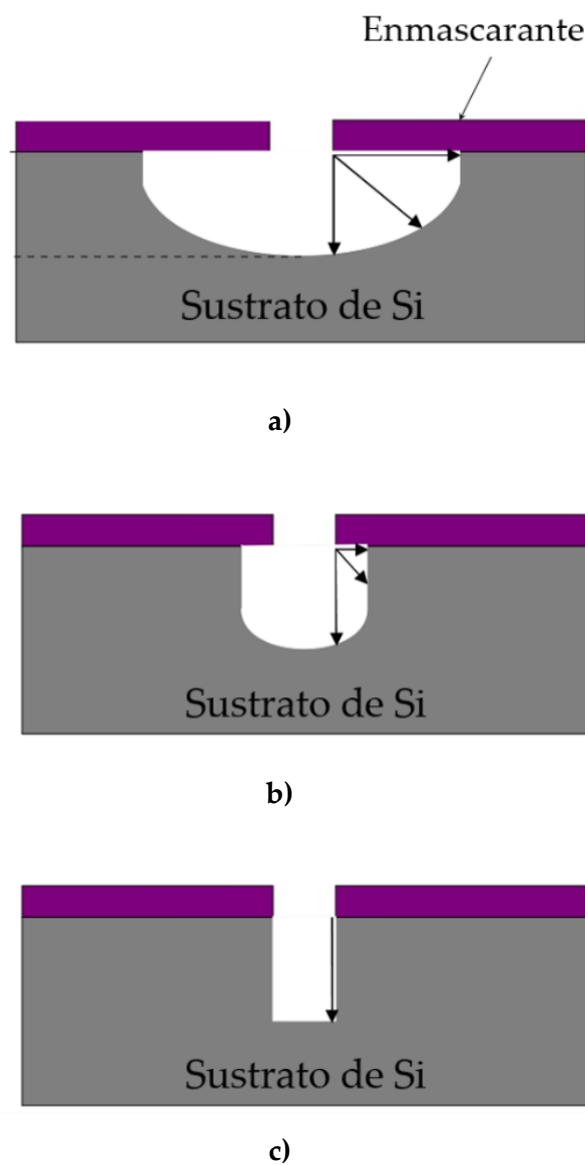


Figura 2.8 a) Grabado isotrópico, b) Grabado anisotrópico y c) Grabado anisotrópico perfecto [11].

2.3 MICROMAQUINADO DE VOLUMEN DE SILICIO.

El micromaquinado de volumen se refiere al desarrollo de estructuras tridimensionales en el rango de las micras, corroyendo químicamente el sustrato mediante etapas de fotolitografía y grabado, según los requerimientos. Esta técnica se ha empleado para formar estructuras que puedan moverse físicamente, tal como membranas flotantes y vigas suspendidas (Fig. 2.9a) [17, 25, 26]. Pero también pueden producirse otro tipo de estructuras como son ranuras, microlentes, cavidades cuadradas, triangulares y demás (Fig. 2.9b-d) [18-20; 31]. Las estructuras maquinadas pueden tener un perfil de grabado que puede ser de características isotrópicas y/o anisotrópicas (típicamente exhibiendo superficies perfectamente planas y ángulos agudos bien definidos) [28; 30–33]. Estas propiedades están definidas por la naturaleza de las reacciones químicas, la difusión de reactivos y productos, y una serie de otros factores, incluidos los patrones impresos en la capa enmascarante [27].

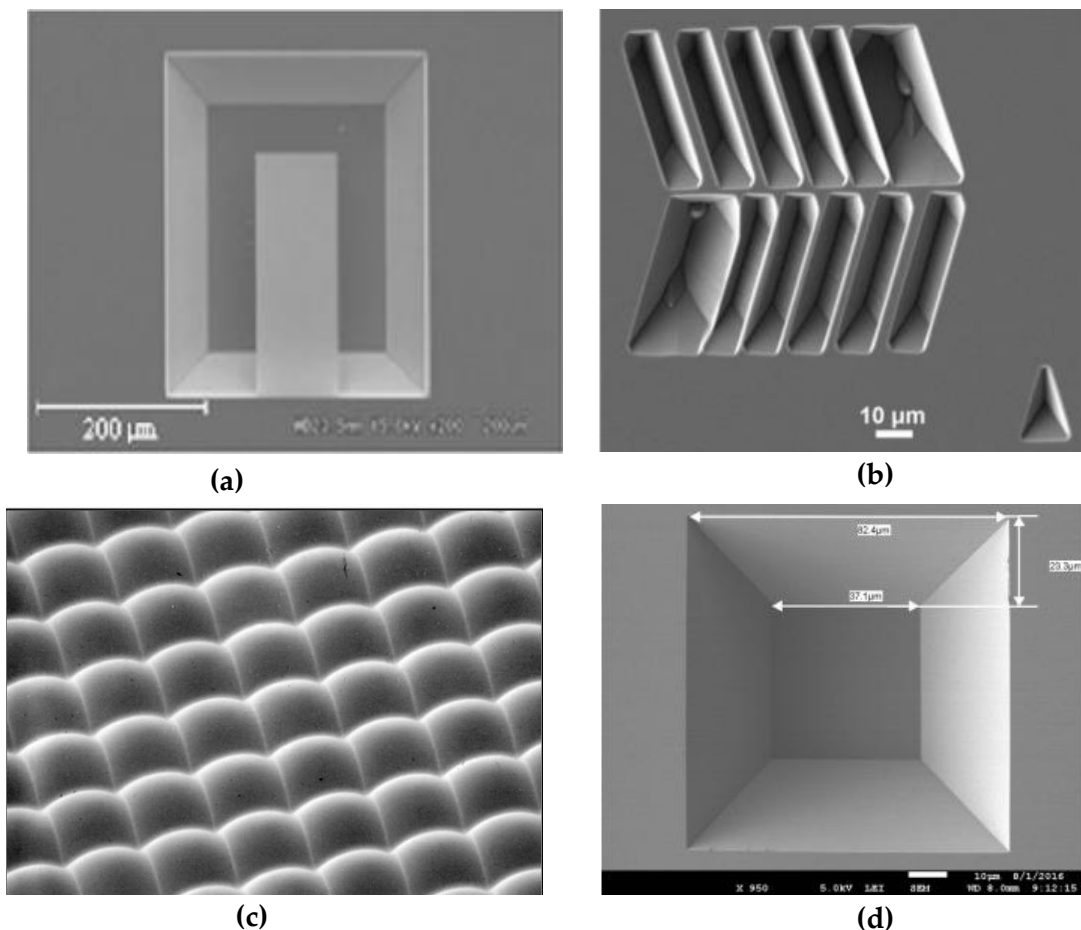


Figura 2.9 Estructuras 3D fabricadas en silicio con micromaquinado de volumen, a) Trampolín [34], b) Ranuras [35] c) Arreglo de microlentes [36], d) cavidad cuadrada [37].

Un ejemplo de proceso de micromaquinado de volumen es el que se ilustra en la Figura 2.10, para fabricar una estructura tipo trampolín, para ello el grabado del silicio se hace mediante grabado húmedo anisotrópico. La secuencia básica de las técnicas de fabricación es las siguiente: Fig. 2.10a depósito o crecimiento de la capa enmascarante, Fig. 2.10b impresión del patrón geométrico con técnica de fotolitografía, Fig. 2.10c grabado húmedo y Fig. 2.10d estructura 3D final.

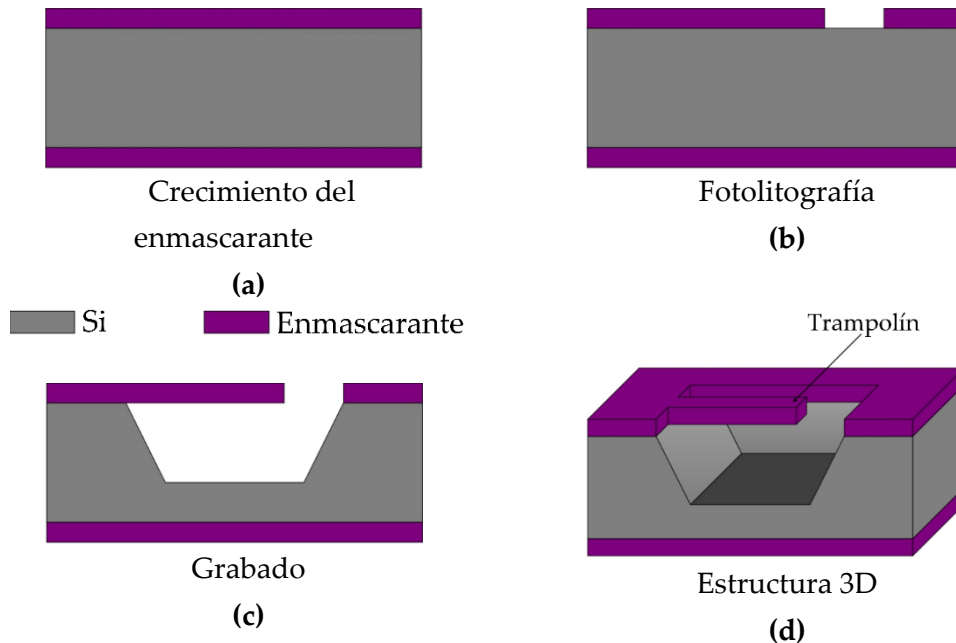


Figura 2.10 Secuencia del proceso para la fabricación de una estructura tipo trampolín sobre una oblea de Si {1 0 0} mediante micromaquinado de volumen y grabado húmedo anisotrópico [11].

2.3.1 Grabado húmedo anisotrópico del Silicio.

En este proceso la corrosión química del silicio depende de la orientación cristalina. Donde la anisotropía en el grabado está asociada a las diferentes configuraciones de los enlaces superficiales y en términos simples, los planos más difíciles de grabar son aquellos que poseen enlaces más fuertes y/o mayor densidad de ellos [20, 21]. Debido a la relación entre la velocidad de grabado y la orientación cristalina, se pueden fabricar una gran variedad de estructuras de silicio de una manera controlable y reproducible [21, 22, 38].

El grabado húmedo anisotrópico, se realiza en soluciones acuosas alcalinas, para ello las obleas de silicio se sumergen en la solución, y la parte expuesta del silicio se graba mediante reacción química [21, 38–40]. Existe una amplia variedad de soluciones, donde el componente principal puede ser orgánico o inorgánico [41].

Entre las más populares están el hidróxido de potasio (KOH) y el hidróxido de tetrametilamonio (TMAH) [12]. Pero también se ha empleado; hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de Litio (LiOH), hidróxido de cesio (CsOH), hidróxido de amonio (NH₄OH), hidróxido de rubidio (RbOH), y compuestos orgánicos alcalinos como etilendiamina, colina (hidróxido de trimetil-2-hidroxietilamonio) o hidrazina con aditivos como pirocatecol y pirazina [38, 41–44].

Al elegir un grabante, se deben considerar aspectos importantes como [45]:

- Facilidad de manejo
- Toxicidad
- Velocidad de grabado
- Rugosidad de la superficie grabada
- Compatibilidad IC
- Control del paro del grabado (etch stop)
- Selectividad de grabado sobre otros materiales
- Material y grosor del enmascarante

En la tabla 2.1 se presentan las características principales de cuatro soluciones grabantes más utilizadas en el grabado anisotrópico de Si (KOH, TMAH, ETILENDIAMINA y EDP) [46].

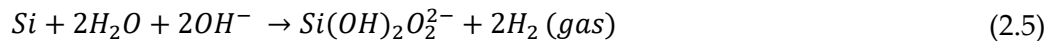
Tabla 2.1 Características principales de 4 grabantes anisotrópicos comunes [45].

Grabante/Diluyente/Aditivo/Temperatura	Etch stop	Velocidad de grabado (100) (µm/min)	Observaciones	Enmascarante (velocidad de grabado)
KOH/Agua, aditivo de alcohol isopropílico, 85°C	$B > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ reduce la velocidad de grabado en 20	1.4	Incompatible con IC, evitar el contacto con los ojos, graba rápido el SiO ₂ .	Fotoresina (grabado a temperatura ambiente); Si ₃ N ₄ (no se graba); SiO ₂ (28 Å/min)
Etilendiamina pirocatecol (agua), aditivo de pirazina, 115 °C	$\geq 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ reduce la velocidad de grabado en 50	1.25	Tóxico, tiempo de vida corto, debe excluirse el O ₂ , pocas burbujas de H ₂ , los silicatos pueden precipitarse	SiO ₂ (2-5 Å/min); Si ₃ N ₄ (1 Å/min); Ta, Au, Cr, Ag, Cu
Hidróxido de tetrametilamonio (TMAH) (agua), 90°C	$> 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ reduce la velocidad de grabado en 40	1	Compatible con IC, fácil de manejar, acabado de superficie liso, hay pocos estudios	La velocidad de grabado del SiO ₂ es 4 órdenes de magnitud menor que Si (100) LPCVD Si ₃ N ₄
Pirocatecol de etilendiamina (EDP)/Agua	$> 1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ prácticamente detiene el grabado	3.0	Tóxico y explosivo estable al 50% de agua.	SiO ₂ (<2 Å/min) y la mayoría de las películas metálicas; no ataca a Al según algunos autores [Wise, 1985]

Es importante considerar que la velocidad de grabado o ataque de cada solución grabante, depende de varios parámetros: como la concentración, la temperatura de grabado, la agitación durante el grabado, los aditivos, etc. No existe una ecuación que modele la velocidad de este proceso en función de estos parámetros, pero si se desea conocer esta velocidad, hay que acudir a la literatura y la experimentación. Los resultados son reproducibles una vez definidos los parámetros y tiempos de vida de las mezclas [41].

2.3.2 Solución KOH: H₂O.

La mezcla de hidróxido de potasio (KOH) con agua es la solución grabante más popular y la más utilizada durante décadas para grabado anisotrópico de silicio [47-49]. Un grabado con KOH, en soluciones casi saturadas (1:1 en peso de agua) a 80°C, proporciona excelentes perfiles de grabado produciendo superficies uniformes y lisas. En temperaturas arriba de los 80°C, la uniformidad de la velocidad de grabado se ve afectada considerablemente [45]. Cuando el silicio expuesto entra en contacto con el KOH:H₂O se produce una reacción química de grabado (Ec. 2.5), donde los átomos de silicio se hidroxilan para convertirse en iones de hidróxido solubles en agua, que genera como subproducto burbujas de gas hidrógeno (burbujas emergiendo de la oblea de Si). Cabe señalar que la reacción química necesita como reactivos tanto el ion OH⁻ como el agua.



2.3.3 Anisotropía del grabado con KOH.

La naturaleza anisotrópica del grabado con KOH proviene de la estructura cristalina del silicio, donde la velocidad de ataque es mayor sobre los planos cristalinos {1 1 0} y {1 0 0} con respecto al plano {1 1 1}. En una oblea de silicio los átomos ubicados en la superficie están conectados con los átomos cercanos al interior de la oblea, esta conexión se da solo con algunos de sus 4 enlaces, al resto se les denomina enlaces de superficie o incompletos (siendo menos estables y químicamente reactivos) ilustrados en la Fig. 2.11. La orientación <1 0 0>, tiene dos enlaces de superficie (químicamente reactivos), mientras que las orientaciones <1 0 0> y <1 1 1> tienen un solo enlace. La diferencia entre <1 1 0> y <1 1 1> se encuentra en la ubicación de los enlaces posteriores a la superficie o internos. En el caso de un átomo de superficie <1 1 0>, los átomos posteriores a la superficie están ubicados paralelos a la superficie, por lo tanto, están expuestos y reaccionan más fácilmente que los átomos de <1 1 1>. Ahora para el caso de un átomo de superficie <1 1 1> todos los enlaces posteriores a la superficie están conectados a átomos cercanos que no tienen enlaces de superficie, en consecuencia, los átomos de superficie son estables y su grabado es demasiado lento, en comparación con las otras dos orientaciones [37].

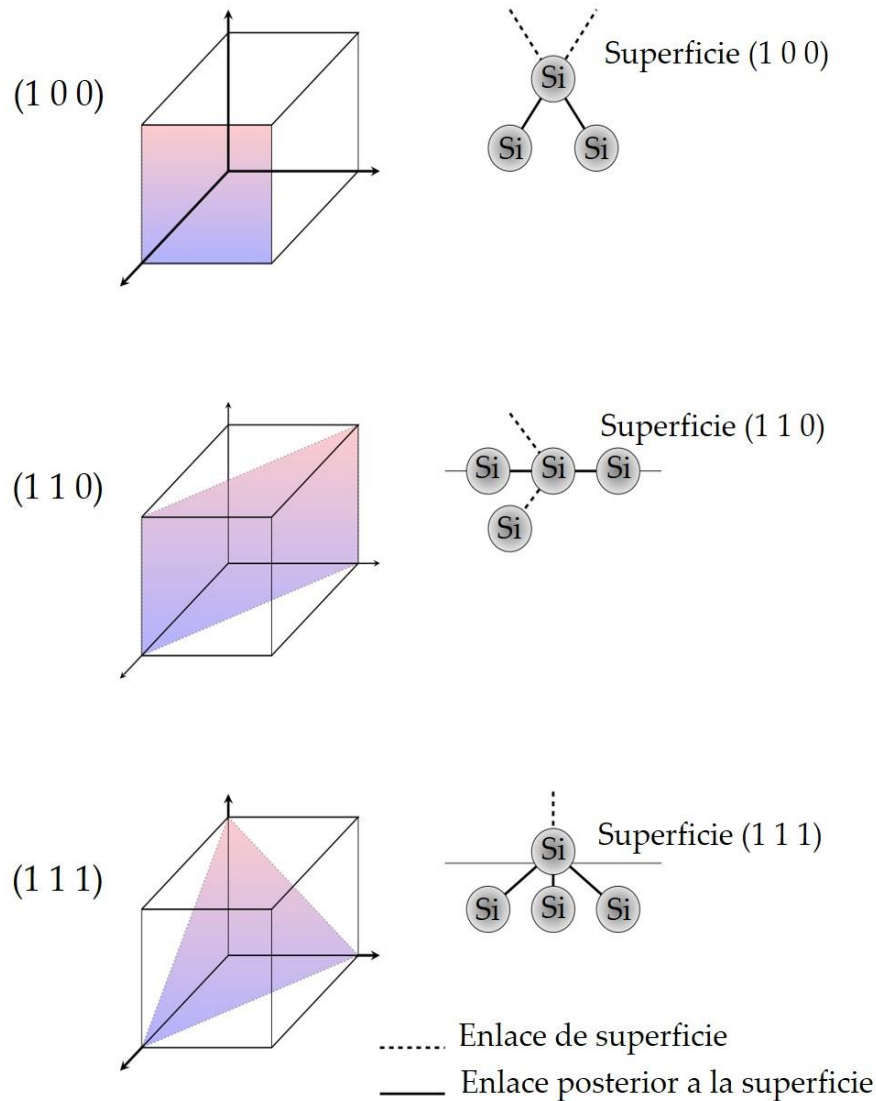
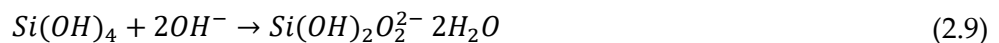
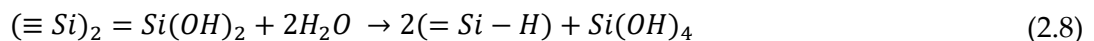
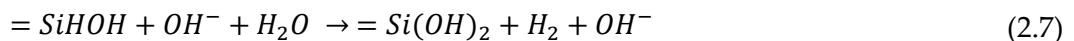
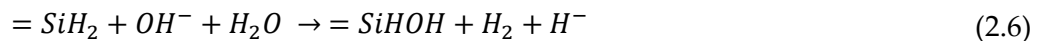


Figura 2. 11 Enlaces de superficie en las orientaciones (1 0 0), (1 1 0) y (1 1 1).

