



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Comunicaciones

Proceso y caracterización de tecnología de pulido químico-
mecánico (CMP) aplicada a obleas de óxido de silicio y
nitruro de silicio

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Tecnologías, Sistemas y Redes de
Comunicaciones

AUTOR/A: Díaz Palacios, Valentina María

Tutor/a: Pastor Abellán, Daniel

Cotutor/a: Muñoz Muñoz, Pascual

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Objetivos – Para este trabajo se plantean los siguientes objetivos:

■ **Objetivo general:**

Desarrollar y caracterizar procesos de planarización y pulido utilizando la tecnología de Pulido Químico-Mecánico (CMP, de sus siglas en Inglés Chemical Mechanical Polishing).

■ **Objetivos específicos:**

- Estudiar el principio de funcionamiento de la tecnología de CMP.
- Determinar una configuración adecuada para los parámetros principales que intervienen en la receta.
- Evaluar el impacto de estos parámetros sobre el proceso.
- Caracterizar su respuesta en obleas de óxido de silicio y nitruro de silicio aplicando la configuración establecida.

Metodología – Este proyecto se enmarca en una investigación cuantitativa experimental, en la cual se plantea desarrollar y caracterizar procesos de planarización y pulido en donde se pueda evaluar el impacto de los parámetros involucrados en la receta sobre los resultados obtenidos en las obleas pulidas.

De acuerdo con esta metodología, se proponen las siguientes fases para desarrollar el proyecto:

- Revisión del estado del arte.
- Configuración inicial de la herramienta Alpsitec CMP E460.
- Puesta en marcha de la herramienta y caracterización del proceso de CMP.
- Análisis de resultados y preparación del documento final.

Desarrollo de trabajo de laboratorio – Utilizando la herramienta Alpsitec CMP E460 que se encuentra en la sala blanca de la UPV Fab, se desarrolló el proceso de caracterización del CMP a través del trabajo de laboratorio realizado, llevando a cabo diferentes pruebas que permitieron encontrar el impacto de los diferentes parámetros en la receta sobre el resultado obtenido en las obleas.

Resultados – En este documento se presentan los resultados obtenidos para obleas de diferentes materiales, que fueron sometidas a procesos de CMP bajo diferentes configuraciones. Haciéndose un estudio de la tasa de pulido, rugosidad de la superficie de la oblea y defectos.

Líneas futuras – Se plantea llevar a cabo el proceso de CMP sobre superficies de obleas patronadas. Debido a que que estos patrones generan sobre las obleas variaciones de nivel,

el proceso de pulido se debe realizar cuidadosamente para asegurar la integridad de las estructuras y la planarización en zonas de la superficie de la oblea. A su vez, en trabajo futuro se pretende realizar procesos de planarización en superficies donde se encuentren capas de materiales distintos en una misma oblea, como por ejemplo SiO_2 y Si_3N_4 . La configuración adecuada de un *End Point* es una técnica que permite determinar el momento exacto en que se debe detener el pulido de una oblea. Por ejemplo, a través de la configuración de un *End Point* específico, el pulido se puede detener cuando se encuentre la transición entre materiales sobre una misma oblea.

Publicaciones – Durante el desarrollo de este trabajo de fin de máster no se realizaron publicaciones.

Resumen – Este trabajo de fin de máster presenta un estudio sobre el proceso de Pulido Químico-Mecánico (CMP, de sus siglas en Inglés) aplicado a obleas de óxido de silicio y nitruro de silicio. El objetivo principal del estudio fue desarrollar y caracterizar procesos de planarización y pulido utilizando la tecnología de CMP, evaluando el impacto de los parámetros del proceso sobre la uniformidad, rugosidad y tasa de pulido de las obleas. En el documento se exponen los fundamentos del CMP, destacando su importancia en la fabricación de dispositivos semiconductores y circuitos integrados fotónicos (PIC), donde se menciona la necesidad de obtener superficies altamente planas y libres de defectos para asegurar la calidad y rendimiento de los dispositivos. Se desarrolló un trabajo experimental utilizando la herramienta Alpsitec CMP E460, la cual permitió realizar los pulidos sobre las obleas y la configuración de las recetas del proceso. Se presentan los resultados obtenidos, los cuales mostraron las diferentes configuraciones de parámetros probadas y su interacción en el proceso. También, se presentaron mapas de distribución de espesores y mediciones de rugosidad, que permitieron evaluar la calidad de las superficies pulidas, destacando sus aspectos más importantes. Finalmente, se exponen las conclusiones realizadas a partir del desarrollo de esta investigación. El presente trabajo de investigación se desarrolla en el marco de un programa de doble titulación entre la Universidad Nacional de Colombia y la Universitat Politècnica de València, ya que existe un interés por la investigación del proceso de CMP, tanto en el grupo de investigación en Electrónica de Altas Frecuencias y Telecomunicaciones (CMUN) perteneciente a la Universidad Nacional de Colombia como en la línea piloto de micro-fabricación de la UPV Fab adscrita al Instituto Universitario de Telecomunicación y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) de la Universitat Politècnica de València.

Abstract – This master's thesis presents a study on the Chemical-Mechanical Polishing (CMP) process applied to silicon oxide and silicon nitride wafers. The main objective of the study was to develop and characterize planarization and polishing processes using CMP technology, evaluating the impact of process parameters on the uniformity, roughness and polishing rate of the wafers. The document outlines the fundamentals of CMP, highlighting its importance in the manufacturing of semiconductor devices and photonic integrated circuits (PICs), emphasizing the need for highly flat and defect-free surfaces to ensure the quality and performance of the devices. An experimental study was con-

ducted, using the Alpsitec CMP E460 tool, which enabled wafer polishing and process recipe configuration. The obtained results are presented, showing the different parameter configurations tested and their interaction within the process. Additionally, thickness distribution maps and roughness measurements were presented, which allowed the evaluation of the polished surfaces quality, highlighting their most significant aspects. Finally, the conclusions from this research are presented. Here is the translation: This research work is carried out within the framework of a dual degree program between the National University of Colombia and the Universitat Politècnica de València, driven by a shared interest in the research of the CMP process. This interest is present both in the High-Frequency Electronics and Telecommunications research group (CMUN) at the National University of Colombia and in the pilot microfabrication line of UPVFab, which is part of the Institute of Telecommunications and Multimedia Applications (ITEAM) at the Universitat Politècnica de València

Autor: Valentina María Díaz Palacios, [email: vdiapal@teleco.upv.es](mailto:vdiapal@teleco.upv.es)

Director 1: Daniel Pastor Abellán, [email: dpastor@com.upv.es](mailto:dpastor@com.upv.es)

Director 2: Gloria Margarita Varón Durán, [email: gmvarond@unal.edu.co](mailto:gmvarond@unal.edu.co)

Fecha de entrega: 03-09-2024

Lista de Acrónimos

CMOS *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*. 9

CMP *Chemical Mechanical Polishing*. 2, 7, 10–24, 26, 28–30, 38–41, 43

CS *Carrier Speed*. 7, 8, 18, 20, 23–26, 28, 29, 31, 32, 34–36, 43

LIDAR *Light Detection and Ranging*. 9

PIC Circuitos Integrados Fotónicos. 9–11, 20, 23

PS *Platen Speed*. 6–8, 18, 20, 23–26, 31, 32, 34–36, 43

WP *Working pressure*. 7, 8, 18, 20, 23–26, 28–32, 34–36, 43

Lista de figuras

1.	Sección de una oblea antes y después del proceso de CMP.	10
2.	Esquema CMP: (a) Componentes herramienta, (b) Interacciones oblea - pad, (c) Capa de slurry y partículas, (d) Vista del Pad. Adaptado de [12]. .	11
3.	Mecanismo de funcionamiento CMP. Adaptado de [27].	14
4.	Proceso de CMP para diferentes parámetros de presión y velocidad. A) Presión alta y velocidad baja (capa de <i>slurry</i> delgada). B) Presión baja y velocidad alta (capa de <i>slurry</i> gruesa). Adaptada de [10].	16
5.	Irregularidades en el pad . Adaptado de [15].	17
6.	Marcas de <i>slurry</i> sobre la membrana del <i>carrier</i> . Adaptado de [15].	18
7.	Herramienta de pulido: Alpsitec CMP tool E460 - Sala blanca UPV Fab . .	21
8.	Mapa de espesores de obleas 8 - 9 de SiO_2	32
9.	Mapa de espesores de obleas 10 - 11 de SiO_2	33
10.	Mapa de espesores de obleas 12 - 13 de SiO_2	34
11.	Mapa de espesores de obleas 14 y 18 de SiO_2	35
12.	Mapa de espesores de obleas 22 y 24 de Si_3N_4	37
13.	Medida de rugosidad para muestra de Si obtenida por AFM.	39
14.	Medida de rugosidad para muestra de Óxido de Silicio obtenida por AFM. .	39
15.	Medida de rugosidad para muestra de SiO_2 - Oblea 15 obtenida por AFM. .	40
16.	Medida de rugosidad para muestra de Óxido de Silicio - Oblea 18 obtenida por AFM.	41
17.	Oblea de SiO_2 con limpieza de <i>jet spray</i> después de proceso CMP con slurry de sílica.	42
18.	Oblea de SiO_2 con limpieza de <i>jet spray</i> y baños de ultrasonido después de procesos de CMP	42