En el caso de la superficie de silicio {1 0 0}, cada enlace de superficie reacciona con un átomo de hidrógeno y se desintegra. Las reacciones de grabado se llevan a cabo secuencialmente en los siguientes pasos de las ecuaciones 2.6 a 2.9, donde el número de enlaces posteriores a la superficie se representa con el número de barras = 'o' ≡ unidas al símbolo Si.



El primer paso de la reacción se describe con la Ec. 2.6, donde los átomos de silicio en la superficie terminados en hidrógeno se unen con un ion OH^- mediante el reemplazo del átomo de hidrógeno. Luego, en la ecuación. 2.7 el segundo paso de la reacción, el átomo de la superficie de silicio se hidroxila gradualmente por un aumento en el número de OH unidos (Ec.2.8), formando finalmente un ion hidróxido soluble en agua (Ec.2.9). Sumando los cuatro pasos anteriores de las Ecs. 2.6 a la ecuación. 2.9, la reacción total resulta en la ecuación 2.5.

De lo anterior, es más fácil entender que para una oblea de silicio con la orientación más común $\{1\ 0\ 0\}$, las estructuras más simples que se pueden formar con grabado anisotrópico, se muestran en la Figura 2.12, las cuales son cavidades en forma de V o pirámide invertida. En los perfiles de grabado de este tipo de estructuras, los planos de grabado $\{1\ 1\ 1\}$ están inclinados por un ángulo de 54.7° , a partir de los bordes $\{1\ 1\ 0\}$ que se definen en referencia a las cavidades cuadradas con trazo paralelo y en referencia al plano principal de la oblea. [9].

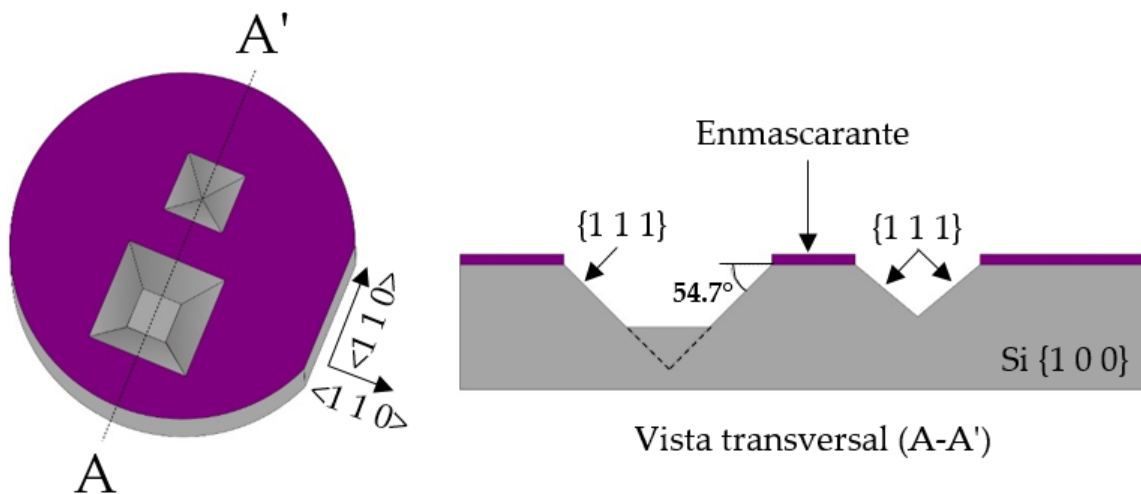


Figura 2.12 Ilustración esquemática del grabado anisotrópico en una oblea de Si $\{1\ 0\ 0\}$.

2.3.3 Concentración KOH.

La Figura 2.13 muestra la velocidad de grabado de cinco diferentes orientaciones de silicio con respecto a la concentración de KOH, se puede observar que la velocidad de grabado disminuye a medida que la concentración de KOH aumenta, esto ocurre en un rango de concentración superior al 25 %p/p.

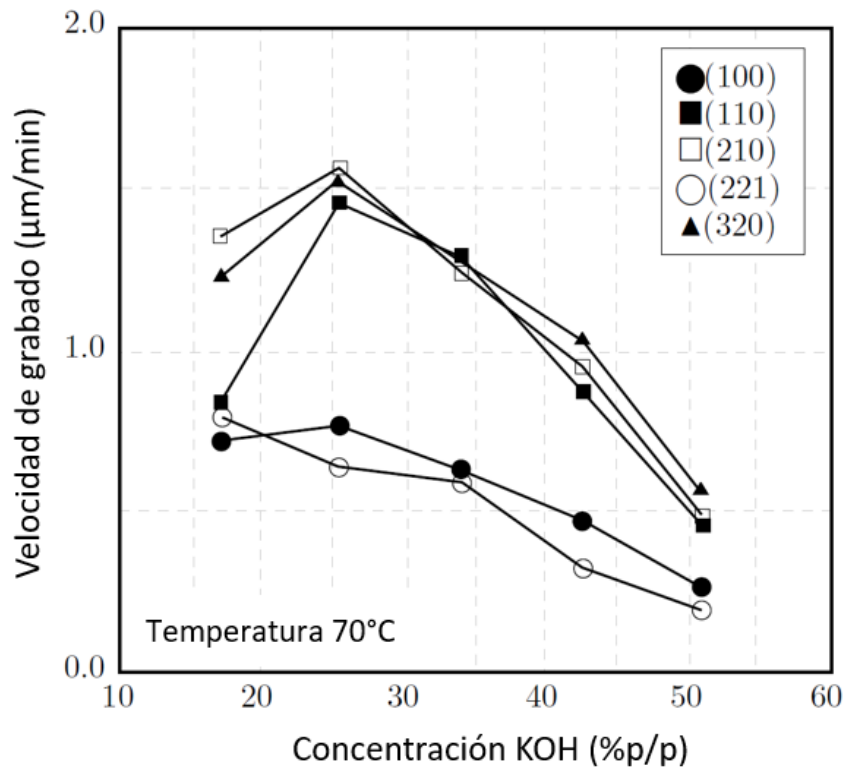


Figura 2.13 Dependencia de la velocidad de grabado con la concentración de KOH [46].

Es importante considerar la relación entre la velocidad de grabado y la concentración de KOH a la hora de fabricar algunas estructuras, ya que como se observa en la gráfica anterior los perfiles de grabados pueden cambiar y/o controlarse mediante la variación en el porcentaje de concentración [11]. Por ejemplo, a altas concentraciones de KOH (45%p/p) y a altas temperaturas (arriba de los 80°) se producen paredes laterales lisas, controlables y reproducibles [50], como las ilustradas en la Fig. 2.14.

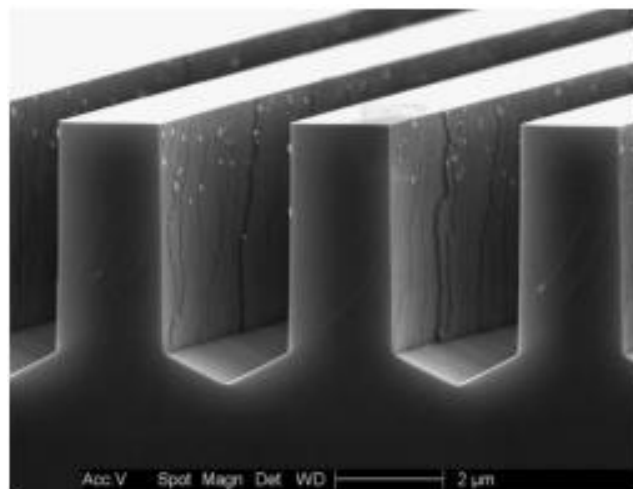


Figura 2.14 Micrografía SEM de ranuras en silicio, producidas con grabado húmedo a base de KOH [22].

Otro efecto de la concentración, influye en la rugosidad de la superficie grabada, a medida que la concentración de KOH aumenta la rugosidad disminuye, como se puede observar en la gráfica de la Figura 2.15. Para planos de bajo índice se prefiere un KOH altamente concentrado (p. ej., 7 M) que permita obtener superficies con baja rugosidad, excepto para el plano $\{1\ 0\ 0\}$, este plano en altas concentraciones y a medida que avanza el grabado se vuelve más rugoso (se cree que esto se debe al desarrollo de las burbujas de hidrógeno, que dificultan el transporte del grabante nuevo a la superficie de silicio) [45].

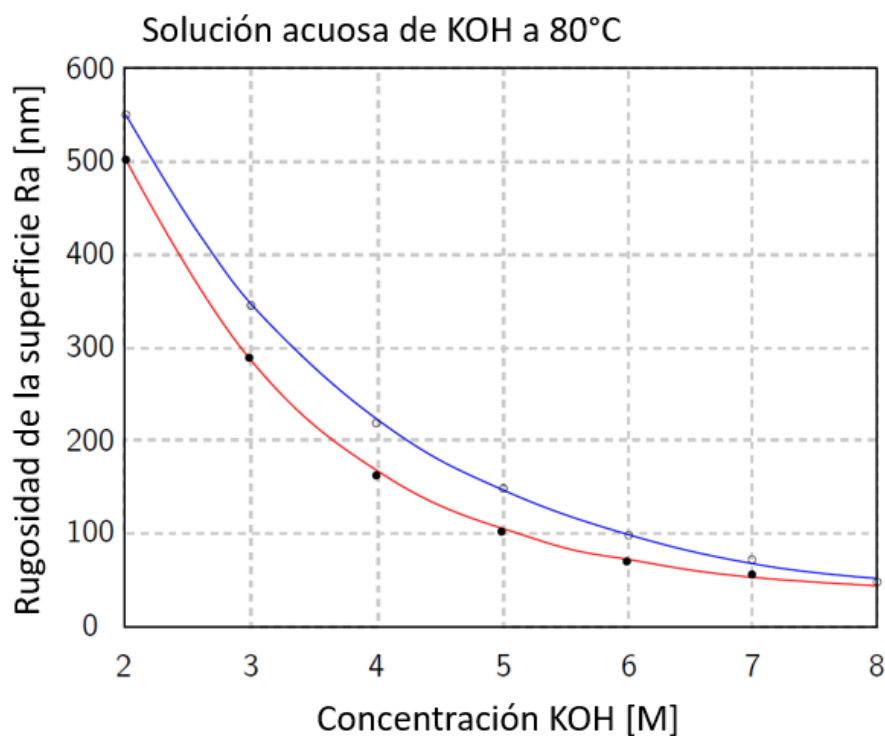


Figura 2.15 Rugosidad de la superficie (R_a) del silicio $\{1\ 0\ 0\}$ en KOH a 80 °C en función de la concentración para un tiempo de grabado de 1 hora (línea azul) y para una profundidad de grabado de 60 μm (línea roja) [45].

Ohwada et al. [51] observaron que durante el proceso de grabado la agitación ultrasónica de la solución grabante, elimina la rugosidad de la superficie y ayuda a mejorar considerablemente la apariencia de la superficie final. La agitación puede reducir los valores de rugosidad promedio (R_a) en un orden de magnitud, posiblemente debido a la eliminación de las burbujas de hidrógeno de la superficie grabada [24].

Según lo reportado por Seidel et al [41], en la Figura 2.16, se presenta la influencia de la composición y concentración del KOH en la velocidad de grabado de silicio $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ a 72°C. Para concentraciones superiores a 20 %p/p de KOH, la velocidad de grabado decrece (similar a la Fig. 2.15). También encontró que, para concentraciones muy altas, los datos podrían ajustarse mejor

mediante una proporcionalidad, asumiendo el valor de la concentración molar del agua a la cuarta potencia.

Para el rango completo de concentraciones reportadas, el mejor ajuste para la velocidad de grabado R se obtuvo tomando:

$$R \approx [H_2O]^4 [KOH]^{\frac{1}{4}} \tag{2.10}$$

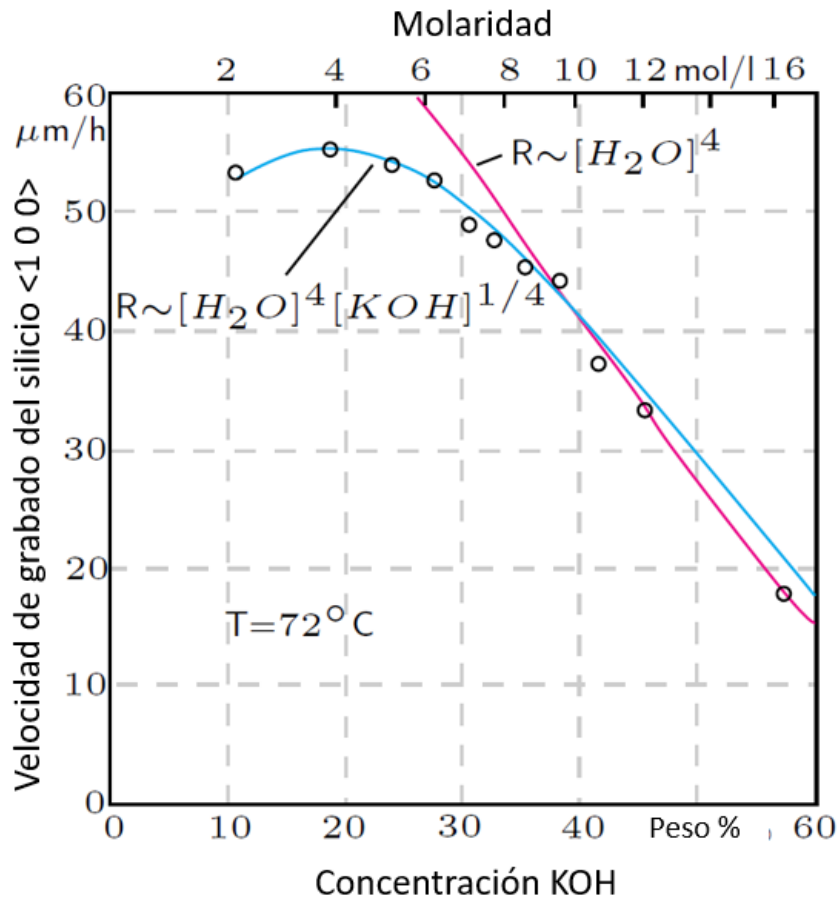


Figura 2.16 Velocidad de grabado de silicio {100} en función de la concentración de KOH a temperatura de 72°C [41].

Para el micromaquinado de volumen donde se utiliza SiO₂ como enmascarante, es importante conocer la razón a la que se graba en función de la concentración de KOH, en la Figura 2.17 se presenta una gráfica que muestra la velocidad de grabado para diferentes concentraciones a 60°C, se puede ver que de 10%p/p hasta 30%p/p la razón de grabado incrementa linealmente, después en 35%p/p hay un máximo de grabado, donde la velocidad de grabado es casi 80 nm/h.

Después de ese valor, la velocidad de grabado decrece paulatinamente hasta la concentración de 60%p/p. Es importante considerar que la velocidad de grabado del SiO₂ en KOH-H₂O aparentemente no solo depende de la concentración y la calidad del óxido, sino también del recipiente de grabado, el tiempo de vida del KOH, la agitación y demás factores [52].

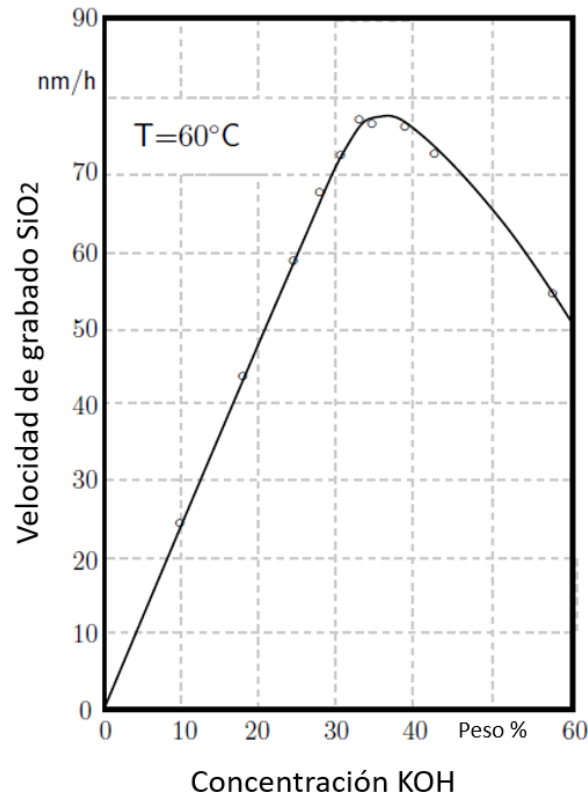


Figura 2. 17 Velocidad de grabado del SiO₂ en función de la concentración de KOH [41].