Lista de tablas

1.	Parámetros a modificar en la receta y sus límites.	23
2.	Resumen de configuración y pruebas del proceso de pulido.	25
3.	Valores configurados de los parámetros seleccionados en la receta - Caso 1. .	26
4.	Resultados oblea 1 - SiO_2	27
5.	Resultados oblea 2 - SiO_2	27
6.	Resultados oblea 3 - Si_3N_4	28
7.	Valores configurados en la receta - Caso 2/ <i>Carrier Speed</i>	28
8.	Resultados oblea 4 - SiO_2	29
9.	Resultados oblea 5 - Si_3N_4	29
10.	Valores configurados en la receta. Oblea 6 - SiO_2 / <i>Working Pressure</i>	30
11.	Resultados oblea 6 - SiO_2	30
12.	Valores configurados en la receta. Oblea 7 - Si_3N_4 / <i>Working Pressure</i>	30
13.	Resultados oblea 7 - Si_3N_4	30
14.	Especificaciones iniciales de las obleas de SiO_2 y Si_3N_4	31

15.	Receta y resultados obleas 8-13 de SiO_2	31
16.	Receta y resultados obleas 14-19 de SiO_2	34
17.	Tiempos de pulido de obleas 14 - 19 de SiO_2 al variar <i>platen speed</i> (PS).	35
18.	Receta y resultados obleas 20-25 de Si_3N_4	36
19.	Tiempos de pulido de obleas 20-25 de Si_3N_4 al variar <i>platen speed</i>	36
20.	Receta y resultados obleas 26 y 14 de SiO_2 para diferentes slurry.	38
21.	Receta y resultados obleas 27 y 24 de Si_3N_4 para diferentes slurry.	38
22.	Resultados de caracterización de rugosidad	40

Índice

1. Introducción	9
2. Pulido Químico-Mecánico, <i>Chemical Mechanical Polishing</i> (CMP)	10
2.1. <i>Slurry</i>	11
2.2. <i>Carrier</i>	12
2.3. <i>Pad</i>	12
2.4. Acondicionamiento del <i>pad</i>	13
2.5. Variables que intervienen en el proceso de <i>Chemical Mechanical Polishing</i> (CMP)	14
2.5.1. <i>Slurry</i>	14
2.5.2. <i>Carrier</i>	15
2.5.3. <i>Pad</i>	15
2.6. Defectos posteriores al <i>Chemical Mechanical Polishing</i> (CMP)	16
2.6.1. Partículas residuales sobre la oblea	16
2.6.2. Rayas sobre la superficie de la oblea	17
2.6.3. No uniformidad en la oblea	17
2.7. Limpieza Post-CMP	18
2.7.1. Requerimientos en la limpieza Post-CMP	18
2.7.2. Eliminación de las partículas de <i>slurry</i>	19
2.7.3. Técnicas de limpieza	19
3. Trabajo Experimental	20
3.1. Puesta en marcha del proceso	21
3.2. Técnicas utilizadas para la caracterización de obleas	22
3.2.1. Elipsometría	22
3.2.2. Microscopio de fuerza atómica (AFM)	22
3.2.3. Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM)	23
3.3. Variables seleccionadas en la receta	23
3.4. Configuración y pruebas del proceso de pulido	23
3.4.1. Pruebas propuestas - Caso 1	24
3.4.2. Pruebas propuestas - Caso 2	24
3.4.3. Pruebas propuestas - Caso 3	24
3.4.4. Pruebas propuestas - Caso 4	25
4. Resultados	26
4.1. Resultados - Caso 1	26
4.2. Resultados - Caso 2	28
4.2.1. Resultados al incrementar el <i>Carrier Speed</i> (CS)	28
4.2.2. Resultados al incrementar <i>Working pressure</i> (WP)	29
4.3. Resultados - Caso 3	31
4.3.1. Resultados obleas de SiO_2 para distintos valores de CS y WP, dejando fijo PS.	31

4.3.2.	Resultados obleas de SiO_2 para distintos valores de PS y WP, cuando CS=PS.	34
4.3.3.	Resultados obleas de Si_3N_4 para distintos valores de PS y WP, cuando CS=PS.	35
4.4.	Resultados - Caso 4	37
5.	Caracterización de rugosidad	38
5.1.	Muestra de Silicio	38
5.2.	Muestra de Óxido de Silicio	39
5.3.	Muestra de Óxido de Silicio. Post CMP - Oblea 15	40
5.4.	Muestra de Óxido de Silicio. Post CMP - Oblea 18	40
6.	Caracterización de defectos	41
7.	Conclusiones	43
8.	Agradecimientos	44

1. Introducción

La tecnología de los Circuitos Integrados Fotónicos (PIC) ha posibilitado la integración de diversos componentes ópticos, permitiendo así la fabricación de sistemas complejos en un solo chip [1]. Los materiales semiconductores son utilizados en el desarrollo de esta tecnología ofreciendo la posibilidad de miniaturización y respuestas de alta velocidad en circuitos integrados [2]. En la actualidad, la fotónica de silicio es una tecnología que se destaca en los sistemas de comunicaciones de nueva generación, permitiendo el tráfico de datos de alta densidad a largas distancias sobre una plataforma que permite la integración de las diferentes ventajas y capacidades de la tecnología fotónica [3].

Dentro de estas capacidades se destaca su gran ancho de banda, mayor alcance, alta velocidad de transmisión de datos y eficiencia energética debido a su bajo consumo de energía. Estas características permiten su aplicación en diferentes áreas, desde las energías alternativas, la industria aeroespacial, dispositivos optoelectrónicos, sistemas de sensado, tecnología de *Light Detection and Ranging* (LIDAR), las telecomunicaciones y las comunicaciones ópticas [2],[4].

Sobre una oblea de silicio es posible fabricar cientos de chips que cuenten con diferentes estructuras y dispositivos de dimensiones nanométricas. La fotónica de silicio es un proceso que implica el procesamiento y detección de luz, en donde además se requiere contar con plataformas de caracterización, testeado y empaquetado de los chips [5]. En la actualidad, la fabricación de PIC se beneficia de la infraestructura disponible en la industria de circuitos integrados *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS), la cual se encuentra valorada en 450 mil millones de dólares y juega un papel crucial en la era de la información [6]. La tecnología de la fotónica forma parte de esta industria y es posible realizar la fabricación de PIC en masa a bajo costo utilizando las técnicas de fabricación ya establecidas de la industria de CMOS [3].

En el desarrollo de dispositivos basados en fotónica de silicio se emplean diferentes procesos para su fabricación [5]. A continuación, se mencionan los principales procesos involucrados en la fabricación de tecnología fotónica sobre silicio [7],[8]:

- **Deposición de materiales:** Según el diseño de los componentes que se desean fabricar sobre el sustrato, se requieren de diferentes capas de material, que se depositan sobre la oblea de silicio, los cuales pueden ser metales o dieléctricos, como por ejemplo: óxido de silicio (SiO_2) o nitruro de silicio (Si_3N_4).
- **Litografía y grabado:** Se deposita una fotoresina sobre la oblea y dependiendo de la técnica de exposición litográfica implementada se transfiere el patrón de los componentes diseñados. Posteriormente, el grabado sobre la oblea se alcanza al realizar un ataque químico sobre la fotoresina. En el caso de la fotoresina positiva las regiones de material expuestas a la litografía son removidas de la oblea al realizar el ataque, mientras en el caso de fotoresina negativa estas regiones permanecen.
- **Planarización:** Se realizan la planarización de los materiales depositados en la oblea con el objetivo de obtener una superficie plana y uniforme corrigiendo la

posible topografía que haya quedado en la deposición, reduciendo la rugosidad y los defectos en la oblea.

En la figura 1 se muestra el efecto esperado del proceso de planarización sobre una oblea recubierta con óxido de silicio SiO_2 .

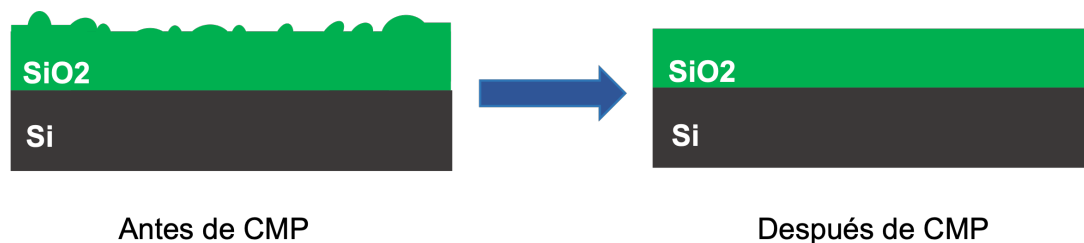


Fig. 1: Sección de una oblea antes y después del proceso de CMP.

Dentro de las técnicas de planarización se encuentra el pulido químico-mecánico (CMP) en el cual se realiza el pulido y eliminación controlada de los materiales depositados en las diversas capas que conforman la oblea. Esta técnica combina la interacción de procesos de pulido que involucran fuerza mecánica y reacciones químicas mediante partículas abrasivas que son selectivas a las características de cada material [9]. La planarización y el CMP se consideran términos recientes en el ámbito de la tecnología de fabricación de semiconductores, además el primer artículo de investigación técnico acerca de este proceso fue publicado a finales de 1980 [10], [11].

En 1986 IBM desarrolla el CMP como técnica de planarización y pulido inicialmente para obleas de materiales dieléctricos como el SiO_2 [12]. El proceso de CMP se caracteriza por ser un proceso complejo lo cual lo ha convertido en un tema de investigación muy popular en los últimos años. El CMP surge como una técnica aplicada en la fabricación de PIC, con la cual es posible alcanzar un alto grado de planarización y pulido sobre capas delgadas de material en una oblea [12], permitiendo controlar el espesor de cada una de estas. Algunos dispositivos integrados fotónicos más complejos combinan diferentes materiales en una misma oblea [13]. Actualmente, el tamaño de los componentes en los PIC es cada vez más reducido, por lo tanto, se requiere conocer con detalle los fundamentos y la ciencia detrás de cada tecnología y proceso que interviene durante la fabricación [14].

2. Pulido Químico-Mecánico, *Chemical Mechanical Polishing (CMP)*

El *Chemical Mechanical Polishing (CMP)* una técnica de planarización y pulido que combina la interacción de la fuerza mecánica y las partículas abrasivas que se encuentran en el *slurry*. La composición química del *slurry* viene dada por la combinación de partículas abrasivas en una solución acuosa, y dependiendo de la sinergia entre las mismas y el tipo de solución, este puede tener diferentes respuestas en términos de selectividad al pulir las capas de material de una oblea [15]. Los avances en la tecnología Circuitos Integrados

Fotónicos (PIC) buscan constantemente reducir el tamaño de los chips. El proceso de *Chemical Mechanical Polishing* (CMP) ha sido una tecnología habilitadora que ha permitido aplicar técnicas avanzadas de litografía donde se diseñan patrones con gran detalle de complejidad sobre superficies planas, las cuales se pueden conseguir posteriores al proceso de CMP, resultando en un proceso fundamental para alcanzar la miniaturización de componentes en los PIC [15].

En los procesos de fabricación de semiconductores hay múltiples enfoques para cualquier paso, incluido el CMP. Los desafíos asociados a un proceso dado son comunes en la mayoría de los fabricantes. Sin embargo, un enfoque específico para abordar estos desafíos está determinado por las necesidades y requerimientos de cada fabricante individual. En tal sentido, mejorar el rendimiento de los dispositivos ha llevado directamente a una necesidad muy fuerte de lograr el mejor rendimiento del proceso de CMP [16].

En la figura 2, se muestran los componentes principales que conforman la herramienta de CMP.

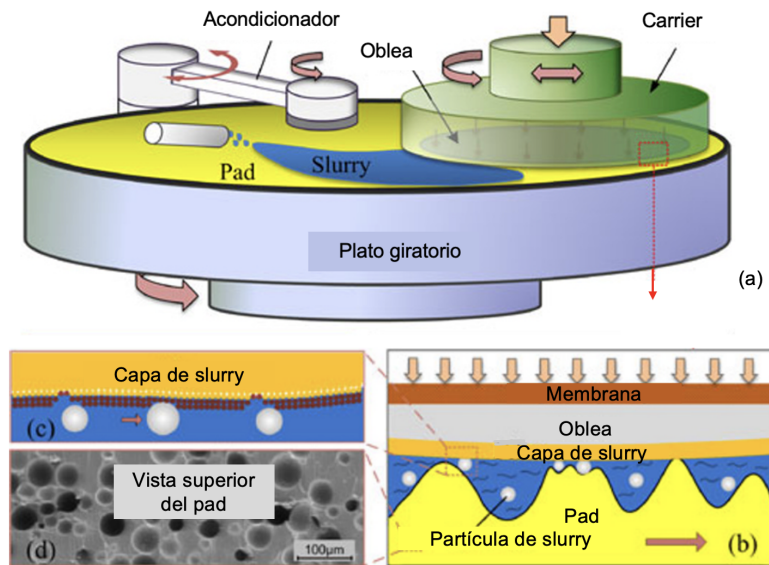


Fig. 2: Esquema CMP: (a) Componentes herramienta, (b) Interacciones oblea - pad, (c) Capa de slurry y partículas, (d) Vista del Pad. Adaptado de [12].

2.1. *Slurry*

Dependiendo del material que se requiere pulir, el *slurry* puede estar compuesto de partículas abrasivas de diferentes tipos. Las partículas abrasivas utilizadas con más frecuencia en procesos de CMP para materiales dieléctricos son las de óxido de silicio SiO_2 (silica) y óxido de cerio CeO_2 (ceria). Mientras para procesos sobre metales se utilizan partículas abrasivas de alúmina Al_2O_3 [9], [12],[17]. Además, en los procesos de CMP para materiales

dieléctricos la solución de *slurry* genera una reacción de hidrólisis, mientras que en el caso de los metales se produce una reacción de oxidación [9].

La eliminación de material sobre la oblea en un proceso de CMP causada por la fricción entre la oblea y el *pad* de pulido, en donde intervienen diferentes parámetros tanto mecánicos como químicos. El tamaño de las partículas de *slurry*, el cual tiende a estar en un rango de 10 nm a 500 nm, su pH, viscosidad y concentración son parámetros químicos que pueden afectar a la tasa de pulido, uniformidad y calidad de la superficie [15], [18], [19]. Por lo tanto, la influencia de estos permite definir la tasa de pulido de material de la oblea, logrando obtener superficies planas a nivel global y local de la oblea con pocos defectos y gran eficiencia [12], [18]. Un sistema típico de distribución de *slurry* cuenta con bombas surtidoras de *slurry*, medidores de presión, flujo y suministro de nitrógeno (gas inerte) [20].

2.2. *Carrier*

Durante el proceso de CMP, la oblea se posiciona en un *carrier* (ver 2) el cual tiene una membrana que sirve como amortiguador entre la oblea y la superficie del *pad*. Esta membrana cuenta con múltiples agujeros por donde se vierte un fluido de aire en vacío, aplicando una fuerza en la parte posterior de la oblea con el objetivo de que esta se encuentre bien posicionada y sujeta al *carrier* mientras el *carrier* gira ejerciendo presión entre la oblea y el *pad* que realiza el pulido.

Mantener la planarización estable a lo largo de la oblea es un desafío, ya que la interacción entre la velocidad relativa de la oblea y el *pad* afectan la tasa de pulido en el borde de la oblea, haciéndola mayor que en el centro. La tensión que se aplica en la membrana (*backside pressure*) provoca deformaciones sobre la oblea haciendo que cambie la distribución de puntos de presión entre la oblea y el *pad*, causando que aumente la no uniformidad y la planarización varíe a lo largo de la oblea [9].

Con el objetivo de reducir la no uniformidad, y mantener la tasa de planarización estable, el *carrier* cuenta con un anillo retenedor que se ubica alrededor del borde de la oblea. Este anillo permite que cuando la oblea entre en contacto con el *pad*, la presión que se ejerce sobre la oblea se distribuya alrededor de toda la superficie haciendo que se tenga una planarización más uniforme entre el borde y el centro de la oblea, evitando que hayan zonas con mayor planarización en el borde [9],[21].

2.3. *Pad*

Sobre un plato giratorio, se coloca el *pad* el cual está hecho comúnmente de poliuretano microporoso ya que debido a su composición química, el poliuretano es un material que permite ajustar las características del *pad* con el objetivo de alcanzar las propiedades mecánicas deseadas en el pulido [22]. Los microporos del *pad* son utilizados para almacenar y distribuir uniformemente las partículas abrasivas del *slurry* durante el pulido sobre toda la oblea, permitiendo manejar mayor volumen de *slurry*. Así mismo, son un canal que permiten la eliminación de los residuos que quedan sobre el *pad* durante el pulido,

ayudando a prevenir defectos en la oblea posteriores al proceso de CMP, como por ejemplo rayones en su superficie [12], [22].

El *pad* tiene diferentes clasificaciones en términos de dureza, lo cual afecta directamente la tasa de pulido de material y la uniformidad del pulido. El *pad* IC1000 de poliuretano microporoso es el más duro dentro de la clasificación. Este *pad* realiza una planarización mayor, sin embargo, presenta desventaja, de poder crear no uniformidad elevada en la oblea, ya que al ser un *pad* duro no es tan flexible ajustándose menos a la superficie de la oblea [23]. Una configuración de *pad* que permite alcanzar una planarización elevada y uniformidad adecuada en la oblea es la de “*stacked pads*” en donde se coloca el *pad* IC1000 sobre un *pad* más suave (Suba IV) con respecto al primero [24].

2.4. Acondicionamiento del *pad*

Al realizar los procesos de *Chemical Mechanical Polishing* (CMP), el *pad* tiende a desgastarse debido a diferentes factores: aglomeración de partículas abrasivas del slurry, carga mecánica a la que es sometido y acumulación de restos del material que se ha pulido. A medida que se adhieren esos residuos o partículas al *pad*, este reduce su dureza y abrasión, perdiendo su rugosidad, lo cual impacta directamente en la distribución del slurry y el rendimiento del *pad* causando una disminución en la tasa de pulido [15]. Además, el desgaste del *pad* causa zonas irregulares haciendo que el contacto con la oblea no sea uniforme en algunas áreas [9].

Con respecto a la tasa de pulido, esta viene dada por cuántas partículas abrasivas están en contacto con la superficie de la oblea cuando se aplica la fuerza al realizar el pulido entre la oblea y el *pad* [10]. Con el objetivo de garantizar que las condiciones del *pad* se mantengan óptimas, la tasa de pulido sea estable y repetible entre procesos de CMP, se tiene que realizar el acondicionamiento del *pad* previamente cada vez que se vaya a proceder al pulido de una oblea. Este paso es crítico para el CMP, ya que una superficie de *pad* que no se encuentre con la rugosidad adecuada, resultaría en una tasa de pulido muy baja [25]. El acondicionamiento lo efectúa un *carrier*, el cual está conformado por un disco con incrustaciones abrasivas de diamante.

Además, en el primer uso del *pad*, se realiza un acondicionamiento inicial llamado “*break-in*” del *pad*, en donde la configuración de parámetros de tiempo y presión del disco de diamante sobre el *pad* tiende a ser diferente a la de un acondicionamiento regular entre procesos de CMP, con el objetivo de estabilizar el rendimiento inicial del *pad*, relacionado con la tasa de pulido y absorción de agua del *pad* [22],[15].

Esta técnica de acondicionamiento es una de las más utilizadas en la industria de semiconductores [10]. El disco se presiona sobre el *pad* creando cortes microscópicos en la superficie de este. Removiendo y raspando de los microporos los residuos acumulados de material, generando asperezas en la superficie del *pad* y manteniendo la rugosidad con el objetivo de prevenir la acumulación de residuos en los microporos del *pad* y mantener la tasa de pulido, uniformidad y prolongar la vida útil del *pad* [10],[15],[26],[27].