2.3.4 Temperatura de grabado.

La velocidad de grabado del silicio depende fuertemente de la temperatura de grabado [11]. En la Fig. 2.18 se presenta la razón de grabado en función de la temperatura para las orientaciones (1 0 0), (1 1 0) y (1 1 1) a una misma concentración de KOH (40%p/p). El eje vertical es la velocidad de grabado en escala logarítmica, y el horizontal es el inverso de la temperatura absoluta. Cuando la temperatura de grabado aumenta de 40 °C a 80 °C, la velocidad de grabado aumenta 10 veces [11].

Es efectivo elevar la temperatura cuando se necesita aumentar la velocidad de grabado. Una limitante es alcanzar el punto de ebullición de la solución. Tanaka et al. [49] en sus investigaciones utilizó una solución altamente concentrada de KOH, particularmente 45-50 %p/p de KOH. Cuando la concentración de KOH es del 50 %p/p, el punto de ebullición se alcanza a los 150 °C, debido a su alta concentración de iones. Para Si (1 0 0) en un rango de temperatura de 100°C-145°C permite una velocidad de grabado alta, de típicamente varios micrómetros por minuto, con buena calidad en la superficie grabada. En el caso del grabado de (1 1 0), la velocidad de grabado aumenta a 10 μm/min incluso más que la de (1 0 0). Aunque la rugosidad de la superficie (1 1 0) disminuye con el aumento en la concentración de KOH, en la superficie grabada comienzan a aparecer gránulos (rugosidad). En los resultados obtenidos se reportó que los gránulos desaparecen a una temperatura superior a 135°C con 45%p/p de KOH, y se obtiene una superficie

lisa [49].

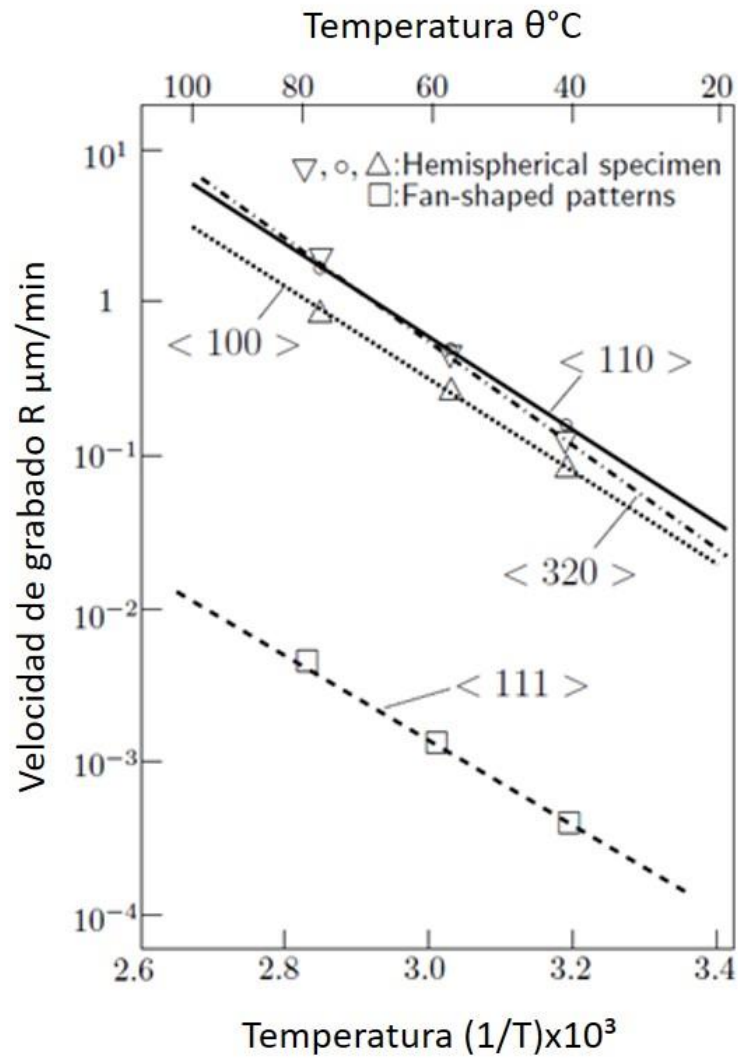


Figura 2.18 Dependencia de la temperatura de la velocidad de grabado de Si en KOH-agua al 40% para cuatro orientaciones [41].

CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN.

En este capítulo se describe el proceso de fabricación y mecanismo de grabado, para el desarrollo de las microcavidades esféricas. Para la fabricación se consideran dos etapas fundamentales: layout de la mascarilla y método de fabricación, las cuales se presentan a continuación.

3.1 MASCARILLA (LAYOUT).

Las mascarillas utilizadas en la etapa de fotolitografía, corresponden al diseño del layout MLENTES 1234 MVT-MMXXI (Fig.3.1), formado por 20 bloques y 4 niveles (mascarillas). Cada bloque tiene un arreglo geométrico específico con un mismo propósito, para la impresión de patrones que dan inicio al desarrollo de microestructuras que sirven para el estudio de superficies de alto índice. Para la técnica de fotolitografía requerida, en este trabajo se utilizan únicamente una mascarilla, la correspondiente al primer nivel, con los bloques 1, 2, 3 y 16.

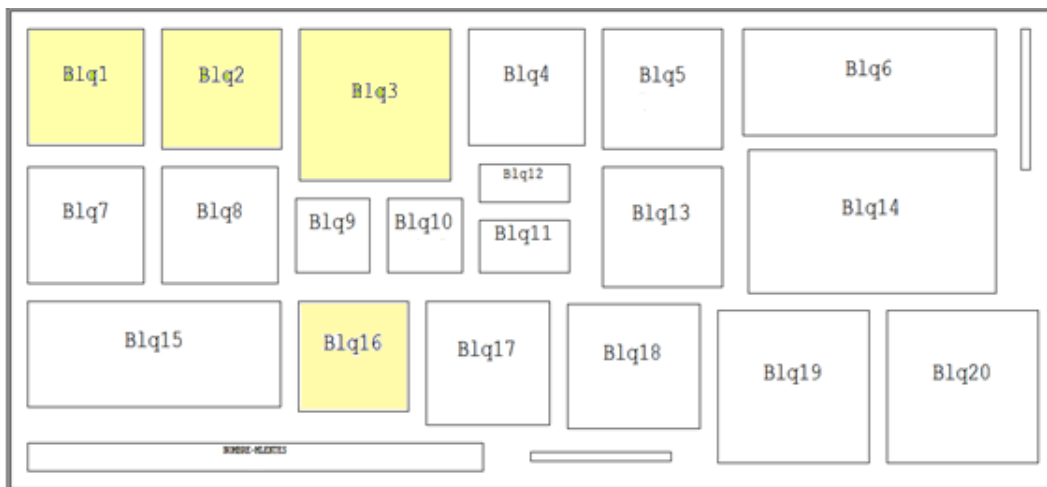


Figura 3. 1 Chip MLENTES 1234 MVT-MMXXI.

Mascarilla 1 – Nivel 1 (Blq. 1,2,3 y 16). Consiste en un arreglo matricial de 16 patrones cuadrados (ver Fig.3.2) separados de centro a centro por $1000\mu\text{m}$, a excepción del bloque 3 con separación de $1200\mu\text{m}$ entre cada patrón. Esta separación de seguridad entre los centros de cada patrón, se debe a que al final de las etapas de micromaquinado contempladas las cavidades esféricas pueden alcanzar diámetros de hasta $800\mu\text{m}$. La longitud característica de cada patrón cuadrado se denota con d_1 , y se enlistan en la tabla 3.1.



Figura 3. 2 Mascarilla 1 – Blq-1, 2, 3 y 16.

Tabla 3.1 Dimensión de los patrones del Bloque 1,2, 3 y 16 – Mascarilla1.

d1 (µm)	Patrón Geométrico
200x200	ML1
6x6	ML3, ML5, ML7 y ML4
10x10	ML2, ML4, ML6 y ML8
16x16	ML9, ML11 y ML15
20x20	ML10 y ML12
30x30	ML16
50x50	ML13

Para el análisis de resultados, se utilizan las cavidades producidas a partir de los patrones con d1 igual a 6x6µm, 10x10µm, 16x16µm y 20µm x 20µm. Los patrones de 30x30µm y 50x50µm se mencionan como parte del diseño por tratarse de un estudio general, pero en este trabajo no se presenta un análisis de estas estructuras, ya que por el tiempo del primer micromaquinado no se logran estructuras de pirámide invertida, por ello se imprimen en color rojo. Para el caso del patrón con d1 igual a 200x200µm tiene como propósito formar una cavidad que permita conocer la profundidad de grabado que alcanza el primer micromaquinado.

3.2 MÉTODO DE FABRICACIÓN.

Se utiliza como material de partida 4 obleas de silicio obtenidas por el método Czochralsky con orientación (1 0 0), plano principal (1 1 0), 300 μm de espesor y 2 pulgadas de diámetro, producidas por Virginia Semiconductors, los pasos necesarios para la fabricación se enlistan a continuación.

1. Limpieza acuosa a base de peróxido de hidrógeno.
RCA I y II
2. Oxidación térmica de las obleas (SiO_2).
3. Crecimiento en ambiente vapor de agua a 1100°C , 40 min
Densificado en ambiente de nitrógeno a 1.7 s.l.p.m. 30 min
 $t_{ox} = 5000 \text{ \AA}$ (grosor esperado)
4. Fotolitografía - Mascarilla 1
Fotoresina negativa M1407, aplicar a 3000 rpm
Pre bake; 50s a 90°C
Tiempo de exposición; 10s
Revelador; ma_D533/s, $t=25\text{s}$
5. Grabado selectivo del SiO_2
Solución Buffer 7:1- NH_4F : HF
6. Micromaquinado de volumen de Si (primer maquinado)
Solución KOH a 45%p/p, $T=60^\circ\text{C}$, $t=1.30 \text{ hr.}$
7. Grabado total del SiO_2
Solución buffer 7:1- NH_4F : HF (importante proteger con una capa de fotoresina el SiO_2 de la cara posterior)
8. Micromaquinado de volumen de Si (segundo maquinado)
Solución KOH a 45%p/p, $T=60^\circ\text{C}$, Oblea1 $t=3\text{hr.}$, Oblea2 $t=6\text{hr.}$

El resultado del primer maquinado se ilustra en la Fig.3.3a, en una micrografía obtenida con microscopio óptico, la profundidad de la cavidad dificulta la observación y análisis con esta herramienta, debido a las limitaciones de la distancia focal, que no permite enfocar la parte superior y la parte inferior de la cavidad. Para un mejor análisis en la Fig.3.12b se presenta una micrografía SEM, el fondo de la cavidad muestra las 4 paredes simétricas bien definidas y unidas

a la punta o ápice de la pirámide invertida.

Es importante considerar que durante el transcurso del paso 7, se debe realizar una o varias re-oxidaciones de las obleas, para evitar el grabado total del SiO₂ que protege la cara posterior. Esto se realiza cuando el SiO₂ muestre una tonalidad de óxido delgado (azul claro) o con algunos defectos estructurales. También es importante verificar la integridad del óxido, para evitar formación de defectos, grabado de la orilla de las obleas, o en caso extremo grabado posterior de las obleas que cause fragilidad crítica por adelgazamiento excesivo durante el manejo de las obleas.

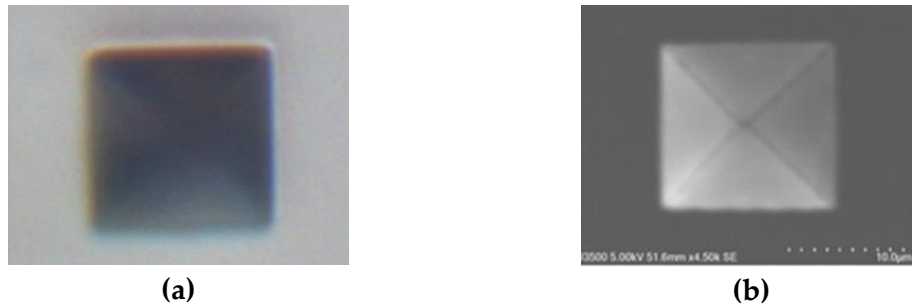


Figura 3. 3 Pirámide invertida, grabado $t=1.30hr$ $d1=10\mu m$ a) micrografía óptica $x50$ b) micrografía SEM.

3.3 MECANISMO DE GRABADO.

El proceso inicia con la oxidación térmica de las obleas de silicio (1 0 0). Posteriormente con técnica de fotolitografía, se transfieren los patrones geométricos sobre una capa de fotoresina (FR) previamente depositada sobre la superficie de la oblea (Fig.3.4).

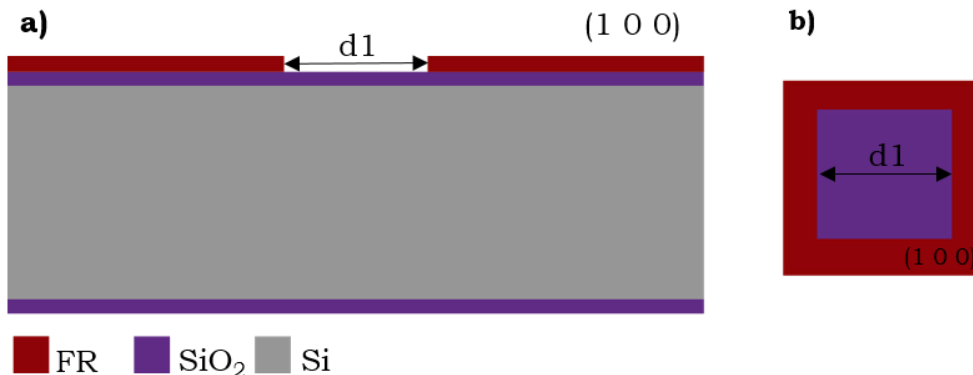


Figura 3. 4 a) Oxidación y fotolitografía, b) vista superior.

A través de los patrones impresos, se graba selectivamente el SiO₂. Este proceso se realiza introduciendo las obleas en una solución buffer 7:1, hasta obtener ventanas libres de óxido y dejando expuesto el silicio, ver Fig.3.5. Es importante que antes del grabado selectivo se proteja el SiO₂ de la cara posterior con una capa de fotoresina. Una vez realizado el grabado selectivo para el siguiente paso se elimina la resina de ambas caras.

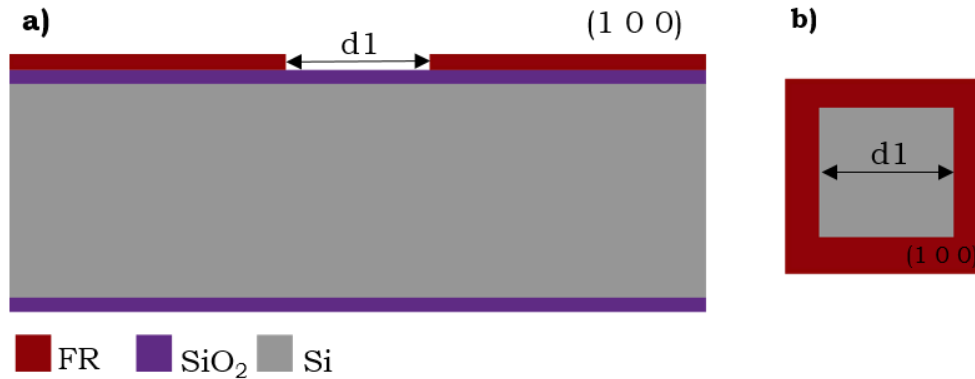


Figura 3. 5 a) Grabado selectivo del SiO₂, b) vista superior.

Con solución grabante de KOH al 45%p/p se realizan dos pasos de grabado anisotrópico, el primer paso inicia en las cavidades libres de SiO₂, dando origen a la formación de una cavidad en forma de pirámide invertida, definida por las paredes de grabado (1 1 1) y orientadas a 54.7° con respecto a la superficie (1 0 0), ver Figura 3.6. Los bordes superiores de la pirámide van sobre las direcciones <1 1 0> ya que estos bordes son intersecciones de los planos (1 0 0) y (1 1 1). Las direcciones <1 1 0> se representan en la Fig.3.6b como líneas punteadas que indican la separación entre los planos contiguos (1 1 1).

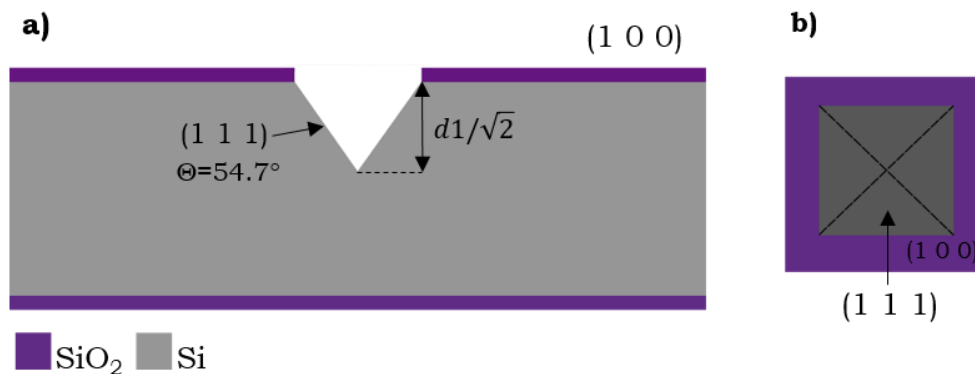


Figura 3. 6 a) Pirámide invertida (primer paso de micromaquinado), b) vista superior de la cavidad que muestra las cuatro paredes (1 1 1).

Para el segundo paso de grabado, se elimina todo el óxido restante de la superficie superior (Fig.3.7a), en consecuencia, la superficie queda totalmente expuesta a la solución grabante, y se le denomina "superficie abierta". A partir de ahora inicia el segundo paso de micromaquinado, donde la superficie (1 0 0) se va a empezar a grabar a una velocidad uniforme, y los 4 bordes convexos que son la intersección de (1 0 0) y (1 1 1) (ejes de superficie señalados por las flechas V1), se empiezan a grabar como un conjunto microscópico de varios planos a una velocidad más alta, y dando como resultados planos (1 1 4) (con un ángulo de $\phi=19.5^\circ$ con respecto a {1 0 0}) ver Fig.3.8. A medida que avanza el grabado, los planos de grabado (1 1 1) son gradualmente sustituidos por los planos (1 1 4).