El acondicionamiento del *pad* además ayuda a corregir el efecto de borde que se origina durante el proceso de CMP, debido a que la interacción entre la velocidad lineal relativa del *pad* y el *carrier* es mayor en el borde. Como consecuencia, la cantidad de material

pulido en el borde de la oblea tiende a ser mayor que en el centro, originando un patrón en el *pad* de pulido donde las zonas que han estado en contacto con el centro de la oblea están menos pulidas que las zonas que han estado en contacto con el borde [9].

En la figura 3, se muestra el mecanismo de funcionamiento del CMP según [28], en donde se especifica cada una de las partes que lo componen mencionadas previamente:

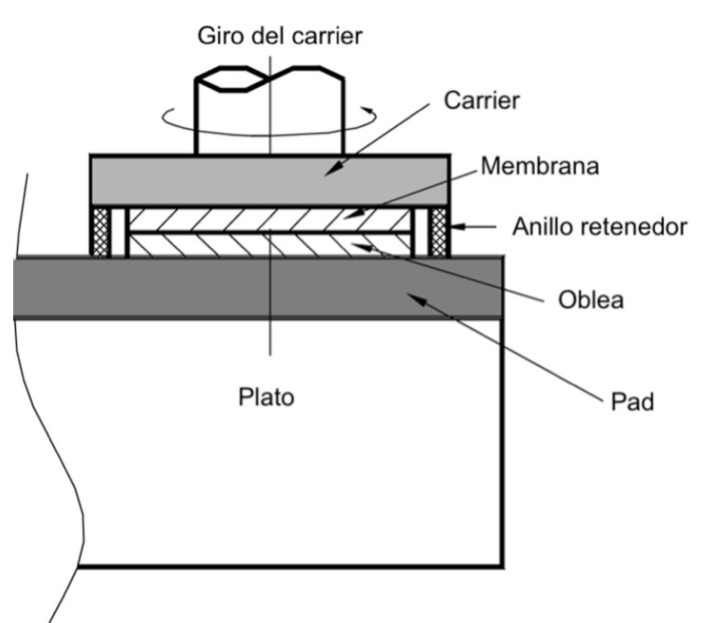


Fig. 3: Mecanismo de funcionamiento CMP. Adaptado de [27].

2.5. Variables que intervienen en el proceso de *Chemical Mechanical Polishing* (CMP)

Este proceso involucra un gran número de variables de entrada que pueden afectar el proceso en su componente mecánica o química y según su configuración conllevar a diferentes resultados en términos de rendimiento, tasa de pulido y calidad de la planarización. A continuación, se describen las variables de entrada principales involucradas en el proceso de CMP [22]:

2.5.1. *Slurry*

- **Composición química y tipo de abrasivo:** Según sea el material que se requiere pulir (dieléctrico, semiconductor, metales entre otros), existen diferentes composiciones del *slurry* para que este interactúe con el material, afectando el proceso de CMP de forma química.
- **Flujo de *slurry* durante el pulido:** Se refiere a la tasa de fluido a la cual se descarga el *slurry* sobre el centro del *pad*, este parámetro afecta la lubricación del

sistema durante el proceso de pulido.

- **Tamaño de las partículas abrasivas:** Las partículas abrasivas suelen tener un tamaño entre 10 nm y 500 nm, dependiendo del material que se requiere pulir. Por ejemplo, en un metal el tamaño podría ser mayor. Esta variable afecta la tasa de pulido y puede causar daño en la superficie del *pad*, así como defectos en el pulido, ya que si no se tiene un control del tamaño de las partículas abrasivas, se pueden generar rayones sobre la oblea, afectando su calidad.

2.5.2. *Carrier*

- **Velocidad de la oblea:** Este parámetro afecta la velocidad promedio a través de la oblea y su respuesta en términos de uniformidad, sin embargo, no interviene en la tasa de pulido de material. Además, si las velocidades de rotación del *pad* y la oblea son las mismas, la velocidad promedio en cada punto de la oblea será igual.
- **Presión de la oblea sobre el *pad*:** Se define como el cociente de la carga aplicada a la oblea por el área de la oblea. Esta presión es un parámetro que afecta la tasa de pulido, así como la planarización de la oblea.

2.5.3. *Pad*

- **Velocidad del *pad*:** Se define como la velocidad relativa promedio del *pad* con respecto a la oblea. Este parámetro impacta en la abrasión mecánica, la cual permite definir la tasa de pulido. Así como también, afecta el transporte del *slurry* a través de la oblea.
- **Dureza del *pad*:** Dependiendo de la dureza del *pad* se puede tener una respuesta diferente de planarización y calidad de la superficie. *Pads* con mayor dureza presentan una planarización mayor, mientras los *pads* más blandos proporcionan una mejor calidad de la superficie de la oblea con menos defectos y mayor uniformidad.

Las variables de entrada definidas forman una parte importante de la configuración de la receta en un proceso de CMP, para el cual el mecanismo de eliminación del material está definido por la cantidad de partículas abrasivas de *slurry* que entran en contacto con la oblea cuando esta se presiona sobre el *pad*. Por lo tanto, esta cantidad de partículas abrasivas depende del espesor de *slurry* que hay entre el *pad* y la superficie de la oblea. El espesor de *slurry* puede controlarse dependiendo de la presión y la velocidad relativa entre la oblea y el *pad* [10].

En el caso de aplicar una presión elevada, cuando la velocidad es baja, la oblea se desplaza sobre el *pad* con una capa de *slurry* delgada. Por lo tanto, hay mayor interacción durante el pulido entre la oblea y los abrasivos de *slurry* que quedan atrapados en los microporos del *pad*, incrementando la tasa de pulido. En el caso contrario, cuando la velocidad es alta y la presión entre la oblea y el *pad* es baja, el espesor de la capa de *slurry* tiende a ser mayor, lo que resulta en una menor eliminación del material.

En la figura 4, se muestra el proceso de CMP para diferentes parámetros de presión y velocidad.

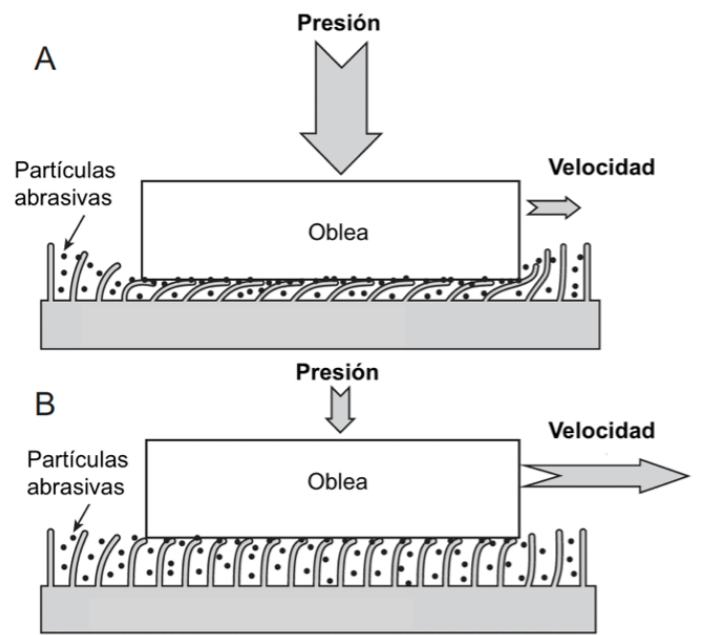


Fig. 4: Proceso de CMP para diferentes parámetros de presión y velocidad. A) Presión alta y velocidad baja (capa de *slurry* delgada). B) Presión baja y velocidad alta (capa de *slurry* gruesa). Adaptada de [10].

2.6. Defectos posteriores al *Chemical Mechanical Polishing* (CMP)

2.6.1. Partículas residuales sobre la oblea

Estas partículas pueden ser adsorbidas en la superficie de la oblea o quedar incrustadas en su capa superior debido a la presión mecánica ejercida por el *pad* durante el pulido. Esto impacta en la rugosidad de la superficie, así como en posteriores procesos de fotolitografía, ya que podrían causar un bloqueo a la luz UV [29].

El origen de estas partículas se debe tanto a los residuos de material que se puede desprender durante el pulido, así como al *slurry* utilizado durante el proceso [9],[15].

Los niveles típicos de partículas encontrados dependen del material al que se le esté realizando el proceso de CMP. Por ejemplo, al realizar el proceso sobre materiales dieléctricos donde se utilizan composiciones de *slurry* basados en partículas de SiO_2 y CeO_2 , pueden haber cientos de partículas residuales, mientras en el caso que se utilice un *slurry* basado en Al_2O_3 para procesos sobre metales, pueden haber partículas por oblea en un factor de 10^4 [15].

2.6.2. Rayas sobre la superficie de la oblea

Los defectos que aparecen con más frecuencia sobre la superficie de una oblea después de un proceso de CMP son los rayones debido al efecto de abrasión mecánica. Una de las causas de este defecto se atribuye al tamaño de las partículas de *slurry* y su aglomeración durante el proceso. Sin embargo, en algunos casos estos defectos de rayas pueden ser superficiales y ser removidos durante el proceso de limpieza posterior al CMP [15].

Las rayas sobre la oblea también suelen ser causadas por los residuos de material pulido de la oblea que queden sobre el *pad* y sus microporos, así como también residuos de diamante originados por el disco acondicionador del *pad* [29].

2.6.3. No uniformidad en la oblea

La no uniformidad es uno de los defectos posteriores al proceso de CMP y se define como la variación de espesor sobre distintos puntos de la superficie de una oblea, este defecto se le puede atribuir a los siguientes factores [15]:

- **Pad:**

La calidad del pad, sus características así como su correcta instalación van a influir en la uniformidad del pulido por CMP. Con lo cual, el pad debe encontrarse totalmente plano. Por ejemplo, en la figura 5 se ilustra un *pad* que no se ha instalado correctamente, en donde se encuentran burbujas e irregularidades entre la interfaz del plato giratorio y el *pad*, ocasionando que la superficie del mismo no se encuentre plana.

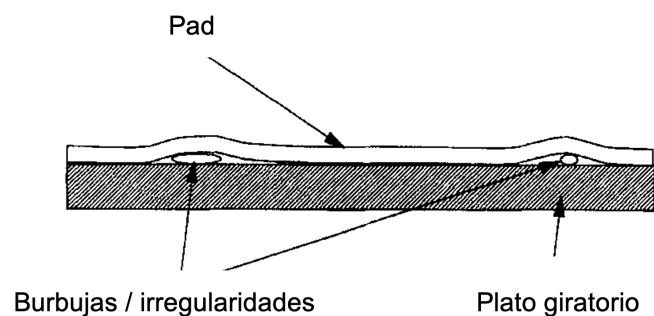


Fig. 5: Irregularidades en el pad . Adaptado de [15].

- **Carrier:** Durante el proceso de pulido de CMP, hay partículas de *slurry* que pueden llegar a la membrana del *carrier* a través del *flat* de la oblea. Las marcas de las partículas de *slurry* sobre la membrana puede causar no uniformidades en la oblea. Con el objetivo de evitar este defecto, es necesario limpiar con suficiente agua el *carrier* posterior a cada pulido. El *flat* en una oblea es una sección recta en el perímetro circular de la misma y es usado como referencia para la orientación y el manejo de la oblea durante los procesos de fabricación.

En la figura 6 se ilustra una oblea y la membrana del *carrier* sobre la cual han quedado marcas de *slurry* ingresadas a través del *flat* de la oblea, causando no uniformidades durante el pulido.

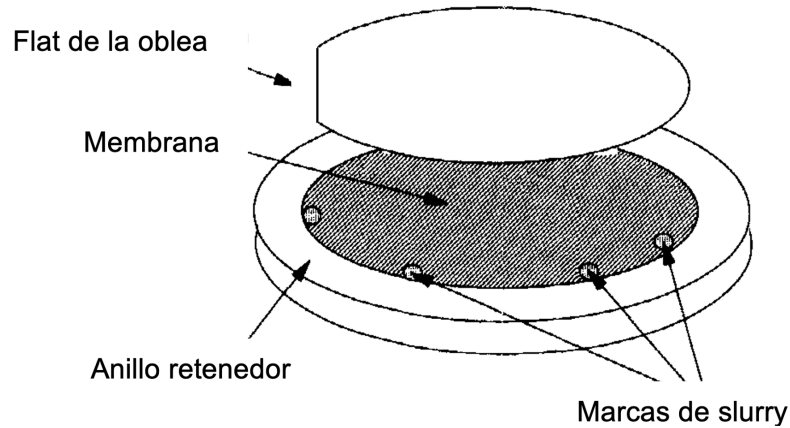


Fig. 6: Marcas de *slurry* sobre la membrana del *carrier*. Adaptado de [15].

- Parámetros de la receta:** Existen diferentes variables que intervienen en la receta que pueden afectar el resultado de un proceso de CMP. Sin embargo, dentro de estas variables se encuentran tres de ellas que particularmente afectan la uniformidad de una oblea a la que se le haya realizado un proceso. Dentro de ellas están: la presión de la oblea sobre el *pad* *Working pressure* (WP), las velocidades del *carrier* y el *pad* denominadas *Carrier Speed* (CS) y *Platen Speed* (PS) respectivamente. La respuesta de uniformidad puede cambiar dependiendo de la configuración de cada una de estas variables. Para una WP elevada se puede mejorar en gran medida la respuesta de uniformidad sobre una oblea, sin embargo se debe tener en cuenta que para valores muy elevados de WP se pueden llegar a producir rayas sobre la misma. Por otro lado, para valores de CS y PS elevados la no uniformidad tiende a aumentar.

2.7. Limpieza Post-CMP

El objetivo de realizar un proceso efectivo y eficiente de limpieza posterior al proceso de CMP ha impulsado el desarrollo de nuevos enfoques donde se utilicen técnicas que permitan minimizar los defectos sobre la oblea como lo son: grietas, rayaduras, corrosión, suciedades, partículas de *slurry*, residuos o agua [15],[29].

2.7.1. Requerimientos en la limpieza Post-CMP

Los defectos post-CMP pueden afectar el funcionamiento integral del dispositivo final, ya que la oblea está expuesta a absorber las partículas residuales sobre su superficie, o en algunos casos quedar parcialmente incrustadas en la capa superior debido a la presión mecánica ejercida por el *pad* [15]. A continuación se detallan los requerimientos de limpieza principales posteriores a un proceso CMP [30]:

- Remover partículas de *slurry* (SiO_2 , CeO_2 , Al_2O_3).
- Remover los componentes orgánicos de los aditivos químicos del *slurry*.
- Remover partículas generados durante el pulido.
- Remover los residuos orgánicos generados por el desgaste mecánico.
- Minimizar la generación de rugosidades y pérdida de material.
- No generar marcas de agua ni corrosión.

2.7.2. Eliminación de las partículas de *slurry*

Después del proceso de CMP es necesario evitar que el *slurry* se seque sobre la oblea, ya que la eliminación de partículas se vuelve más complicada cuando se ha secado. Por este motivo es importante incluir pasos de limpieza que puedan remover las partículas de *slurry* de la superficie de la oblea sin causar daños adicionales sobre la misma de forma inmediata después de haber realizado el pulido [9],[30].

Las fuerzas de adhesión que interactúan entre las partículas y la superficie de la oblea dependen del pH y la concentración iónica del *slurry* [30]. Las fuerzas de van der Waals se caracterizan por ser las fuerzas más importantes de adhesión de partículas a cualquier sustrato y estas surgen a partir de las interacciones instantáneas de dipolos entre moléculas, generadas por las posiciones de los electrones que rodean los núcleos [29]. Aplicar una fuerza superior a la de las fuerzas de van der Waals sobre el sustrato permite eliminar las partículas que se encuentren sobre la superficie de la oblea mediante técnicas de limpieza que empleen efectos mecánicos o químicos [9].

2.7.3. Técnicas de limpieza

- **Brush Scrubbing:** Se emplean técnicas de frotado con cepillos fabricados de diversos materiales, como nailon o polipropileno, que se ponen en contacto con la superficie de la oblea para eliminar mecánicamente las partículas [9],[29]. Durante el proceso de limpieza con esta técnica, se ajusta la velocidad de rotación de los cepillos y de la oblea, el flujo de agua desionizada y la altura del cepillo. El cepillo se debe comprimir entre 2 y 3 mm sobre la superficie de la oblea para entrar en contacto directo con la misma y de esta forma poder remover las partículas. A mayor compresión del cepillo con la oblea, mayor es la fuerza de fricción proporcionando una mayor eficiencia en la eliminación de partículas [15],[30].

El movimiento relativo entre el cepillo y la oblea provocan una película delgada de líquido que fluye sobre la oblea y genera un arrastre de las partículas proporcionando un efecto amortiguador entre la oblea y el cepillo evitando cualquier rayadura o daño posterior al proceso de pulido. Durante este proceso de limpieza, se utiliza agua, surfactantes, IPA, metanol, entre otros. Los cuales ayudan a eliminar películas orgánicas y aceleran el proceso de secado de la superficie de la oblea. Con esta técnica, existen diferentes desafíos como la probabilidad de causar la re-adhesión

de partículas durante el contacto del cepillo con la oblea, la capacidad de limpieza limitada sobre partículas de tamaños inferiores a los micrómetros y la imposibilidad de eliminar partículas con esta técnica de limpieza sobre obleas patronadas [29].

- **Baño Megasónico:** Esta es una técnica de limpieza sin contacto que se realiza típicamente a frecuencias de ultrasonido, donde a través de agitación mecánica, genera burbujas de cavitación debido a las fluctuaciones rápidas en la presión del líquido. Estas burbujas colapsan cerca de la superficie de la oblea, creando fuerzas que permiten remover las partículas y residuos. El efecto de parámetros clave como la potencia megasónica, el tiempo de limpieza y la temperatura impactan en el resultado de la limpieza [29]. Por ejemplo a temperaturas elevadas entre 40 °C y 50 °C, se tiene la capacidad de eliminar con gran eficiencia las partículas y residuos orgánicos que son difíciles de quitar con el frotado con cepillo a temperatura ambiente [30]. La limpieza megasónica es una técnica complementaria al frotado con cepillo en el proceso de limpieza post-CMP, especialmente para garantizar la calidad y la integridad de las obleas utilizadas en la fabricación de circuitos integrados.
- **Jet Spray:** El uso del rociador de agua a presión como método de limpieza sin contacto, muestra generalmente una eficiencia inferior al compararse con otros métodos de limpieza. Sin embargo, las condiciones de rociado con agua son menos agresivas permitiendo un enjuague efectivo el cual es útil para eliminar partículas débilmente adheridas a la oblea. Además, como no hay contacto físico directo entre la superficie de la oblea y un dispositivo mecánico, se reduce el riesgo de crear daño superficial o defectos causados post-CMP. Los factores que influyen en el resultado de la limpieza con esta técnica deben ser controlados y dependen de la velocidad del rociado, el tamaño de las gotas y la distancia entre el rociador y la superficie de la oblea [29].

3. Trabajo Experimental

Conforme a lo mencionado anteriormente, el proceso de CMP implica la configuración de diversos parámetros que influyen directamente en el resultado final de la planarización y el pulido de una oblea. El estado del arte muestra que el CMP es un proceso relativamente reciente en la tecnología de fabricación de PIC, para el cual es crucial realizar ajustes precisos en los parámetros que afectan las recetas del proceso.