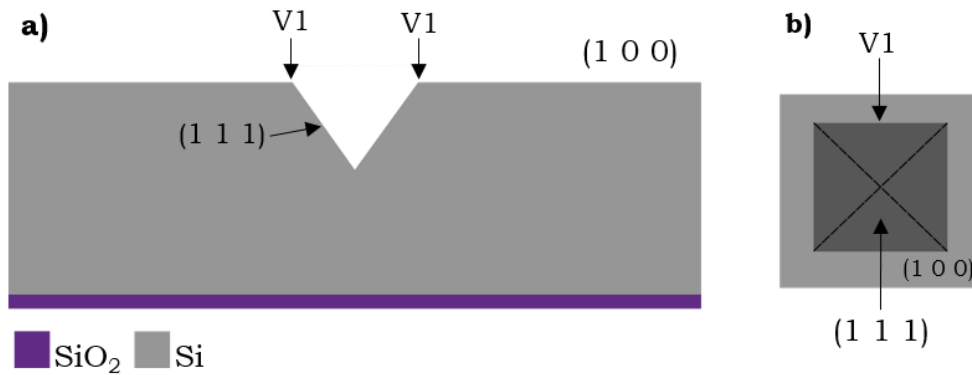


Figura 3. 7 Superficie libre de SiO₂, denominada "superficie abierta", b) vista superior de los cuatro bordes <1 1 0>.

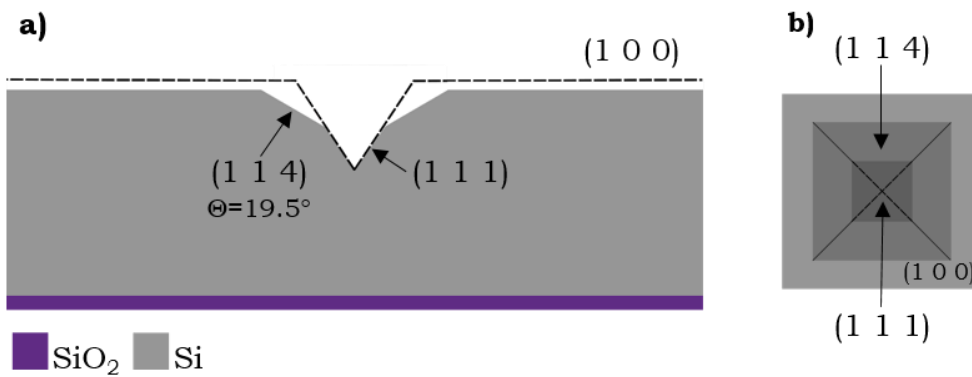


Figura 3. 8 Desarrollo progresivo de los planos (1 1 4) (segundo paso de micromaquinado), b) vista superior de los cuatro planos (1 1 4).

Después de un tiempo corto de grabado, los planos de grabado (1 1 4) sustituyen en su totalidad a los planos (1 1 1), uniéndose en la parte inferior de la cavidad y dando paso a una pirámide más amplia, donde los cuatro bordes de la base (intersección de (1 0 0) y (1 1 4)) presentan una ligera curvatura, Fig. 3.9b.

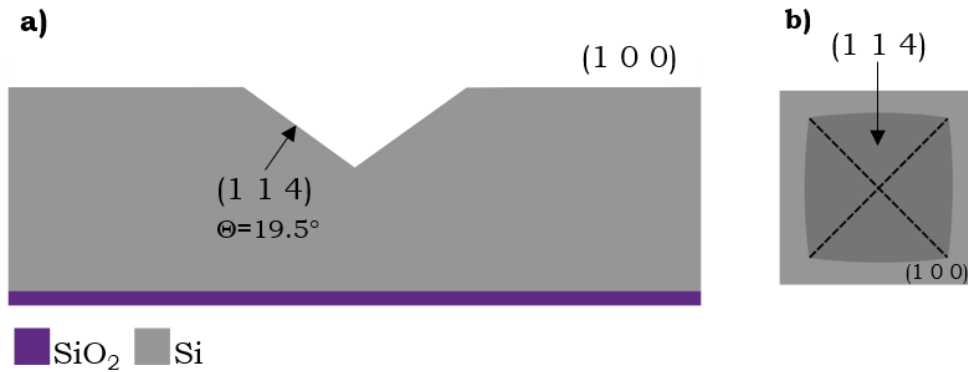


Figura 3. 9 a) Evolución de la cavidad, b) unión de las paredes (1 1 4).

Cuando los planos (1 1 4) se unen en la parte inferior de la cavidad, hay un mecanismo donde surge un plano que tiene un grabado más lento (en una cavidad el plano de grabado más lento define la forma geométrica), formando una región fenomenológicamente plana donde se establece la sagita (S), cuya profundidad es geoméricamente dependiente del valor d1, ver Fig.3.10. Con el grabado adicional, la zona plana inferior se comporta como el plano de grabado (1 0 0), que se desarrolla paralelo a la superficie superior, por esta razón la cavidad evoluciona manteniendo la misma profundidad.

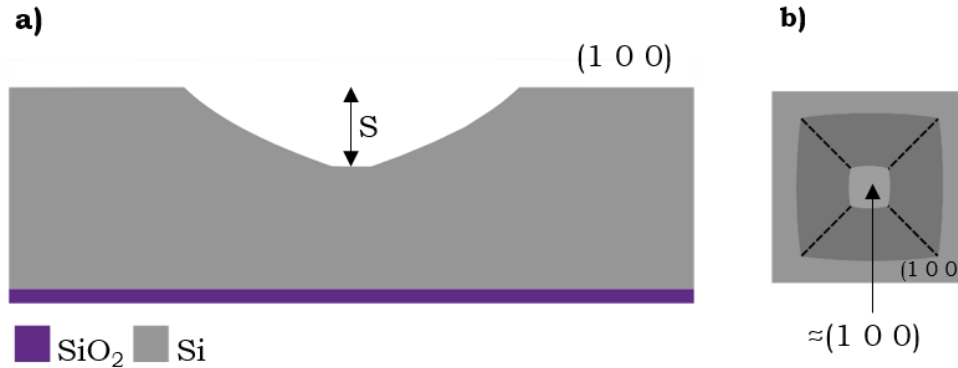


Figura 3. 10 Cavidad con sagita definida, b) vista superior.

Con el avance del grabado la cavidad se va ampliando y la superficie de fondo se va desarrollando con una tendencia esférica, mientras que las esquinas presentan un comportamiento de baja razón de grabado (casi no se ven afectadas por el grabante), lo que genera en la cavidad un perímetro de apariencia cuadrada, ver Fig.3.11, donde el fondo parece "levantarse" hacia la superficie superior.

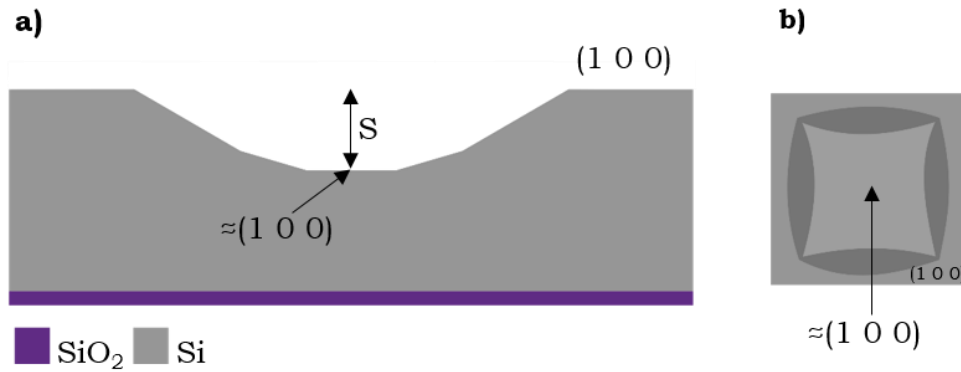


Figura 3. 11 Cavity asférica en evolución, b) vista superior.

Dependiendo del valor de d_1 , llega un punto donde las esquinas se igualan con la superficie superior (1 0 0), en ese momento se empiezan a grabar como un plano perpendicular a la orientación $\langle 1 1 0 \rangle$, con una geometría inicial recta que después irá ampliándose y redondeándose a medida que se reducen las paredes (1 1 4) y en general la cavity empieza a redondearse (Fig.3.12 y 3.13).

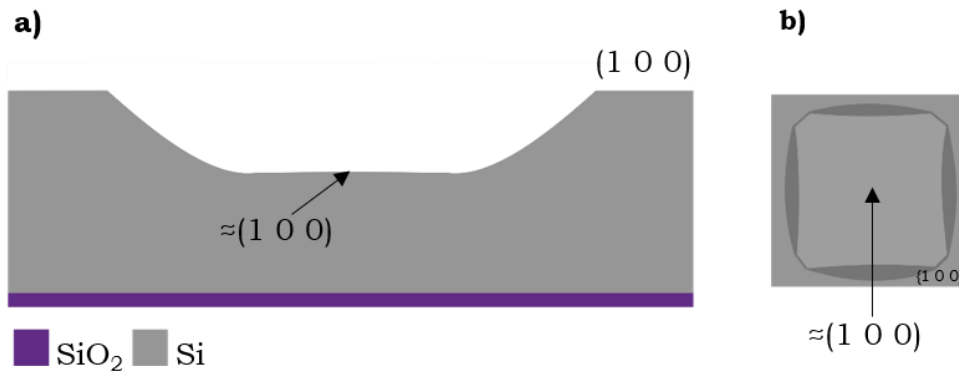


Figura 3. 12 Cavity asférica con geometría cuadrada, b) vista superior.

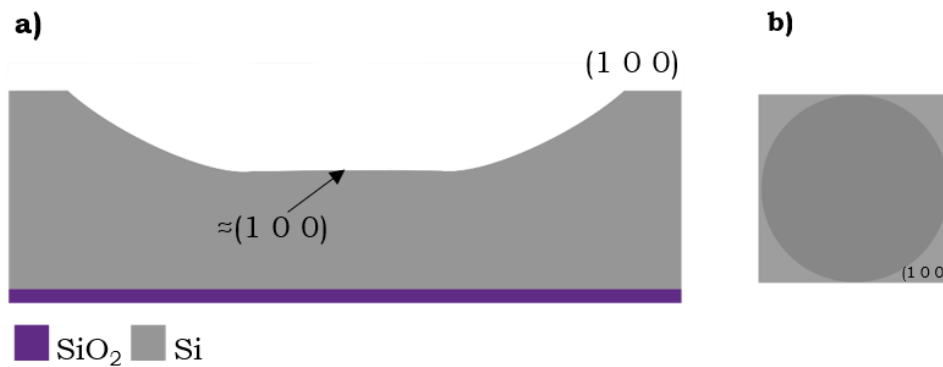


Figura 3. 13 Cavity asférica con geometría circular, b) vista superior.

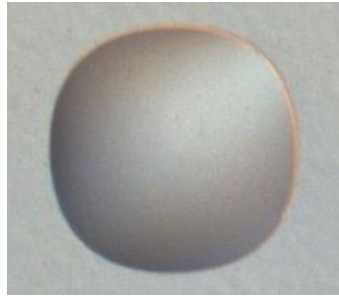
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 CAVIDADES DESARROLLADAS CON 3 HORAS DE GRABADO A “SUPERFICIE ABIERTA”.

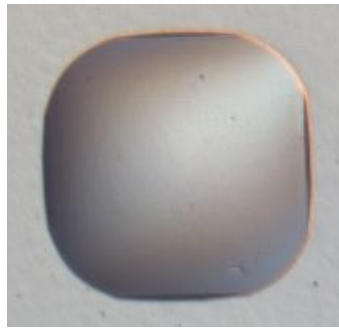
Este capítulo inicia con la presentación de una progresión geométrica del micromaquinado de 4 cavidades diferentes, de la simetría cuadrada inicial hasta la forma circular, con las dimensiones $d1$ propicias para la técnica de grabado. Esto es, que su desarrollo como cavidad esférica se logre en tiempos prácticos conservando la integridad del sustrato, ya que un tiempo excesivo de grabado (mayor a 15 horas a la temperatura de 60 °C), causará el adelgazamiento extremo de los sustratos de 300 micras de grosor, el cual es típico para los procesos convencionales de microelectrónica.

En las Figuras 4.1a y 4.2a se observa una cavidad desarrollada a partir de $d1=6\mu\text{m}$, donde las paredes (1 1 4) se han consumido en su totalidad y se establece una sagita de $2.8\mu\text{m}$, las esquinas se presentan redondeadas pero su geometría aún no es completamente circular. Para aplicaciones ópticas, este tipo de cavidad con sagita muy reducida, resulta poco práctica, considerando además la geometría parcialmente circular. Sin embargo, el fondo proyecta una cierta asfericidad gradual, donde la región central ya evidencia una zona aparentemente plana que se aproxima a la superficie (1 0 0). Para $d1=10\mu\text{m}$ (Figs.4.1b y 4.2b) las esquinas con tendencia al redondeo son más evidentes, las cuales al ampliarse tienden a reducir la longitud de las paredes (1 1 4), en su correspondiente imagen SEM, Figura 4.2b, se presenta una mejor resolución de la morfología.

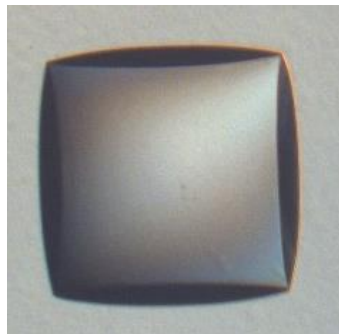
Siguiendo la secuencia micrográfica, en las Figs. 4.1c y 4.2c se muestra la cavidad producida por $d1=16\mu\text{m}$, esta estructura presenta una geometría más cuadrada, las esquinas muestran un comportamiento de baja razón de grabado, mientras que la superficie del fondo se va desarrollando con una tendencia esférica, presentando un efecto donde la superficie inferior adyacente a las esquinas tienden a “levantarse” hacia la parte superior de la cavidad, cuando la superficie inferior alcanza a la superficie superior, cada esquina iniciará su redondeo alrededor de los ejes $\langle 1 1 0 \rangle$ y con el grabado subsecuente tenderán a redondearse. Finalmente, en la Figura 4.2d se presenta la cavidad producida por $d1=20\mu\text{m}$, que muestra características similares a las de la cavidad $d1=16\mu\text{m}$, sin embargo, se puede apreciar que las paredes (1 1 4) tienen ligeramente mayor amplitud, ya que al ser mayor la magnitud de $d1$ presenta una evolución más lenta comparada con las cavidades de menor $d1$. Esto es, para una cavidad dada, a medida que incrementa $d1$, mayor será el tiempo de grabado necesario para alcanzar su geometría circular.



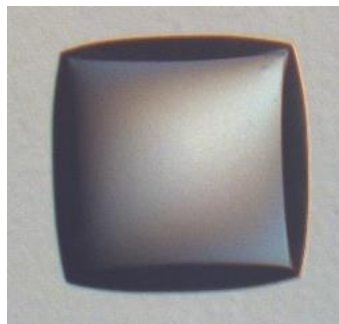
a)



b)

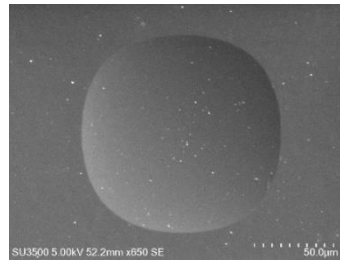


c)



d)

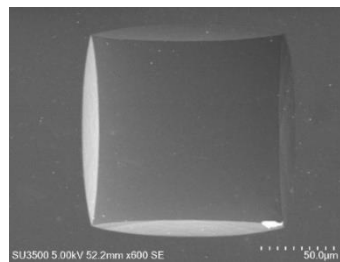
Figura 4. 1 Micrografías ópticas (Objetivo x20) de cavidades esféricas con: a) $d_1=6\mu\text{m}$, b) $d_1=10\mu\text{m}$, c) $d_1=16\mu\text{m}$ y d) $d_1=20\mu\text{m}$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 3 horas.



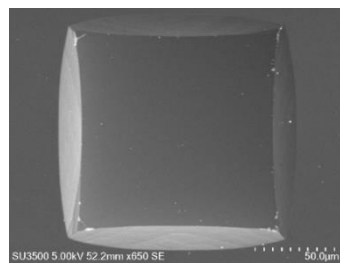
a)



b)



c)



d)

Figura 4. 2 Micrografías SEM de cavidades esféricas con: a) $d_1=6\mu\text{m}$, b) $d_1=10\mu\text{m}$, c) $d_1=16\mu\text{m}$ y d) $d_1=20\mu\text{m}$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 3 horas.

En las Figs. 4.3 y 4.4 se presentan las gráficas de la reconstrucción del perfil de las cavidades, a partir de los trazos en H, T, N y B, obtenidos con el perfilómetro alfa step. En todos los casos se puede apreciar la precisión de los 4 barridos longitudinales para reproducir la curvatura real de las cavidades. En las gráficas semilogarítmicas del lado derecho, para cada cavidad se presentan los 3 criterios propuestos de la zona central que se comporta químicamente como la superficie (1 0 0) y en la tabla 3.1 se presentan los resultados de cada cavidad.

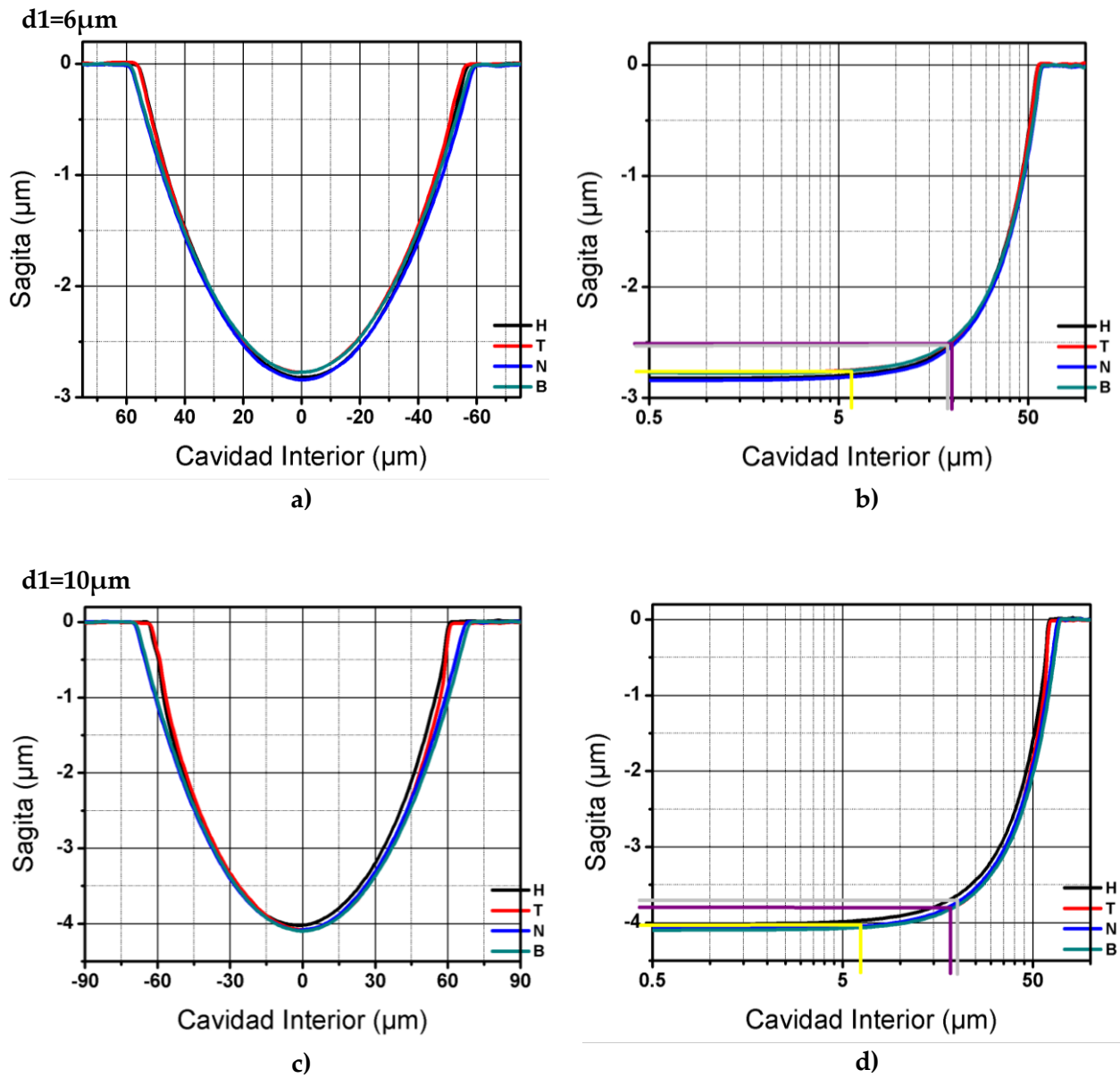
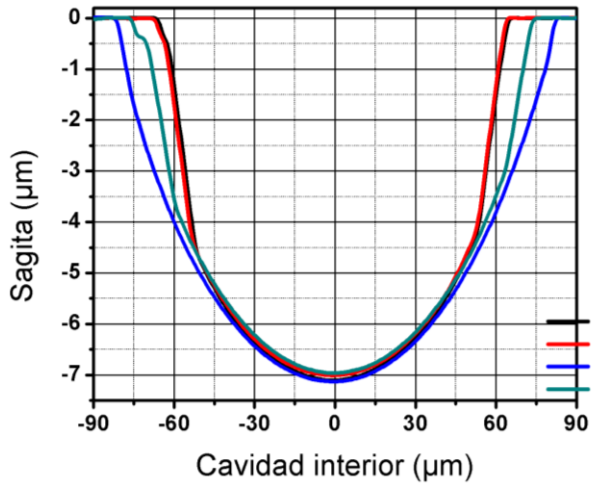
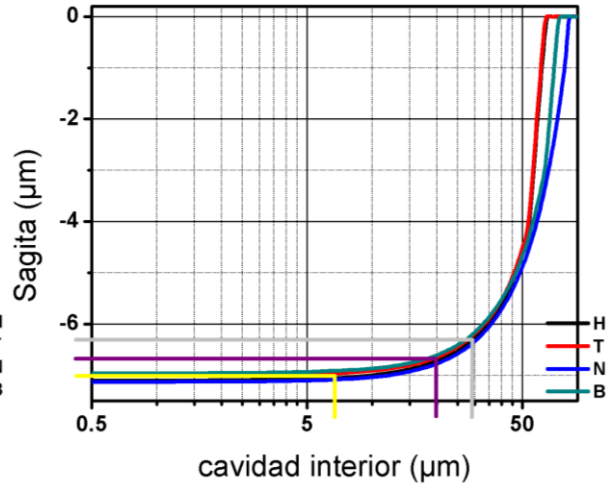


Figura 4. 3 Reconstrucción basada en alfa step de las cavidades con a) $d1=6\mu\text{m}$ y c) $d1=10\mu\text{m}$ con tiempo de grabado de 3hrs, b), d) mitad de la cavidad en escala semilogarítmica, ilustrando los 3 métodos de análisis de la región central.

$d1=16\mu\text{m}$

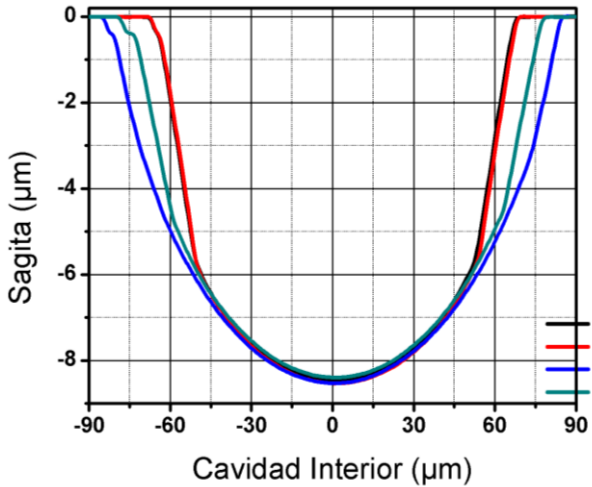


e)

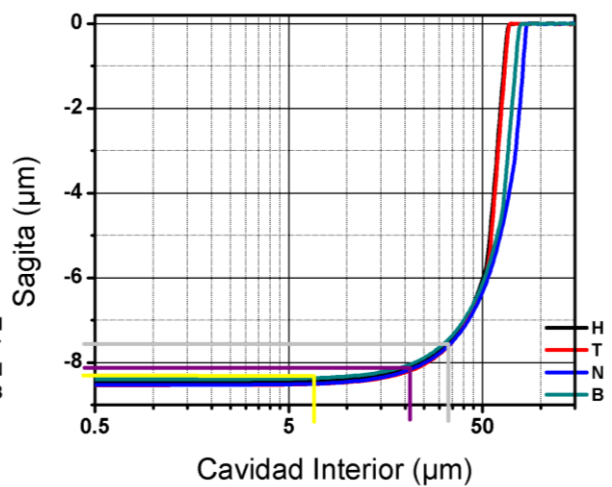


f)

$d1=20\mu\text{m}$



g)



h)

Figura 4. 4 Reconstrucción basada en alfa step de las cavidades con e) $d1=16\mu\text{m}$ y g) $d1=20\mu\text{m}$ con tiempo de grabado de 3hrs, f) y h) mitad de la cavidad en escala semilogarítmica, ilustrando los 3 métodos de análisis de la región central.

Tabla 4.1 Resultados del análisis de la región central que se comporta como (1 0 0), con 3 horas de grabado.

d1 (μm)	Di con 0.1μm de variación (μm) Línea amarilla	Di con 0.3μm de variación (μm) Línea morada	Di - 10% de la Sagita (μm) Línea gris
6	12	40	37
10	12.5	36	40
16	13.5	40	58
20	13.5	42	66

La cavidad desarrollada con $d1=200\mu\text{m}$ (Fig.4.5), únicamente se presenta por su aplicación para monitorear la profundidad de grabado durante el desarrollo de las pirámides invertidas. Dada su dimensión, el tiempo de grabado resulta corto para observar algún efecto importante, después de 3 horas de grabado a superficie abierta, esta cavidad no va a variar en profundidad, pero si se formarán las paredes (1 1 4). En la Figura 4.6 se presenta la representación gráfica solo como referencia, para apreciar la superficie del fondo totalmente plana.

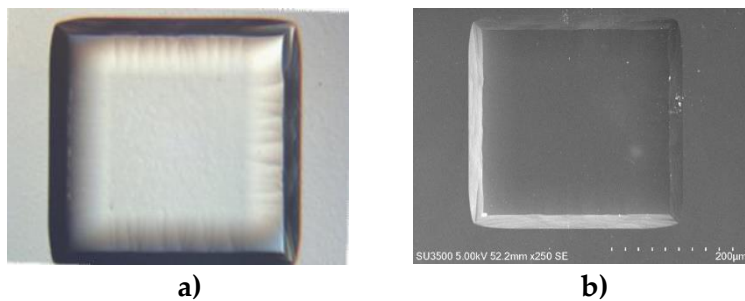


Figura 4. 5 Microcavidades con $d1=200\mu\text{m}$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 3 horas; a) Micrografía óptica (Objetivo x20), b) Micrografía SEM.

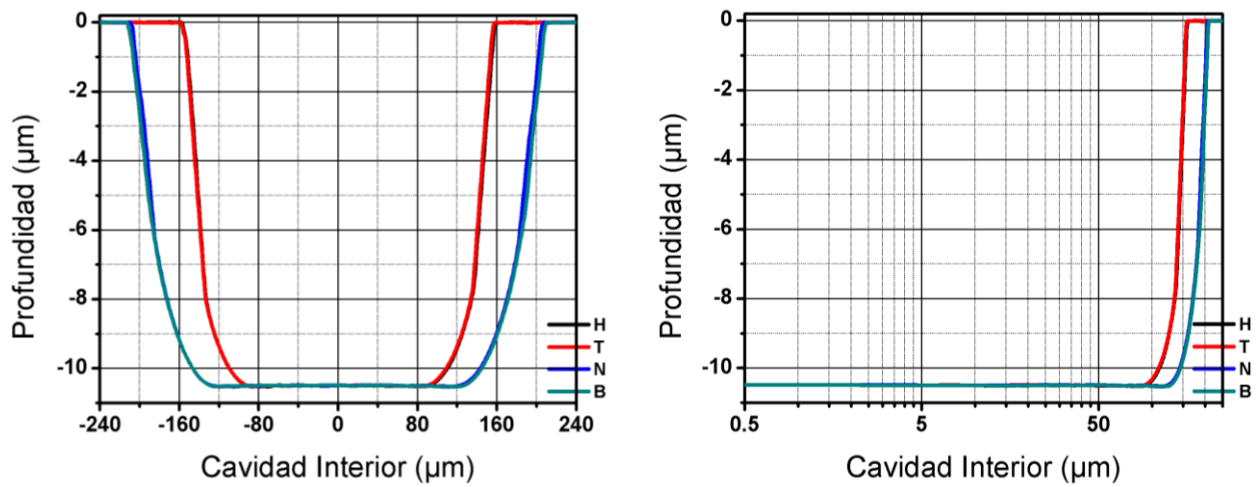


Figura 4. 6 Reconstrucción basada en alfa step de una cavidad con $d1=200\mu\text{m}$ y tiempo de grabado de 3hrs, b) mitad de la cavidad en escala semilogarítmica.

En las micrografías presentadas en las Figs. 4.1 y 4.5a, se considera la magnificación del microscopio óptico, con el objetivo x20 que permite obtener un enfoque de la superficie y el fondo de la cavidad, en consecuencia, permite observar un campo uniforme “sin defectos”. Pero la constante manipulación de las obleas de silicio genera defectos y contaminación superficial, visibles con objetivos de mayor magnificación (x50 o x100). Por otro lado, en las micrografías obtenidas con SEM (Figs.4.2 y 4.5b) se observa residuos orgánicos propios del proceso de fabricación, los cuales por su composición química al ser barridos por el haz de electrones se imprimen como puntos y/o manchas en color blanco.

El monitoreo principal del proceso se realizó con el microscopio óptico Leitz Orthoplan, con esta herramienta también se midió la longitud en H, T, N y B, en un total de 94 cavidades (26 para d1=6 μ m, 28 para d1=10 μ m, 24 para d1=16 μ m y 16 para d1=20 μ m), los resultados recabados para las cavidades del mismo d1 inicial se presentan como valores promedio en la tabla 4.2. Para datos más precisos y comparar con los otros métodos de análisis, en la tabla 4.3 se presentan los valores promedio de las mediciones en longitud y profundidad realizadas con alfa step (para un total de 52 cavidades; 16 para d1=6 μ m, 16 para d1=10 μ m, 12 para d1=16 μ m y 8 para d1=20 μ m)).

Tabla 4.2 Mediciones con microscopio óptico para microcavidades con 3hr de grabado.

d1 (μ m)	d1 pirámide (μ m)	T,H (μ m)	N,B (μ m)
6	7	105	110
10	13	121	135
16	19	129	162
20	22	132	164
200	216	311	415

Tabla 4.3 Mediciones con alpha step para microcavidades con 3hr de grabado.

d1 (μ m)	Sagita (μ m)	T,H (μ m)	N,B (μ m)
6	2.6	113	117
10	4.2	126	142
16	7	133	155
20	8.2	137	162
200	Profundidad 10.5	315	417

Una característica a comentar es la comparación de la sagita con la profundidad inicial de la pirámide, donde se aprecia una reducción significativa. Por ejemplo, para una pirámide invertida obtenida a partir de $d_1=10\mu\text{m}$, desarrolla una profundidad de $7.07\mu\text{m}$, en la segunda fase de micromaquinado la cavidad se ha grabado por 3 horas y se establece una sagita $S=4.2\mu\text{m}$. Cuando inicia el grabado a superficie abierta, el grabado vertical afecta las paredes (1 1 1), mientras surgen las paredes (1 1 4), por lo que el fondo queda intacto por el remanente de las paredes (1 1 1), hasta su grabado completo. Este mecanismo conduce a una disminución en profundidad de casi $3\mu\text{m}$, el mecanismo de grabado es general y lo mismo sucede en proporción de la dimensión de cada cavidad.

Para las micrografías SEM (Fig. 4.2), en la tabla 4.4 se muestra el resultado de las longitudes en los ejes T, H, N y B (promedio de 3 cavidades por cada valor de d_1), estos resultados no aportan más elemento de análisis, por el reducido número de cavidades medidas, pero nos permite compararlos y concluir que están dentro de los resultados promedio obtenidos con microscopio óptico y alpha step.

De las micrografías 4.1a-d y 4.2a-d se puede concluir que a medida que las cavidades incrementan de longitud inicial ($d_1=6\mu\text{m}$ hacia $20\mu\text{m}$), la diferencia de las dimensiones T, H con N, B incrementan progresivamente, porque al ser d_1 cada vez mayor, los tiempos de grabado para definir la pirámide invertida y la simetría circular, serán proporcionalmente mayores. Es decir que, para este tiempo corto de grabado de 3 horas, la cavidad de $d_1=6\mu\text{m}$ es casi circular, pero a medida que incrementa d_1 , la cavidad resultara más aproximada a una geometría cuadrada.

Tabla 4.4 Mediciones con SEM para microcavidades con 3hr de grabado.

d_1 (μm)	T,H (μm)	N,B (μm)
6	113	119
10	122	138
16	131	168
20	134	172
200	317	423

4.2 CAVIDADES DESARROLLADAS EN T=6 HORAS DE GRABADO A "SUPERFICIE ABIERTA".

Ahora, se presenta el análisis para las cavidades desarrolladas con grabado de 6 horas. La cavidad desarrollada a partir de $d_1=6\mu\text{m}$ (Fig.4.7a y 4.9a), después del segundo micromaquinado se evidencia un ensanchamiento del diámetro superior y la geometría es completamente circular. Para la cavidad que evoluciona a partir de $d_1=10\mu\text{m}$ (Fig.4.7b y 4.9b), presenta una geometría casi circular con aumento del diámetro en función del tiempo de grabado. Para el caso de $d_1=16\mu\text{m}$ (Fig.4.8c y 4.9c) presenta una simetría aún cuadrada, pero con avanzado redondeo de las esquinas, logrando que las paredes (1 1 4) vayan reduciendo su longitud; para llegar a la simetría circular aún se requieren al menos dos horas de grabado. Con $d_1=20\mu\text{m}$, en la micrografía de la Fig. 4.8d y 4.9d, se observa que la cavidad presenta más tendencia a la simetría cuadrada y que las paredes (1 1 4) son más amplias que en la cavidad con $d_1=16\mu\text{m}$; las esquinas se han igualado con la superficie y su grabado con tendencia circular será alrededor de los ejes $\langle 1\ 1\ 0 \rangle$.

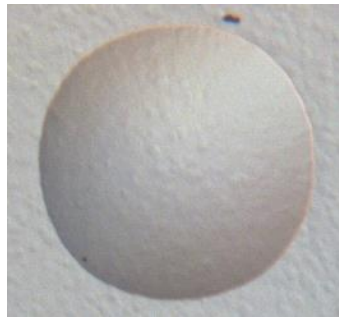
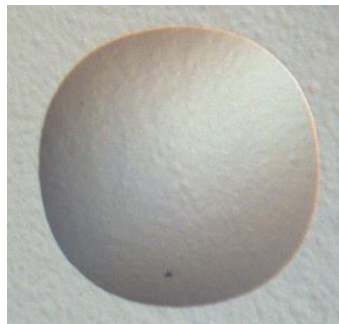
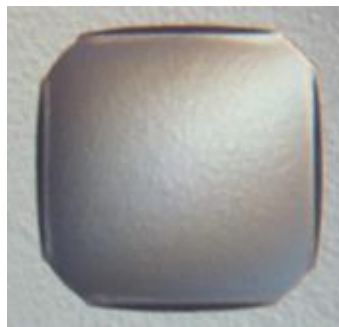
**a)****b)**

Figura 4. 7 Micrografías ópticas (Objetivo x20) de cavidades esféricas con: a) $d_1=6\mu\text{m}$, b) $d_1=10\mu\text{m}$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 6 horas.