La influencia de parámetros como la presión entre la oblea y el *pad* (WP) la velocidad del *carrier* (CS) y la velocidad del *pad* (PS) son determinantes para definir la uniformidad de la oblea, la tasa de pulido y la calidad de la superficie [31]. La configuración inadecuada de estos parámetros puede resultar en defectos como rayaduras, fisuras, partículas residuales, marcas de agua o *slurry* y no uniformidades en la oblea posteriores al proceso [32]. La no uniformidad sobre una oblea ocurre al presentarse desviaciones en la tasa de planarización, ya sea que esta aumente o disminuya gradualmente, o que tenga un comportamiento impredecible y es normalmente un factor que se encuentra presente en el proceso debido a las características intrínsecas del *pad* [9].

Por esta razón, es esencial configurar estos parámetros de manera adecuada para extraer los mejores resultados posibles, minimizando defectos y asegurando la uniformidad de la oblea. Sin embargo, la falta de un método para ajustar y controlar estos parámetros presenta un desafío significativo, afectando la eficiencia y la calidad del proceso de CMP [15]. Por lo tanto, se plantea la necesidad de desarrollar y validar un enfoque que permita configurar estos parámetros de forma precisa y eficiente, garantizando un proceso funcional y de alta calidad.

3.1. Puesta en marcha del proceso

El proceso de desarrollo y caracterización del CMP se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la sala limpia de la UPV Fab utilizando la herramienta Alpsitec CMP E460. La UPV Fab es una institución de I+D dedicada a la investigación y desarrollo de procesos de micro y nano fabricación de tecnologías fotónicas para diferentes aplicaciones en la industria de las comunicaciones y las comunicaciones ópticas [33]. La herramienta Alpsitec CMP E460 cuenta con un software a través del cual se pueden configurar los diferentes parámetros que intervienen en el pulido utilizando la pantalla táctil que permite acceder a las configuraciones del equipo. Como parte del trabajo experimental, se realizó la identificación de los componentes y equipamiento de la herramienta Alpsitec CMP E460, así como de las variables que intervienen en la receta del proceso. Además, se determinaron los posibles valores en los que se pueden establecer estas variables, realizando posteriormente la configuración de la receta para los diferentes valores propuestos.

En la figura 7a se muestra la herramienta Alpsitec CMP E460 que se encuentra en la sala blanca de la UPV Fab, mientras en la figura 7b se muestra una vista de cerca del módulo donde se realiza el pulido, el cual está compuesto por: el *pad* clase IC1000, el *carrier* para obleas de 6", el acondicionador conformado por un disco de diamante de 4", dos líneas dispensadoras de *slurry* y una línea dispensadora de agua.

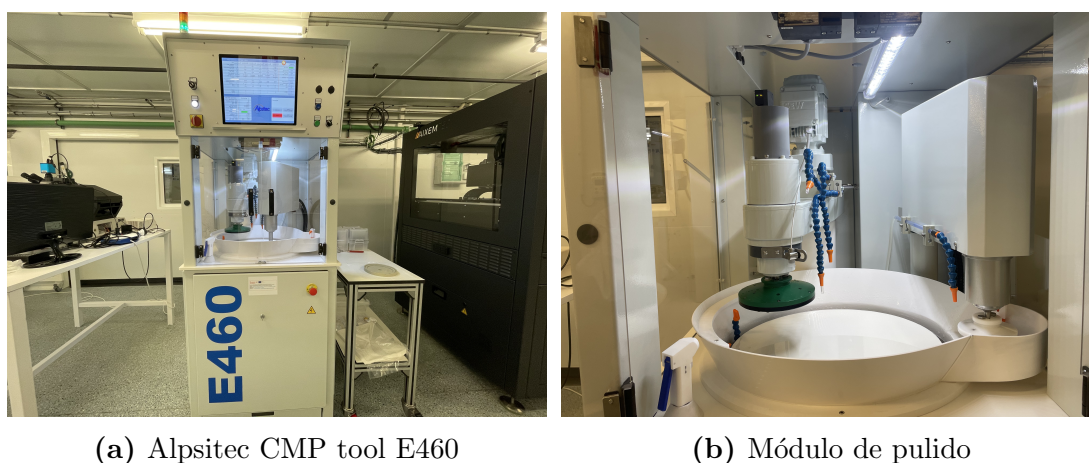


Fig. 7: Herramienta de pulido: Alpsitec CMP tool E460 - Sala blanca UPV Fab

3.2. Técnicas utilizadas para la caracterización de obleas

La caracterización de obleas es un proceso crucial en la fabricación de dispositivos semiconductores y circuitos integrados fotónicos, ya que permite evaluar con precisión las propiedades de las superficies y capas depositadas. Estas técnicas proporcionan información detallada sobre diversos aspectos de las obleas, con el objetivo de garantizar la calidad y el rendimiento de los dispositivos fabricados. A continuación, se describen las principales técnicas empleadas en este estudio, las cuales permiten medir el espesor de las películas, la topografía de la superficie y la presencia de defectos.

3.2.1. Elipsometría

Le elipsometría es una técnica que permite medir a través de un instrumento óptico los cambios en la polarización de la luz reflejada en una superficie para caracterizar la película de material sobre una oblea. Su principio de funcionamiento consiste en emitir un haz de luz polarizada que incide en la oblea y se refleja, cambiando su estado de polarización. Estos cambios se describen mediante los parámetros de amplitud Ψ y fase Δ de la señal reflejada y se miden en varios puntos de la oblea [34]. Para calcular el espesor, se crea un modelo teórico que incluye datos como el espesor, índice de refracción y coeficiente de extinción del material. Los valores medidos de Ψ y Δ se comparan con los valores calculados del modelo, ajustando iterativamente el espesor. Al realizar mediciones en varios puntos de la oblea, se puede proporcionar una medida precisa del espesor. El espesor promedio se calcula promediando los valores absolutos de espesores obtenidos en cada punto de medición lo cual permite realizar un mapa de la oblea donde se muestra la variación de espesor entre los puntos. Para realizar la caracterización del espesor y respuesta de no uniformidad de las obleas antes y después de aplicar el proceso de CMP, se definieron 17 puntos sobre los cuales se realizaron las medidas utilizando un elipsómetro espectroscópico, modelo UVISEL, del fabricante Horiba Scientific el cual se encuentra en la sala blanca de la UPV Fab [33].

3.2.2. Microscopio de fuerza atómica (AFM)

Es una herramienta de alta resolución que se emplea para caracterizar la topografía de la superficie de una muestra, medir la rugosidad y analizar defectos, lo cual permite evaluar la calidad de la superficie de una oblea y detectar imperfecciones a escala nanométrica. Su principio de funcionamiento se basa en la interacción de fuerzas entre la superficie de la muestra y una punta afilada que escanea la muestra. Esta punta puede estar hecha de materiales como el silicio o el nitruro de silicio. Las interacciones entre la punta y la superficie de la muestra causan desviaciones que se detectan mediante un sistema óptico. Durante el escaneo se miden las desviaciones en cada punto, lo cual permite reconstruir una imagen tridimensional de la topografía de la superficie de la muestra [35]. El AFM utilizado se encuentra en las instalaciones del Servicio de Microscopía de la UPV y es el modelo Multimode 8 del fabricante Bruker.

3.2.3. Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM)

Este instrumento opera en vacío y utiliza una fuente de emisión de campo para generar un haz de electrones con alta coherencia y brillo, lo que contribuye a mejorar la resolución de las imágenes. El FESEM se utilizó para examinar la morfología de la superficie en una porción de la oblea, identificar y caracterizar defectos que permitan evaluar la calidad y uniformidad de la superficie. Su funcionamiento consiste en realizar un barrido del haz de electrones sobre la superficie de la muestra, donde los electrones interactúan con los átomos de la muestra generando diversas señales, las cuales son detectadas y procesadas para formar imágenes detalladas de la topografía y composición de la superficie [36]. El equipo de FESEM utilizado se encuentra en las instalaciones del Servicio de Microscopía de la UPV y es el modelo ULTRA 55 del fabricante ZEISS Oxford Instruments.

3.3. Variables seleccionadas en la receta

La caracterización y el control de las variables que intervienen principalmente en el proceso de CMP permiten alcanzar resultados donde se pueda maximizar la tasa de pulido de material sin comprometer la integridad de la superficie y la uniformidad. La continua mejora y adaptación del proceso de CMP es un camino que permite cumplir con los requisitos de calidad, cualificación y rendimiento necesarios para las aplicaciones avanzadas de PIC y otros dispositivos de alta tecnología.

En la tabla 1 se muestran las variables que se proponen modificar en la receta y el rango de valores en las que pueden ser configuradas según los límites de la herramienta Alpsitec E460. Además de las variables mencionadas en la tabla 1, existen otros parámetros que se seleccionan y configuran en el proceso de CMP, como lo son: el componente abrasivo del *slurry*, el porcentaje utilizado durante el proceso y el tiempo de pulido.

Parámetro	Límite	Unidades
<i>Working Pressure (WP)</i>	(0 - 950)	mdaN/cm ²
<i>Carrier Speed (CS)</i>	(5 - 110)	rpm
<i>Platen Speed (PS)</i>	(5 - 110)	rpm

Tabla 1: Parámetros a modificar en la receta y sus límites.

3.4. Configuración y pruebas del proceso de pulido

Antes de realizar el proceso de pulido en una oblea que requiera planarización utilizando la herramienta Alpsitec E460, es necesario realizar procesos de pulido cortos, típicamente de 60 segundos en obleas *dummy* de silicio. Este paso de pulido sobre obleas *dummy* se realiza dos o tres veces con el propósito de probar y calibrar el proceso de CMP, lo cual permite garantizar que el equipo y el proceso estén funcionando correctamente sin arriesgar las obleas de producción. Entre cada proceso *dummy*, se debe realizar el acondicionamiento del *pad*. Durante el proceso de pulido, el *pad* se encuentra fijo sobre

un plato rotatorio el cual gira en la misma dirección con respecto al *carrier*. La oblea se presiona sobre el *pad* para realizar el pulido, y el *slurry* es suministrado en el centro del *pad*.

Con el objetivo de caracterizar el proceso de CMP en la UPV Fab bajo las condiciones de *pad*, *slurry* y material de las obleas (SiO_2 y Si_3N_4) se propuso realizar las siguientes pruebas detalladas a continuación:

3.4.1. Pruebas propuestas - Caso 1

- Elegir la configuración inicial de los parámetros principales a variar para elaborar una receta.
- Ejecutar la receta y variar el tiempo de pulido de la oblea para evaluar su impacto en la tasa de pulido y respuesta de no uniformidad.
- Utilizar el slurry Ultra-Sol™ 7A basado en partículas de sílica del fabricante PU-REON.

3.4.2. Pruebas propuestas - Caso 2

- Aumentar con respecto a la receta inicial el valor del parámetro de CS y analizar su efecto en el proceso.
- Variar el parámetro de WP en la receta inicial y analizar su efecto en el proceso.
- Ejecutar la receta y variar el tiempo de pulido de la oblea para evaluar su impacto en la tasa de pulido y respuesta de no uniformidad.
- Utilizar el slurry Ultra-Sol™ 7A basado en partículas de sílica del fabricante PU-REON.

3.4.3. Pruebas propuestas - Caso 3

- Variar los parámetros de WP y CS dejando fijo PS con el fin de evaluar el impacto de estos parámetros en el proceso. Se propone variar CS entre valores bajo, intermedio y alto.
- Para diferentes valores de WP, configurar CS=PS para valores bajo, intermedio y alto de velocidades, con el objetivo de encontrar su efecto en el proceso y la respuesta de no uniformidad.
- Utilizar el slurry Ultra-Sol™ 7A basado en partículas de sílica del fabricante PU-REON.

3.4.4. Pruebas propuestas - Caso 4

- Evaluar el efecto de utilizar una composición de slurry distinta sobre la receta. Slurry Ultra-Sol™ *Optiq* basado en partículas de óxido de cerio (CeO_2) del fabricante PUREON.
- Analizar la selectividad de este slurry con respecto al slurry Ultra-Sol™ 7A basado en partículas de sílica del fabricante PUREON.

En la tabla 2, se presenta la información sintetizada de todos los casos, indicando el procedimiento y las variables que interactúan en cada uno:

Número de caso	Procedimiento	Variables de interés	Slurry
1	1. Elegir los parámetros a variar. 2. Configurar la receta inicial.	Tiempo de pulido, WP, CS, PS.	Slurry Ultra-Sol™ 7A (sílica)
2	1. Variar CS y WP de forma individual, con respecto a los valores establecidos en el caso 1, para tiempos de pulido mayores.	Tiempo de pulido, CS, WP.	Slurry Ultra-Sol™ 7A (sílica)
3	1. Realizar variaciones de WP y CS simultáneamente para un valor fijo de PS. 2. Variar WP, cuando CS=PS para valores bajo, intermedio y alto de velocidades.	WP, CS, PS.	Slurry Ultra-Sol™ 7A (sílica)
4	1. Evaluar y comparar el efecto de diferentes slurries (sílica vs. ceria) y su selectividad sobre obleas de SiO_2 y Si_3N_4 para la receta establecida en el caso 3.	Composición de slurry	Slurry Ultra-Sol™ <i>Optiq</i> (ceria), Slurry Ultra-Sol™ 7A (sílica)

Tabla 2: Resumen de configuración y pruebas del proceso de pulido.

4. Resultados

4.1. Resultados - Caso 1

Para este caso, se requiere llevar a cabo una fase inicial en donde se plantea la receta para el proceso de CMP en estudio. Asignando valores a los parámetros principales de la receta como WP, CS, PS, cantidad dispensada de slurry y los distintos intervalos de tiempo de pulido. A partir de la configuración de la receta, es posible determinar el efecto del proceso de CMP sobre la oblea. Determinando la tasa de pulido por minuto y analizando la uniformidad del pulido se puede elaborar una caracterización inicial del proceso.

Para realizar estas pruebas, se seleccionaron dos grupos de obleas de materiales diferentes, SiO_2 y Si_3N_4 respectivamente. Antes de proceder al pulido, fue necesario medir el espesor de las obleas utilizando elipsometría con el objetivo de obtener el espesor inicial de la oblea y así poder determinar la tasa de pulido posterior al proceso de CMP a través de la medida de espesor final (post-CMP) de la oblea.

A continuación se especifica en detalle la receta propuesta para este caso aplicado inicialmente a obleas de SiO_2 y luego a obleas de Si_3N_4 y donde se plantean realizar pulidos con diferentes intervalos de tiempo:

En la tabla 3, se presentan los valores configurados de los parámetros seleccionados en la receta para el caso 1 propuesto.

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Slurry Ultra-Sol™ 7A</i>	120	(ml)
<i>Working Pressure</i>	450	(mdaN/cm ²)
<i>Carrier Speed</i>	40	(rpm)
<i>Platen Speed</i>	50	(rpm)

Tabla 3: Valores configurados de los parámetros seleccionados en la receta - Caso 1.

▪ Oblea 1 de SiO_2

Para esta oblea se realizan cuatro pulidos, cada uno de ellos con una duración de 60 segundos, con el objetivo de determinar la uniformidad del pulido así como la tasa de pulido promedio. En la tabla 4 se muestran los resultados de espesor correspondiente posterior a cada pulido y su desviación estándar, la cual es una medida de la dispersión de los datos alrededor de su valor promedio [37].

A través de estos resultados, los cuales fueron obtenidos usando elipsometría, se encuentra que el espesor inicial de la oblea antes de pasar por el proceso de CMP era de 3012.0 nm y que a medida que se realizaron pulidos sobre la oblea, su espesor disminuía. La diferencia entre el espesor inicial y final entre cada pulido de la oblea, permitió determinar la tasa de pulido en cada caso, obteniendo una tasa de pulido promedio de 213.9 nm/min, donde además se observa como aumenta el valor de σ , a medida que se realizan más pulidos sobre la oblea.

Tiempo de pulido: 60 segundos			
N° de pulido	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
0	3012.0	2.2	0
1	2793.4	8.9	218.6
2	2587.2	14.6	206.2
3	2368.5	28.2	218.7
4	2156.1	29.0	212.4
Promedio RR			213.9

Tabla 4: Resultados oblea 1 - SiO_2 .

- Oblea 2 de SiO_2

Para la oblea 2, se realizaron tres pulidos, cada uno de ellos con una duración de 90 segundos. Con el objetivo de caracterizar cómo cambiaba la tasa de pulido y no uniformidad sobre la oblea al aumentar el tiempo de pulido. Los demás parámetros de la receta se configuraron de la misma manera que se mostró anteriormente en la tabla 3. Mientras, en la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para esta oblea.

Tiempo de pulido: 90 segundos			
N° de pulido	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
0	3012.0	2.2	0
1	2678.1	5.9	222.6
2	2355.5	10.5	215.1
3	2022.9	14.8	221.7
Promedio RR			219.8

Tabla 5: Resultados oblea 2 - SiO_2 .

A través de estos resultados, se encuentra que para esta oblea la tasa de pulido promedio ha sido de 219.8 nm/min. Mientras que el valor de σ aumenta entre cada pulido de la oblea 2 con respecto a su valor inicial. Sin embargo, para este caso donde el tiempo de pulido es de 90 segundos, el resultados de σ es menor con respecto a los resultados obtenidos para la oblea 1, donde los intervalos de tiempo de pulido fueron de 60 segundos.

- Oblea 3 de Si_3N_4

En este caso, para la oblea 3 se realizan dos procesos de pulido sobre una oblea de nitruro de silicio. Cada uno de los pulidos se realizó durante 60 segundos, con el objetivo de caracterizar el efecto de la receta configurada en la tabla 3 sobre una oblea de este material. Los resultados tanto de espesor inicial como de espesor posterior a cada pulido, su desviación estándar y tasa de pulido se muestran en la tabla 6. La tasa de pulido promedio para los dos pulidos realizados en este caso es de 88.5 nm/min. Al comparar los resultados de esta receta en obleas de SiO_2 y Si_3N_4 , la tasa de pulido promedio para Si_3N_4 es mucho menor con respecto la obtenida en obleas de SiO_2 .

Tiempo de pulido: 60 segundos			
N° de pulido	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
0	656.0	6.1	0
1	570.0	9.6	86.0
2	479.0	10.4	91.0
Promedio RR			88.5

Tabla 6: Resultados oblea 3 - Si_3N_4 .

4.2. Resultados - Caso 2

En este caso se propone modificar la receta propuesta en el caso 1, aumentando el valor de los parámetros CS y WP respectivamente, manteniendo bajo la misma configuración los demás parámetros establecidos anteriormente. Para este caso se realizaron procesos de CMP sobre obleas de SiO_2 y Si_3N_4 durante tiempos de pulido mucho mayores a los propuestos en el caso 1, con el objetivo de caracterizar la respuesta del proceso y el impacto de variar parámetros de la receta propuesta inicialmente.

4.2.1. Resultados al incrementar el *Carrier Speed* (CS)

En la tabla 7, se presentan los valores configurados en la receta para el caso 2 propuesto. Para la oblea 4 de SiO_2 el *carrier speed* se configuró en 90 rpm, mientras que para la oblea 5 de Si_3N_4 el parámetro *carrier speed* es 70 rpm.

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Slurry Ultra-Sol™ 7A</i>	120	(ml)
<i>Working Pressure</i>	450	(mdaN/cm ²)
<i>Carrier Speed</i>	70/90	(rpm)
<i>Platen Speed</i>	50	(rpm)

Tabla 7: Valores configurados en la receta - Caso 2/*Carrier Speed*.