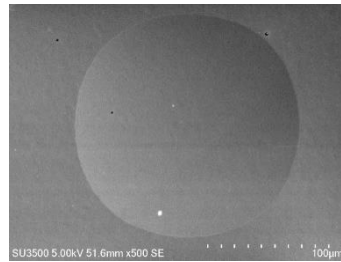
c)



d)

Figura 4. 8 Micrografías ópticas (Objetivo x20) de cavidades esféricas con: c) $d_1=16\mu m$ y d) $d_1=20\mu m$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 6 horas.

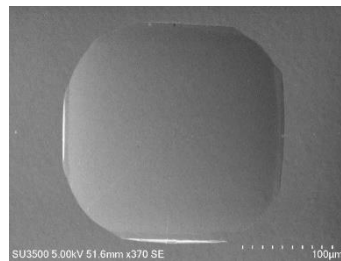
En las micrografías SEM de las Fig. 4.9a y b se observa con mejor claridad las primeras dos cavidades, las cuales presentan una morfología esférica prácticamente bien desarrolladas. Es importante resaltar que, en este punto, cualquier tiempo adicional de grabado dará lugar a una progresiva tendencia a mejorar la simetría circular, con incremento del diámetro, pero conservando la sagita sin alteración. Si se aplican tiempos adicionales de grabado, los parámetros ópticos de las cavidades, variarán ligeramente.



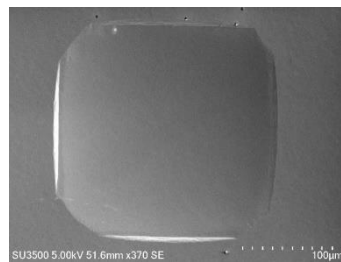
a)



b)



c)

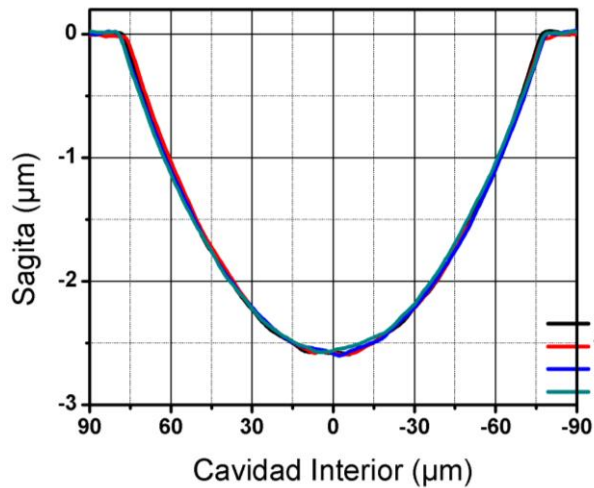


d)

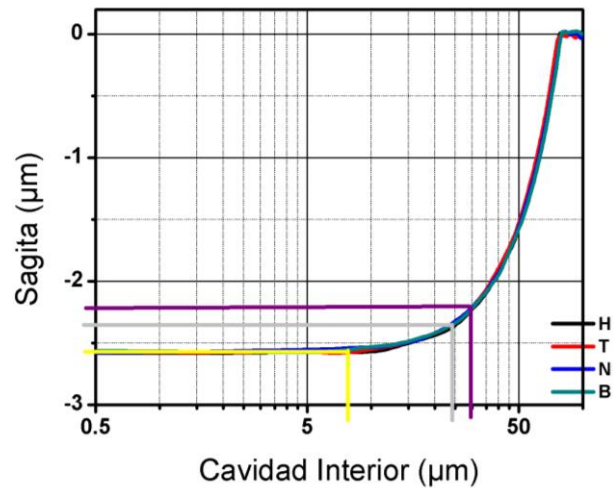
Figura 4.9 Micrografías SEM de cavidades esféricas con: a) $d1=6\mu\text{m}$, b) $d1=10\mu\text{m}$, c) $d1=16\mu\text{m}$ y d) $d1=20\mu\text{m}$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 6 horas.

En las Figs. 4.10 y 4.11 se presentan las gráficas de la reconstrucción del perfil de las cavidades, a partir de los trazos en H, T, N y B, obtenidos con el perfilómetro alfa step. En este caso y en los subsiguientes, se puede apreciar la precisión de los 4 barridos longitudinales para reproducir la curvatura real de las cavidades. En las gráficas semilogarítmicas del lado derecho, para cada cavidad se presentan los 3 criterios propuestos para la zona central que se comporta como la superficie (1 0 0) y los resultados se presentan en la tabla 4.5.

$d1=6\mu\text{m}$

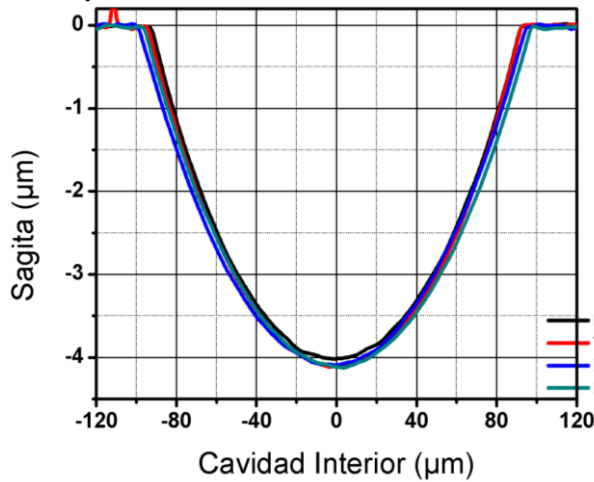


a)

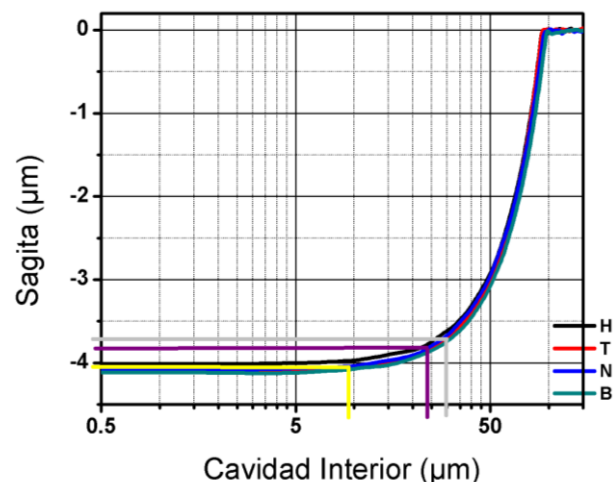


b)

$d1=10\mu\text{m}$



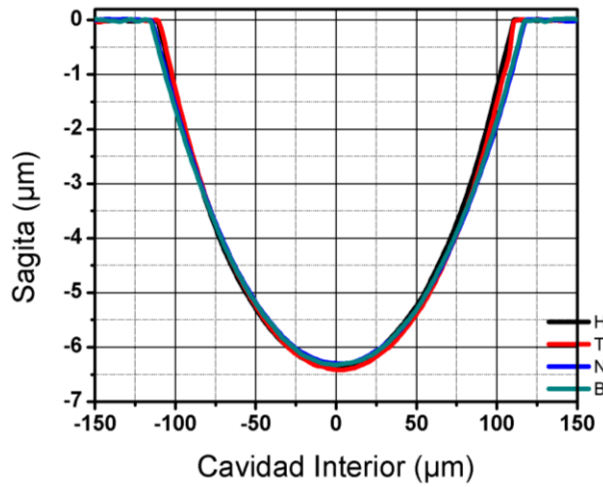
c)



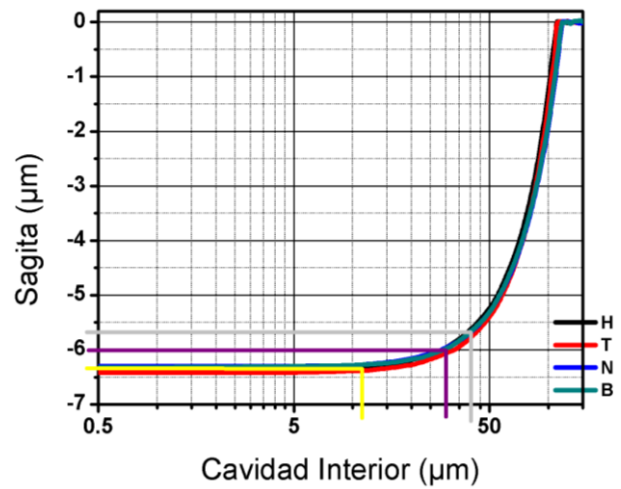
d)

Figura 4. 10 Reconstrucción basada en alfa step de las cavidades con a) $d1=6\mu\text{m}$ y c) $d1=10\mu\text{m}$, con tiempo de grabado de 6hrs. b, d) mitad de la cavidad en escala semilogarítmica, ilustrando los 3 métodos de análisis de la región central.

d1=16µm

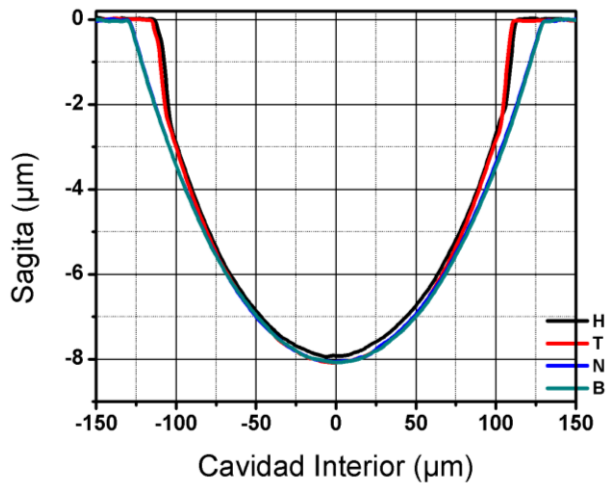


e)

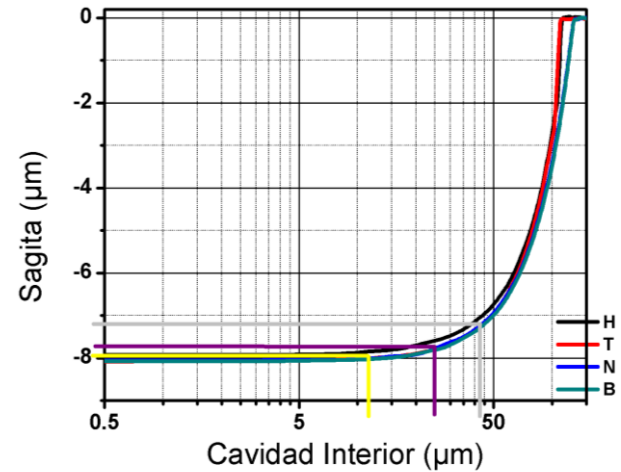


f)

d1=20µm



g)



h)

Figura 4. 11 Reconstrucción basada en alfa step de las cavidades con e) $d1=16\mu\text{m}$ y g) $d1=20\mu\text{m}$, con tiempo de grabado de 6hrs. f, h) mitad de la cavidad en escala semilogarítmica, ilustrando los 3 métodos de análisis de la región central.

Tabla 4.5 Resultados del análisis de la región central que se comporta como (1 0 0), con 6 horas de grabado.

d1 (µm)	Di con 0.1µm de variación (µm) Línea amarilla	Di con 0.3µm de variación (µm) Línea morada	Di - 10% de la Sagita (µm) Línea gris
6	19	47	60
10	19	47	60
16	22	60	80
20	23	50	85

Nuevamente, la cavidad desarrollada a partir de $d1=200\mu\text{m}$, se vuelve a presenta como monitor de profundidad de grabado durante el primer micromaquinado. Después de 6 horas de grabado a superficie abierta, esta cavidad no varía en profundidad, pero si se grabarán las paredes (1 1 4) (Fig.4.12). En la Figura 4.13 se presenta el análisis gráfico de la cavidad solo como referencia, para apreciar el fondo totalmente plano.

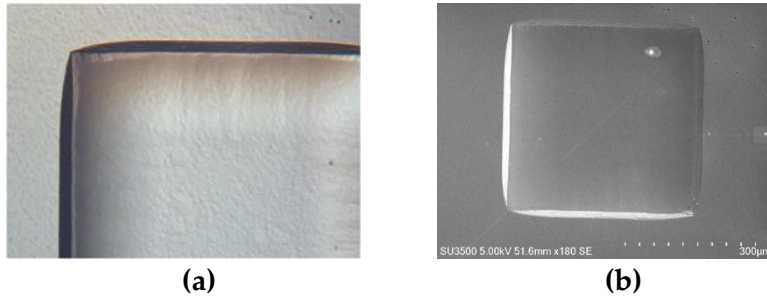


Figura 4. 12 Microcavidades con $d1=200\mu\text{m}$ y segundo maquinado con tiempo de grabado de 6 horas; a) Micrografía óptica (Objetivo x20), b) Micrografía SEM.

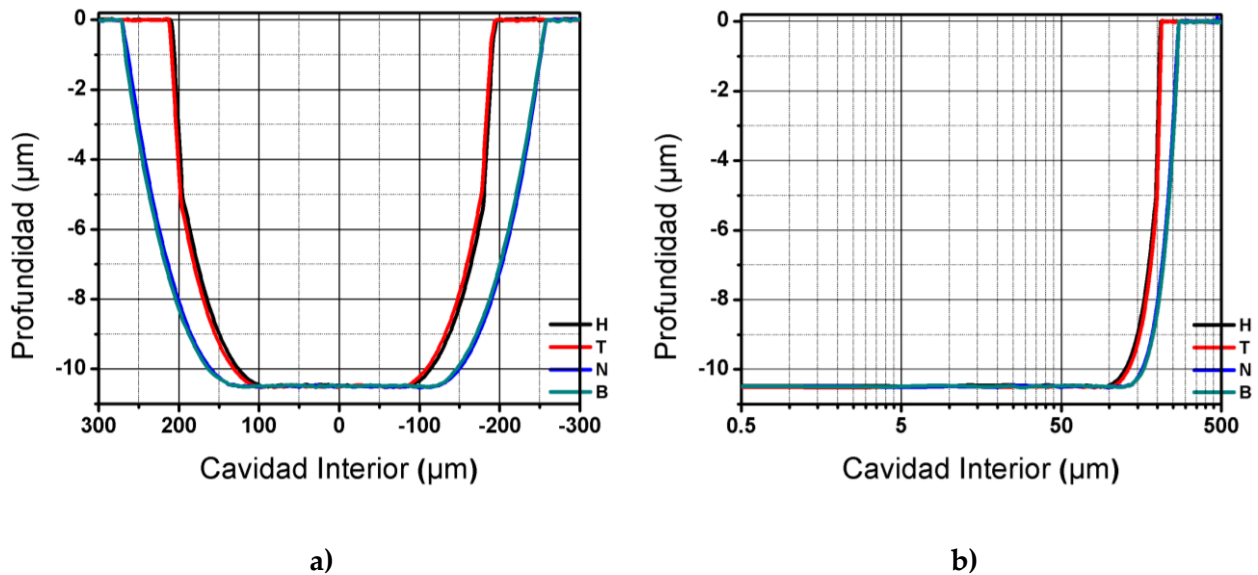


Figura 4. 13 a) Reconstrucción basada en alfa step de una cavidad con $d1=200\mu\text{m}$ y tiempo de grabado de 6hrs, b) mitad de la cavidad en escala semilogarítmica. (ML1B2).

Los resultados de metrología obtenidos con microscopio óptico son presentados en la tabla 4.6, midiéndose un total de 89 cavidades (25 para $d1=6\mu\text{m}$, 24 para $d1=10\mu\text{m}$, 24 para $d1=16\mu\text{m}$ y 16 para $d1=20\mu\text{m}$). El resultado de las mediciones con alpha step, se presentan en la tabla 4.7, para un total de 54 cavidades (15 para $d1=6\mu\text{m}$, 18 para $d1=10\mu\text{m}$, 11 para $d1=16\mu\text{m}$ y 10 para $d1=20\mu\text{m}$). Entre los dos procedimientos de medición se observa gran concordancia en los resultados obtenidos.

Tabla 4.6 Mediciones con microscopio óptico para cavidades con 6 horas de grabado.

d1 (μm)	d1 pirámide (μm)	T,H (μm)	N,B (μm)
6	7	153	158
10	12	187	195
16	18	218	234
20	24	223	258

Tabla 4.7 Mediciones con alpha step para cavidades con 6 horas de grabado.

d1 (μm)	Sagita (μm)	T,H (μm)	N,B (μm)
6	2.3	148	150
10	4	188	195
16	6.4	222	234
20	8.1	234	262
200	Profundidad 10.5	407	526

En la tabla 4.8 se presentan las mediciones de T, H, N y B de las cavidades, obtenidos con microscopio SEM (3 cavidades por cada valor de d1), las cuales permiten observar que los datos de las tablas 4.6 y 4.7 están dentro de los resultados correspondientes, sin embargo, esta alternativa de caracterización se descarta como elemento de análisis, por el reducido número de cavidades medidas, sobre todo por la poca disponibilidad de la herramienta.

Tabla 4.8 Mediciones con SEM para microcavidades con 6hr de grabado.

d1 (μm)	T,H (μm)	N,B (μm)
6	154	160
10	190	198
16	219	239
20	222	257
200	410	541

Comparando los resultados de las tablas y gráficas correspondientes a los grabados de 3 y 6 horas. Podemos deducir que para cavidades que evolucionan a partir de $d1=6\mu\text{m}$ y $d1=10\mu\text{m}$ se requiere que el tiempo de grabado en la segunda fase de micromaquinado sea mayor a 3 horas, en 6 horas las cavidades a partir de $d1=6\mu\text{m}$ y $d1=10\mu\text{m}$ muestran una geometría completamente circular y un diámetro con decenas de micras mayor. Para las estructuras con $d1=16\mu\text{m}$ y $d1=20\mu\text{m}$, se requiere un tiempo de grabado mayor a 6 horas ya que como se observa en las micrografías el tiempo fue insuficiente para lograr una geometría circular.

En la gráfica de la Fig. 4.14 se presenta la sagita de cada cavidad en los dos tiempos de grabado, se comprueba que cuando se establece la sagita no varía, esta permanece constante en función del tiempo de grabado.

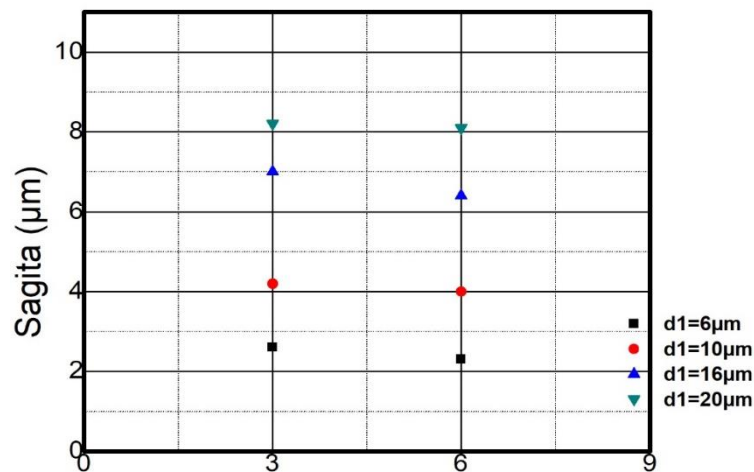


Figura 4. 14 Sagita en función del tiempo de grabado.

En la gráfica de la Fig. 4.15 se compara la amplitud de los barridos H, T, N y B, para cada $d1$ en los dos tiempos de grabado (3 y 6 hr). Se observa que a mayor tiempo de grabado la cavidad aumenta su amplitud y la geometría va evolucionando a una forma circular. En las primeras 3 horas de grabado los ejes H y T muestran una mayor discrepancia con N y B debido a la simetría cuadrada de las cavidades. Después de 6 hora de grabado la amplitud de las cavidades aumentó a más del doble comparadas con las de 3 horas, también se observa que los valores de H, T y N, B están más próximos entre sí, esto sucede cuando las cavidades presenten una geometría totalmente circular y los valores irán incrementando a la misma razón.

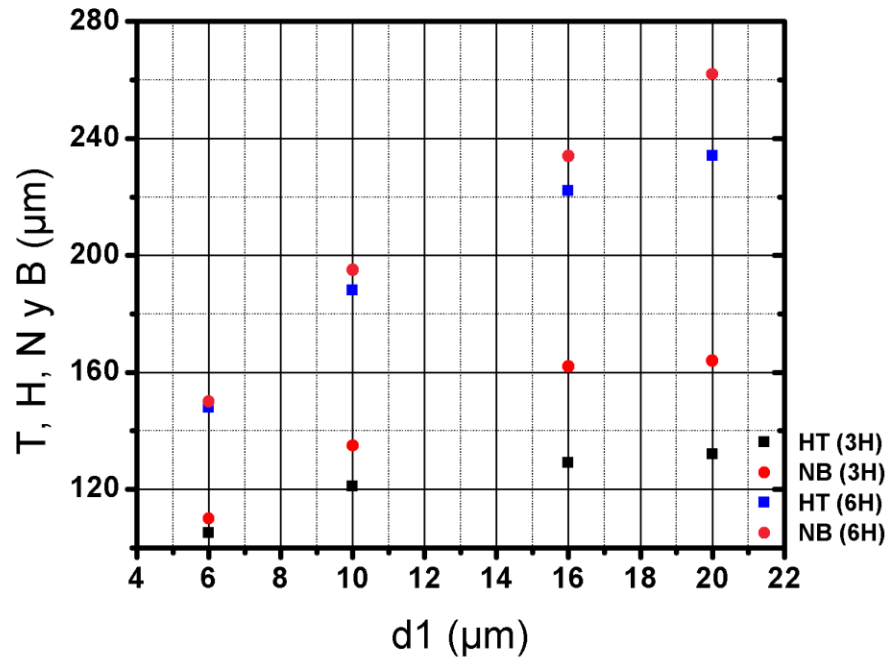


Figura 4. 15 Longitud HT y NB para $d1=6, 10, 16$ y $20\mu\text{m}$ en 3 y 6 horas de grabado.

4.3 ANÁLISIS FENOMENOLÓGICO DEL MECANISMO DE GRABADO.

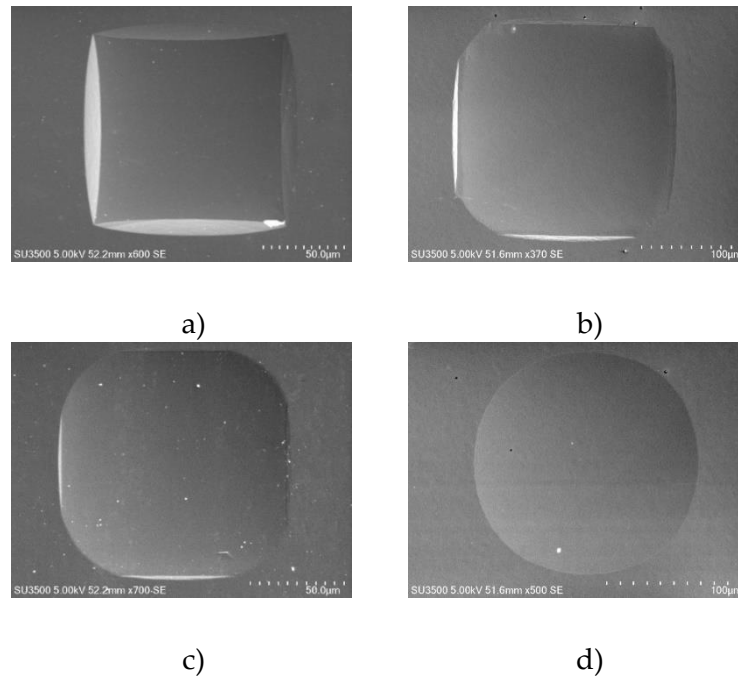


Figura 4. 16 Progresión del grabado de una cavidad cuadrada a una cavidad esférica circular.

Tomando como referencia la micrografía que se muestra en las Figuras 4.1b y 4.2b, esta cavidad de esquinas redondeadas está evolucionando de una pirámide invertida cuadrada perfecta con $d_1=10\mu\text{m}$, que luego de 3 horas de grabado, se puede visualizar como una microcavidad esférica con $\text{Sagita}=4.1\mu\text{m}$. El fondo proyecta una cierta esfericidad gradual, donde la región central evidencia una zona plana, cuyo perímetro podría variar según el tiempo de grabado. Bajo esta descripción morfológica, es necesario identificar la progresión de la curvatura, que realmente está definiendo el fondo. La evolución de la cavidad depende de dos mecanismos de grabado. Primero, cuando las cuatro paredes (1 1 1) desaparecen por completo debajo de las nuevas paredes (1 1 4) (la pirámide se consume), la parte inferior se define por una zona plana de velocidad de grabado inferior, que se comporta como el plano (1 0 0). En segundo lugar, una vez definidas las cuatro paredes (1 1 4), la cavidad muestra una expansión lenta, mientras que el fondo plano y la superficie superior se graban verticalmente a la misma velocidad. Este mecanismo y morfología iniciales están regulados por las esquinas, solo durante algunas decenas de minutos.

En consecuencia, la cavidad evoluciona inicialmente a partir de una geometría cuadrada, donde cada esquina, compuesta por una especie de planos de grabado lento, que durante el grabado no se ve afectada en su geometría.

Teniendo en cuenta que la superficie general está sometida a un grabado continuo, por lo que las paredes (1 1 4) se mantienen bajo un grabado radial lento, y las regiones cercanas a las esquinas no se ven afectadas durante algún tiempo, entonces el fondo adyacente parece "levantarse" hacia la superficie superior, pero este es el efecto del grabado de la superficie superior (1 0 0) e inferior central, ver Fig. 4.16a. Una vez que la superficie "en elevación" alcanza a la superficie superior, entonces la esquina tiende a grabarse en ambas direcciones laterales, siguiendo una tendencia de redondeo y consumiendo las paredes (1 1 4) cercanas, ver Fig.4.16b.

Debido a que este mecanismo comienza a redondear las esquinas, para cada redondeo de esquina, en este punto se evidencia una pendiente más prolongada hacia el fondo central y luego de un tiempo crítico de grabado esta pendiente tiende a disminuir. Después de alrededor de una hora de grabado, comienza a aproximarse al resto de la cavidad (Fig.4.16c), dando al final una cavidad simétrica que finalmente tiende a una estructura redonda como la que se muestra en la Fig. 4.16d.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De acuerdo con el planteamiento inicial, se hará un ejercicio de comparación de las 3 propuestas para evaluar el alcance perimetral de la zona plana con tendencia a la orientación (1 0 0). Tomando como ejemplo una cavidad que evoluciona a partir de $d_1=10\mu\text{m}$ y 3 horas de grabado con diámetro de $125\mu\text{m}$, en el primer criterio de variación de $0.1\mu\text{m}$ (línea amarilla) cubre un diámetro interno D_i de $12.5\mu\text{m}$, aun siendo una dimensión reducida que equivale al 10% de diámetro total de la cavidad, se observa como D_i presenta una ligera curvatura en los extremos, en consecuencia, los criterios de variación $0.3\mu\text{m}$ (línea morada) y 10% de la sagita (línea gris) alcanzan a cubrir zonas de mayor curvatura, como se muestra en la Fig.4.17. Dando como resultado que en ninguno de los diámetros de los 3 criterios tenemos una zona completamente horizontal (superficie (1 0 0)), entonces la zona central que se comporta como (1 0 0) es muy reducida, menor que el 10% del diámetro de la cavidad. De aquí se puede aseverar lo siguiente: a) que más del 90% de la cavidad presenta una superficie gradual de alto índice y b) una vez que se forma la sagita, toda la cavidad, se comporta químicamente como una superficie (1 0 0), porque con el grabado posterior la sagita ya no varía, pero a la vez incrementa su diámetro. Esta misma característica de grabado se obtiene en el resto de cavidades con diferente d_1 .

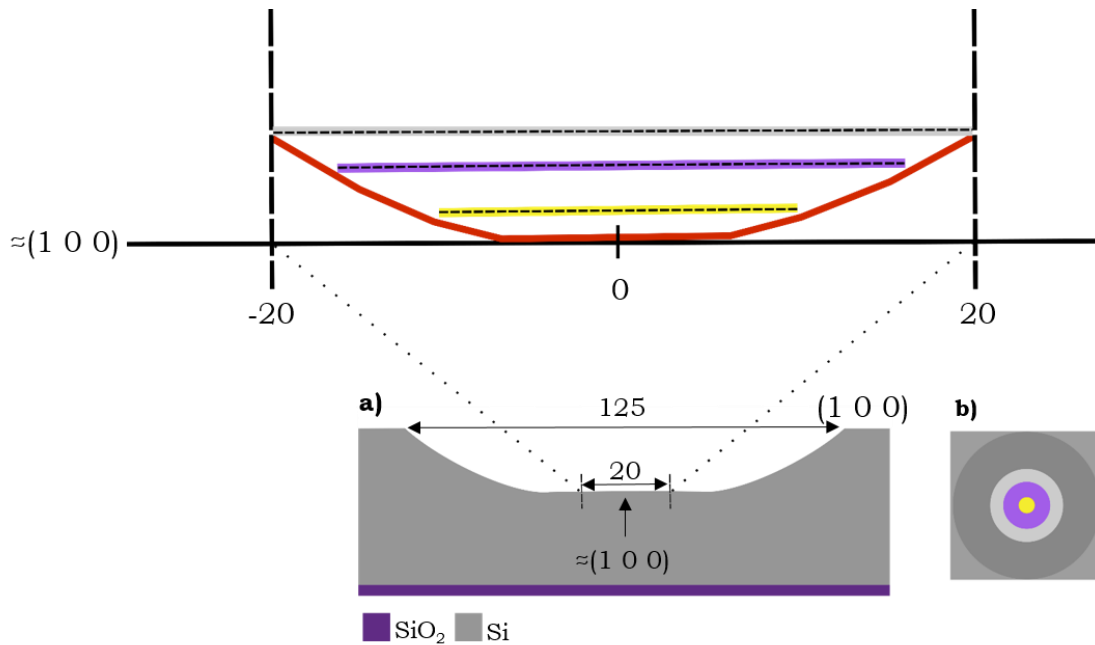


Fig.4.17 a) Criterios de evaluación de Di, b) Vista superior.

Las dimensiones determinadas que se presentan a continuación corresponden al diámetro interno (Di) de cada cavidad. Los resultados obtenidos en las cavidades con tiempo de grabado 3 y 6 horas. En todos los casos, para las propuestas con variación de profundidad 0.3 micras y variación en 10% de sagita, es evidente en los gráficos que las áreas resultantes muestran en los extremos las tendencias de pendiente, que no corresponden a una región plana.

Para los casos con variación de 0.1 micras, la zona correspondiente en todos los casos es aproximado al 10% del diámetro de la cavidad.

Las observaciones de las tendencias en morfología observadas en los casos para el tiempo de grabado igual a 3 horas, en general se aplican para los casos de 6 horas de grabado. Se conserva la sagita, pero las cavidades resultan con curvatura gradual en prácticamente toda su superficie.

Tabla 4.9 Resultados del análisis de la región central que se comporta como (1 0 0), con 3 horas de grabado

d1 (μm)	Di con 0.1 μm de variación (μm) Línea amarilla	Di con 0.3 μm de variación (μm) Línea morada	Di - 10% de la Sagita (μm) Línea gris
6	12	40	37
10	12.5	36	40
16	13.5	40	58
20	13.5	42	66

Tabla 4.10 Resultados del análisis de la región central que se comporta como (1 0 0), con 6 horas de grabado

d1 (μm)	Di con 0.1μm de variación (μm) Línea amarilla	Di con 0.3μm de variación (μm) Línea morada	Di - 10% de la Sagita (μm) Línea gris
6	19	47	60
10	19	47	60
16	22	60	80
20	23	50	85

Tomando como ejemplo el último caso, correspondiente a una cavidad $d_1=20$ micras con 6 horas de grabado (Fig. 4.8d y 4.9d), que es un caso proporcional y similar en comportamiento al resto de las cavidades analizadas, las observaciones resultantes son las siguientes, concluyendo con una observación central o tesis. Aun cuando el gráfico presentado en color amarilla, en la Fig. 4.11h (variación 0.1 micras), parece una línea recta; esta aproximación arroja que fenomenológicamente la superficie “plana” corresponde a un diámetro aproximado de 23 micras, región que corresponde en tendencia al 10% del diámetro aparente de la cavidad, entonces a primera aproximación una región central bastante reducida domina el mecanismo total de grabado de la cavidad, porque la región central conserva la sagita invariante y la región radial con pared gradual de alto índice modula el mecanismo de crecimiento perimetral.

La propuesta de mecanismo fenomenológico de grabado o tesis, se expone en lo siguiente: considerando que las obleas de silicio comerciales utilizadas en estos experimentos, se caracterizan por una extrema planaridad con una rugosidad promedio no mayor a 10 nanómetros [20], el plantear una variación de planaridad en el rango de 0.1 micras, lleva a valorar que la superficie realmente plana resulta bastante menor a la zona perimetral de 23 micras planteada. Sin embargo, realizar un análisis más preciso, conlleva un estudio cuyas herramientas y metodología corresponden al trabajo futuro. Entonces el planteamiento o tesis por abordar es que, para este tipo de cavidades esféricas, existe una región central cuya morfología se desvía de la planaridad en ángulos menores a un grado, donde ya se puede hablar de una superficie gradual de alto índice, gradual indeterminada, pero con ligera variación creciente desde el centro, donde esta superficie gradual, químicamente (en la cinética de grabado) se comporta como una superficie aproximada a la orientación [1 0 0]. Es importante mencionar que las superficies estables de alto índice se componen de subceldas, originalmente inestables, pero al conformar una celda más amplia, existe un conjunto de esfuerzos mecánicos superficiales que regulan la estabilidad estructural de tales superficies de alto índice [53]. Es el caso que nos ocupa con la composición morfológica de nuestras cavidades; una región central compuesta pero estable que se comporta como una superficie (1 0 0); y una superficie perimetral, con ángulo gradual hasta la superficie planar (1 0 0), compuesta por planos de alto índice, cuya estabilidad vertical y radial es modulada por esfuerzos mecánicos superficiales.

4.5 APLICACIONES.

Las microcavidades de silicio en forma de depresiones esféricas, desarrolladas a partir de $d_1=10, 16$ y $20\mu\text{m}$, con una geometría espacial completamente circular, se utilizan principalmente para aplicaciones de óptica integrada debido a su morfología de alta calidad. Algunas aplicaciones: para acoplar luz a fibra óptica [54], detección óptica [55], imagen integral [56], sistemas microfluidicos bioquímicos [57], sensores de frente de onda [58], memorias ópticas [59], microlentes y escáneres [60]. También se ha utilizado como accesorios mecánicos para procesos de moldeo en caliente, en técnicas de moldeo para la fabricación de lentes de polímero, MLAs [61] y otros accesorios.

Considerando las superficies de alto índice cristalino, se abren amplias posibilidades para la fabricación y estudio de nuevos dispositivos cuyo funcionamiento depende de la orientación de la superficie. Considerando la amplitud de estas superficies, podrían ser lo suficientemente apropiadas para crecer algunas películas multicapa de semiconductores compuestos, para los dispositivos emisores de luz, haciendo que se puedan procesar muy cerca de la superficie superior del silicio (1 0 0). Además, también se podrían fabricar algunos transistores MOS y otros dispositivos de efecto de campo [6].

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO.

5.1 CONCLUSIONES.

En este proyecto de tesis de licenciatura, se estableció como objetivo principal describir la morfología final para las diferentes microcavidades esféricas fabricadas sobre superficie de silicio (1 0 0) con una etapa de fotolitografía y para dos tiempos de grabado diferentes (3 y 6 hr). Presentando los resultados aproximados del diámetro de la zona que se comporta como superficie (1 0 0). Después de analizar los resultados se presentan las siguientes conclusiones:

1. El micromaquinado anisotrópico del silicio monocristalino, es la técnica principal para dar forma a las microcavidades esféricas, con una sagita predecible, con dependencia directa a partir de la dimensión inicial de la cavidad cuadrada (d_1).
2. El proceso de grabado a base de KOH con concentración de 45 %p/p, se emplea como un sistema de grabado controlado y efectivo para maquinar estructuras esféricas de manera uniforme, con buena definición geométrica y baja rugosidad.
3. Para aplicaciones en el campo de la óptica integrada, se consideran cavidades producidas con dimensiones iguales o mayores a $d_1=10\mu\text{m}$, que producen una sagita útil para las aplicaciones requeridas.
4. Para evitar mala calidad de las estructuras (contaminación, deformación, rugosidad, etc), es importante mantener la temperatura de grabado a 60°C y seguir rutinas meticulosas de manipulación y limpieza de los sustratos.
5. Estas geometrías esféricas abren grandes oportunidades para el análisis y aplicaciones de la física de superficies y, además, dan lugar a nuevas posibilidades para obtener diversas microestructuras 3D.
6. Finalmente, para el tipo de cavidades fabricadas, se propone la influencia de una región central cuya morfología se desvía de la planaridad en ángulos menores a un grado, donde ya se puede considerar una superficie de alto índice, gradual indeterminada, pero con ligera variación creciente desde el centro, donde esta superficie gradual, químicamente (en la cinética de grabado) se comporta como una superficie aproximada a la orientación [1 0 0]. Por lo que, para las cavidades estudiadas, se propone una morfología compuesta por; una región central estructuralmente compuesta pero estable, que se comporta como una superficie (1 0 0); y una superficie perimetral, con ángulo gradual hasta la superficie planar (1 0 0), compuesta por planos de alto índice, cuya estabilidad vertical y radial es modulada por esfuerzos mecánicos superficiales.

5.2 TRABAJO A FUTURO.

Desarrollo de una técnica de micromaquinado multietapa, sobre silicio (1 0 0), para producir microestructuras esféricas con sagita variada. El enfoque clave se basaría en la superposición concéntrica de un patrón cuadrado dentro de una cavidad esférica, ver Fig.5.1b, seguido del desarrollo de la pirámide invertida (Fig.5.1c) y posteriormente la evolución de una segunda cavidad (sobre superficies graduales de alto índice), dando lugar a una velocidad de grabado variada. Las nuevas cavidades se analizarían e identificarían los pasos clave para el desarrollo de nuevas superficies graduadas de alto índice dentro de cavidades esféricas.

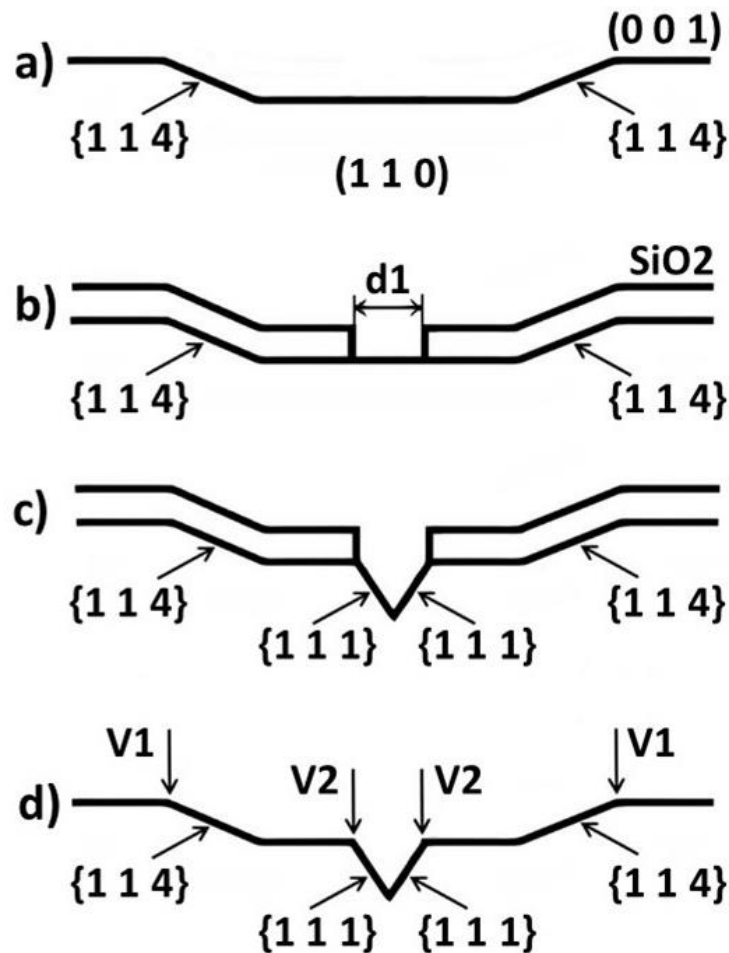


Figura 5.1 Croquis lateral progresivo de la evolución de dos cavidades concéntricas.

REFERENCIAS

- [1] H. Jiang y Z. Xuefeng, *Microlenses: Properties, Fabrication and Liquid Lenses*, 1 st Edition. Taylor & Francis Group, 2013.
- [2] H. A. Biebuyck y G. M. Whitesides', «Self-Organization of Organic Liquids on Patterned Self-Assembled Monolayers of Alkanethiolates on GoldI», *Am. Chem. Soc.*, mar. 1994.
- [3] L.-W. Pan, X. Shen, y L. Lin, «Microplastic Lens Array Fabricated by a Hot Intrusion Process», *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 13, n.o 6, pp. 1063-1071, dic. 2004, doi: 10.1109/JMEMS.2004.838363.
- [4] H. Choo y R. S. Muller, «Addressable Microlens Array to Improve Dynamic Range of Shack-Hartmann Sensors», *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 15, n.o 6, pp. 1555-1567, dic. 2006, doi: 10.1109/JMEMS.2006.886011.
- [5] A. Pan et al., «Fabrication of concave spherical microlenses on silicon by femtosecond laser irradiation and mixed acid etching», *Opt. Express*, vol. 22, pp. 15245-15250, jun. 2014, doi: 10.1364/OE.22.015245.
- [6] W. Calleja, «Silicon Micro-Lenses Based on Multi-step Lithography: New possibilities for Integrated Optics and Surface Sciences», *Acad. Lett.*, feb. 2021.
- [7] D. L. Kendall, G. R. de Guel, S. Guel-Sandoval, E. J. Garcia, y T. A. Allen, «Chemically Etched Micromirrors in Silicon», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 52, n.o 10, pp. 836-837, mar. 1988, doi: 10.1063/1.99300.
- [8] F. A. Zwanenburg et al., «Silicon quantum electronics», *Rev. Mod. Phys.*, vol. 85, jul. 2013, doi: 10.1103/RevModPhys.85.961.
- [9] D. Banks, *Microengineering, MEMS, and Interfacing: A Practical Guide*, 1st Edition. CRC Press, 2006.
- [10] J. C. Zolper y M. Skowronski, «Advances in Silicon Carbide Electronics», *MRS Bull.*, vol. 30, n.o 4, pp. 273-278, abr. 2005, doi: 10.1557/mrs2005.73.
- [11] P. Pal y K. Sato, *Silicon Wet Bulk Micromachining for MEMS*. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2017.
- [12] W. Borchardt-Ott, *Crystallography*. Berlin ; New York : Springer, 1995.
- [13] D. A. Neamen, *Semiconductor physics and devices: basic principles*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2012.
- [14] M. Shur, *Introduction to Electronic Devices*. 1996.
- [15] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed. New York, N.Y., 1981.
- [16] M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*, Second Edition, 2.a ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781482274004.
- [17] T.-R. Hsu, *MEMS and Microsystems: Design and Manufacture*. McGraw-Hill, 2002.
- [18] M. Elwenspoek y R. Wiegerink, «Silicon Micromachining», en *Mechanical Microsensors*, M. Elwenspoek y R. Wiegerink, Eds., en *Microtechnology and MEMS*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001, pp. 24-58. doi: 10.1007/978-3-662-04321-9_3.

- [19] G. S. May y C. J. Spanos, *Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. doi: 10.1002/0471790281.
- [20] H. E. Martínez Mateo, «Estudio del micromaquinado de volumen en silicio de alto índice», Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, 2013.
- [21] K. E. Bean, «Anisotropic etching of silicon», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 25, n.o 10, pp. 1185-1193, oct. 1978, doi: 10.1109/T-ED.1978.19250.
- [22] D. B. Lee, «Anisotropic Etching of Silicon», *J. Appl. Phys.*, vol. 40, n.o 11, pp. 4569-4574, oct. 1969, doi: 10.1063/1.1657233.
- [23] R. Leal-Romero, I. E. Zaldivar-Huerta, J. A. Reynoso-Hernández, C. Reyes-Betanzo, M. C. Maya-Sánchez, y M. Aceves-Mijares, «Proceso de grabado seco de silicio monocristalino para aplicaciones en guías de onda coplanares», *Rev. Mex. Física*, vol. 56, n.o 1, pp. 92-96, feb. 2010.
- [24] C. A. Mata Jiménez, «Desarrollo de dispositivos MEMS de silicio utilizando micromaquinado de volumen.», Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, 2011.
- [25] G. Kaminsky, «Micromachining of silicon mechanical structures», *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Process. Phenom.*, vol. 3, n.o 4, pp. 1015-1024, jul. 1985, doi: 10.1116/1.583089.
- [26] M. Elwenspoek y H. V. Jansen, *Silicon Micromachining*. Cambridge University Press, 2004.
- [27] S.-M. Kim y D.-Y. Khang, «Bulk Micromachining of Si by Metal-assisted Chemical Etching», vol. 10, n.o 18, pp. 3761-3766, 2014, doi: 10.1002/sml.201303379.
- [28] B. Puers y W. Sansen, «Compensation structures for convex corner micromachining in silicon», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 23, n.o 1, pp. 1036-1041, abr. 1990, doi: 10.1016/0924-4247(90)87085-W.
- [29] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, y K. E. Petersen, «Bulk micromachining of silicon», *Proc. IEEE*, vol. 86, n.o 8, pp. 1536-1551, ago. 1998, doi: 10.1109/5.704259.
- [30] U. Schnakenberg, W. Benecke, y D. Löchel, «NH₄OH-based etchants for silicon micromachining», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 23, n.o 1, pp. 1031-1035, abr. 1990, doi: 10.1016/0924-4247(90)87084-V.
- [31] S. Azimi, J. Song, Z. Y. Dang, H. D. Liang, y M. B. H. Breese, «Three-dimensional silicon micromachining», *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, n.o 11, p. 113001, sep. 2012, doi: 10.1088/0960-1317/22/11/113001.
- [32] L. Chang, Z. Zhang, Y. Li, S. Wang, y Z. Feng, «Air-Filled Long Slot Leaky-Wave Antenna Based on Folded Half-Mode Waveguide Using Silicon Bulk Micromachining Technology for Millimeter-Wave Band», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, n.o 7, pp. 3409-3418, jul. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2700040.
- [33] C. Burrer, J. Esteve, y E. Lora-Tamayo, «Resonant silicon accelerometers in bulk micromachining technology-an approach», *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 5, n.o 2, pp. 122-130, jun. 1996, doi: 10.1109/84.506200.
- [34] «Fig. 10 Fabrication of SiO₂ (or Si₃N₄ or P-Si) cantilever beams...», ResearchGate. https://www.researchgate.net/Figure/Fabrication-of-SiO-2-or-Si-3-N-4-or-P-Si-cantilever-beams-on-100-Si-wafers-by-wet_Fig7_226401394 (accedido 28 de abril de 2023).

- [35] N. Moldovan y R. Divan, «Si (100) and Si (311) - A comparative study for nanofabrication», 14th IEEE Int. Conf. Nanotechnol., pp. 215-220, ago. 2014, doi: 10.1109/NANO.2014.6968099.
- [36] «Microlens Arrays», 23 de agosto de 2019. <https://www.viavisolutions.com/en-us/osp/products/microlens-arrays> (accedido 28 de abril de 2023).
- [37] I. Bajwa, «KOH etching of (100) Si wafer, No 2», Tech. Rep.
- [38] I. Zubel, «Anisotropic etching of Si», J. Micromechanics Microengineering, vol. 29, n.o 9, p. 093002, jul. 2019, doi: 10.1088/1361-6439/ab2b8d.
- [39] M. Elwenspoek, «On the Mechanism of Anisotropic Etching of Silicon», J. Electrochem. Soc., vol. 140, n.o 7, p. 2075, jul. 1993, doi: 10.1149/1.2220767.
- [40] S. Aachboun y P. Ranson, «Deep anisotropic etching of silicon», J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 17, n.o 4, pp. 2270-2273, jul. 1999, doi: 10.1116/1.581759.
- [41] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, y H. Baumgärtel, «Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions: I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers», J. Electrochem. Soc., vol. 137, n.o 11, pp. 3612-3626, nov. 1990, doi: 10.1149/1.2086277.
- [42] M. Mehregany y S. D. Senturia, «Anisotropic etching of silicon in hydrazine», Sens. Actuators, vol. 13, n.o 4, pp. 375-390, abr. 1988, doi: 10.1016/0250-6874(88)80050-7.
- [43] O. Tabata, R. Asahi, H. Funabashi, K. Shimaoka, y S. Sugiyama, «Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions», Sens. Actuators Phys., vol. 34, n.o 1, pp. 51-57, jul. 1992, doi: 10.1016/0924-4247(92)80139-T.
- [44] U. Schnakenberg, W. Benecke, y P. Lange, «TMAHW etchants for silicon micromachining», en TRANSDUCERS '91: 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers, jun. 1991, pp. 815-818. doi: 10.1109/SENSOR.1991.149008.
- [45] M. Gad-el-Hak, The MEMS Handbook, 1er edition. CRC Press.
- [46] S. A. Campbell, The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication, 2nd Revised edition. Oxford University Press Inc, 2001.
- [47] O. Powell y H. B. Harrison, «Anisotropic etching of 100 and 110 planes in (100) silicon», J. Micromechanics Microengineering, vol. 11, n.o 3, p. 217, may 2001, doi: 10.1088/0960-1317/11/3/309.
- [48] I. Zubel, I. Barycka, K. Kotowska, y M. Kramkowska, «Silicon anisotropic etching in alkaline solutions IV: The effect of organic and inorganic agents on silicon anisotropic etching process», Sens. Actuators Phys., vol. 87, n.o 3, pp. 163-171, ene. 2001, doi: 10.1016/S0924-4247(00)00481-7.
- [49] I. Barycka y I. Zubel, «Silicon anisotropic etching in KOH-isopropanol etchant», Sens. Actuators Phys., vol. 48, n.o 3, pp. 229-238, may 1995, doi: 10.1016/0924-4247(95)00992-2.
- [50] A. P. Nayak, M. S. Islam, y V. J. Logeeswaran, Encyclopedia of nanotechnology. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012. doi: 10.1007/978-90-481-9751-4_431.
- [51] K. Ohwada, Y. Negoro, Y. Konaka, y T. Oguchi, «Groove depth uniformization in [110] Si anisotropic etching by ultrasonic wave and application to accelerometer fabrication», en Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems. 1995, ene. 1995, pp. 100-. doi: 10.1109/MEMSYS.1995.472546.

- [52] H. Tanaka, S. Yamashita, Y. Abe, M. Shikida, y K. Sato, «Fast etching of silicon with a smooth surface in high temperature ranges near the boiling point of KOH solution», *Sens. Actuators - Phys. - Sens. ACTUATOR -PHYS*, vol. 114, pp. 516-520, sep. 2004, doi: 10.1016/j.sna.2003.11.036.
- [53] A. A. Baski, S. C. Erwin, y L. J. Whitman, «The structure of silicon surfaces from (001) to (111)», *Surf. Sci.*, vol. 392, n.o 1, pp. 69-85, dic. 1997, doi: 10.1016/S0039-6028(97)00499-8.
- [54] K. Bescherer, D. Munzke, O. Reich, y H.-P. Loock, «Fabrication and modeling of multimode fiber lenses», *Appl. Opt.*, vol. 52, n.o 4, pp. B40-B45, feb. 2013, doi: 10.1364/AO.52.000B40.
- [55] C. Wu, J. Ko, y C. C. Davis, «Determining the phase and amplitude distortion of a wavefront using a plenoptic sensor», *JOSA A*, vol. 32, n.o 5, pp. 964-978, may 2015, doi: 10.1364/JOSAA.32.000964.
- [56] Q. Wang, H. Deng, T. Jiao, D. Li, y F. Wang, «Imitating micro-lens array for integral imaging», *Chin. Opt. Lett.*, vol. 8, n.o 5, pp. 512-514, may 2010.
- [57] Y. Y. Sun, L. S. Ong, y X.-C. Yuan, «Composite-microlens-array-enabled microfluidic sorting», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, n.o 14, p. 141108, oct. 2006, doi: 10.1063/1.2358306.
- [58] C. Paterson y J. C. Dainty, «Hybrid curvature and gradient wave-front sensor», *Opt. Lett.*, vol. 25, n.o 23, pp. 1687-1689, dic. 2000, doi: 10.1364/OL.25.001687.
- [59] I. D. Nikolov, K. Goto, S. Mitsugi, Y. J. Kim, y V. I. Kavardjikov, «Nanofocusing recording probe for an optical disk memory», *Nanotechnology*, vol. 13, n.o 4, p. 471, may 2002, doi: 10.1088/0957-4484/13/4/306.
- [60] G. Molar Velázquez, «Diseño y Caracterización de un Microescáner Bidimensional», Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, 2009.
- [61] «Simple fabrication of closed-packed IR microlens arrays on silicon by femtosecond laser wet etching | SpringerLink».
- [62] K. Sato et al., «Characterization of orientation-dependent etching properties of single-crystal silicon: effects of KOH concentration», vol. Volume 64, Issue 1, pp. 87-93, 1998.
- [63] S. Mitsuhiro, K. Sato, T. Kenji, y U. Daisuke, «Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions», vol. Volume 80, Issue 2, pp. 179-188, 2000. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00264-2.
- [64] K. Don L., E. William P., Manginell Ron, y T. G. Digges, «Micromirror arrays using KOH:H₂O micromachining of silicon for lens templates, geodesic lenses, and other applications», *Opt. Eng.*, vol. 33, nov. 1994.
- [65] I. Zubeł, K. Rola, y M. Kramkowska, «The effect of isopropyl alcohol concentration on the etching process of Si-substrates in KOH solutions», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 171, n.o 2, pp. 436-445, nov. 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.09.005.