■ Oblea 4 de SiO_2

Para esta oblea el proceso de CMP se llevó acabo durante 450 segundos utilizando la configuración de la receta que se muestra en la tabla 7, para una velocidad del carrier de 90 rpm. Los resultados obtenidos para esta oblea se muestran en la tabla 8, donde la tasa de pulido resultante es de 223.4 nm/min, la cual varía en aproximadamente un 1.6 % con respecto al resultado obtenido para la oblea 2 de SiO_2 del caso 1. Sin embargo, el resultado de σ para este caso es 92.06 nm, el cual representa que el pulido sobre la oblea 4 de SiO_2 se ha realizado de una manera menos uniforme con respecto a los resultados anteriores, encontrándose algunas áreas con diferentes espesores sobre la oblea. Con estos resultados se observa cómo el aumento de la velocidad del carrier no afecta la tasa de pulido, sin embargo la no uniformidad si se ve afectada, ya que a mayor velocidad del carrier, mayor es la no uniformidad representada por σ .

Tiempo de pulido: 450 segundos			
N° de pulido	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
0	3020.0	2.0	0
1	1344.2	92.06	223.4
Promedio RR			223.4

Tabla 8: Resultados oblea 4 - SiO_2 .

- Oblea 5 de Si_3N_4

Se realizó un único proceso de pulido sobre una oblea de Si_3N_4 , el cual tuvo una duración de 240 segundos. Con el objetivo de caracterizar el efecto de aumentar la velocidad del carrier y el tiempo de pulido. En la tabla 9, se muestran los resultados tanto de espesor inicial como de espesor posterior a cada pulido, su desviación estándar y tasa de pulido. Al haber configurado la velocidad del carrier en 70 rpm, se observa que el aumento de este parámetro presenta una variación de aproximadamente 6% en la tasa de pulido con respecto a la obtenida en el caso 1 de la oblea 3 de Si_3N_4 , ya que para este caso, la tasa de pulido es de 83 nm/min, mientras en el caso 1, cuando $CS = 40$ rpm, la tasa de pulido fue 88.5 nm/min para la oblea 3 de Si_3N_4 . Por lo tanto, aumentar la velocidad del carrier no provoca un cambio muy representativo sobre la tasa de pulido.

Tiempo de pulido: 240 segundos			
N° de pulido	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
0	413.0	4.2	0
1	81.0	11.0	83
Promedio RR			83

Tabla 9: Resultados oblea 5 - Si_3N_4 .

4.2.2. Resultados al incrementar *Working pressure* (WP)

- Oblea 6 de SiO_2

En la tabla 10, se presentan los valores configurados en la receta en la cual se incrementó la presión ejercida entre la oblea y el pad para el caso propuesto en la oblea 6 de SiO_2 .

Para esta oblea el proceso de CMP se llevó a cabo durante 300 segundos utilizando la configuración mencionada. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 11, donde se tiene una tasa de pulido de 344.5 nm/min para $WP = 750$ mdaN/cm². Al comparar este resultado de tasa de pulido con la tasa de pulido de la oblea 2 de SiO_2 presentada en el caso 1, se encuentra como el aumento del parámetro de *Working pressure* (WP) provoca un gran incremento en la tasa de pulido por minuto.

- Oblea 7 de Si_3N_4

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Slurry Ultra-Sol™ 7A</i>	120	(ml)
<i>Working Pressure</i>	750	(mdaN/cm ²)
<i>Carrier Speed</i>	70	(rpm)
<i>Platen Speed</i>	50	(rpm)

Tabla 10: Valores configurados en la receta. Oblea 6 - SiO_2 / *Working Pressure*.

Tiempo de pulido: 300 segundos			
<i>Nº de pulido</i>	<i>Th (nm)</i>	<i>σ (nm)</i>	<i>RR (nm/min)</i>
0	3020.0	2.0	0
1	1297.7	51.2	344.5
Promedio RR			344.5

Tabla 11: Resultados oblea 6 - SiO_2 .

En la tabla 12, se presentan los valores configurados en la receta para el caso propuesto en la oblea 7 de Si_3N_4 . En este caso la presión entre la oblea y el pad se configura en 600 mdaN/cm².

Parámetro	Valor	Unidades
<i>Slurry Ultra-Sol 7A</i>	120	(ml)
<i>Working Pressure</i>	600	(mdaN/cm ²)
<i>Carrier Speed</i>	70	(rpm)
<i>Platen Speed</i>	50	(rpm)

Tabla 12: Valores configurados en la receta. Oblea 7 - Si_3N_4 / *Working Pressure*.

El proceso de CMP para esta oblea se llevó a cabo durante 180 segundos. Los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 13, donde se tiene una tasa de pulido de 104.6 nm/min para $WP = 600$ mdaN/cm².

Tiempo de pulido: 180 segundos			
<i>Nº de pulido</i>	<i>Th (nm)</i>	<i>σ (nm)</i>	<i>RR (nm/min)</i>
0	413.0	4.2	0
1	86.8	11.01	104.6
Promedio RR			104.6

Tabla 13: Resultados oblea 7 - Si_3N_4 .

Al comparar este resultado con el obtenido en el caso 1 para la oblea 3, se encuentra cómo la tasa de pulido pasó de 88.5 nm/min cuando $WP = 450$ mdaN/cm² a 104.6 nm/min para $WP = 600$ mdaN/cm². Por lo tanto, para obleas de Si_3N_4 se encuentra también como la variación en el parámetro de *Working pressure* (WP) genera cambios en la tasa de pulido por minuto del proceso.

4.3. Resultados - Caso 3

Después de haber incrementado en las recetas correspondientes a los casos anteriores, parámetros como el tiempo de pulido, *Carrier Speed* y *Working pressure* con el objetivo de evaluar su efecto sobre el resultado de la oblea en términos de no uniformidad y tasa de pulido por minuto. En este caso se propone realizar pulidos a una serie de obleas configurando parámetros como *Working pressure*, *Carrier Speed* y *Platen Speed* en diferentes valores que se encuentren dentro de los límites soportados por la herramienta los cuales se mencionaron en la tabla 1. Se propone inicialmente configurar el parámetro de *Working pressure* en un valor bajo y posteriormente alto dentro de los límites, para diferentes valores de *Carrier Speed*, dejando fijo el parámetro de *Platen Speed*. Con estas configuraciones se evaluó cual de las opciones arroja una mejor respuesta en obleas de SiO_2 y Si_3N_4 , las cuales tienen las especificaciones iniciales que se muestran en la tabla 14.

Tipo de Oblea	Th (nm)	σ (nm)
SiO_2	501.4	1.8
Si_3N_4	322	4.5

Tabla 14: Especificaciones iniciales de las obleas de SiO_2 y Si_3N_4 .

4.3.1. Resultados obleas de SiO_2 para distintos valores de CS y WP, dejando fijo PS.

Para este caso se llevaron a cabo procesos de pulido en obleas de SiO_2 inicialmente

- **Obleas de la 8 a la 13 - SiO_2**

En la tabla 15 se muestran las distintas configuraciones aplicadas a los parámetros de la receta y sus resultados.

Tiempo de pulido: 90 segundos / <i>Slurry Ultra-Sol 7A</i> 120 ml						
Oblea	WP (mdaN/cm ²)	CS (rpm)	PS (rpm)	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
8	350	20	40	288.2	11.9	142.1
9	350	40	40	280.8	7.9	147.1
10	350	80	40	277.8	10.1	149.1
11	650	20	40	141.7	15.6	239.8
12	650	40	40	134.3	7.4	244.7
13	650	80	40	131.8	15.3	246.4

Tabla 15: Receta y resultados obleas 8-13 de SiO_2 .

A través de los resultados, se encontró que cuando el parámetro de *Working pressure* se configuró en 350 mdaN/cm², la mejor respuesta en términos de uniformidad (menor σ) se obtiene cuando CS=PS= 40 rpm. Este resultado corresponde a la oblea 9 la cual

presentó la mejor respuesta en términos de uniformidad. Obteniéndose una tasa de pulido de 147.1 nm/min y un valor de σ de 7.9 nm.

En el caso de la oblea 10, el cual se presenta cuando $CS > PS$, se obtuvo un σ de 10.1 nm, mientras que la mayor no uniformidad se presentó en la oblea 8, cuando $CS < PS$ con un σ de 11.9 nm. Como se mencionó en el caso 2, las variaciones en el parámetro de *Carrier Speed* afectan en gran medida la uniformidad de la oblea, pero no la tasa de pulido por minuto, que es muy similar en los resultados de las obleas 8, 9 y 10.

Sin embargo, al aumentar el parámetro de *Working pressure* a 650 mdaN/cm², se observa un gran aumento en la tasa de pulido. Estos resultados se muestran en la tabla 15 y corresponden a las obleas 11, 12 y 13. Nuevamente, el mejor caso en términos de uniformidad se presentó cuando $CS = PS = 40$ rpm, correspondiente a la oblea 12, con un σ de 7.4 nm y una tasa de pulido de 244.7 nm/min. Con estos resultados es posible considerar que dentro de las distintas recetas hasta ahora, la correspondiente a la oblea 12 para $WP = 650$ mdaN/cm², $CS = 40$ rpm, y $PS = 40$ rpm, proporciona una de las mejores respuestas sobre la oblea.

En la serie de figuras 8, 9 y 10 se muestran los mapas de colores de las obleas, donde cada color representa el espesor correspondiente a cada uno de los 17 puntos donde se realizó la medida de elipsometría para cada oblea. En estos mapas, el color azul representa la zona con mayor espesor, es decir que corresponde a una zona que se ha pulido menos con respecto al resto de la oblea. Mientras el color rojo representa la zona que más se ha pulido en la oblea donde se tiene un menor espesor.

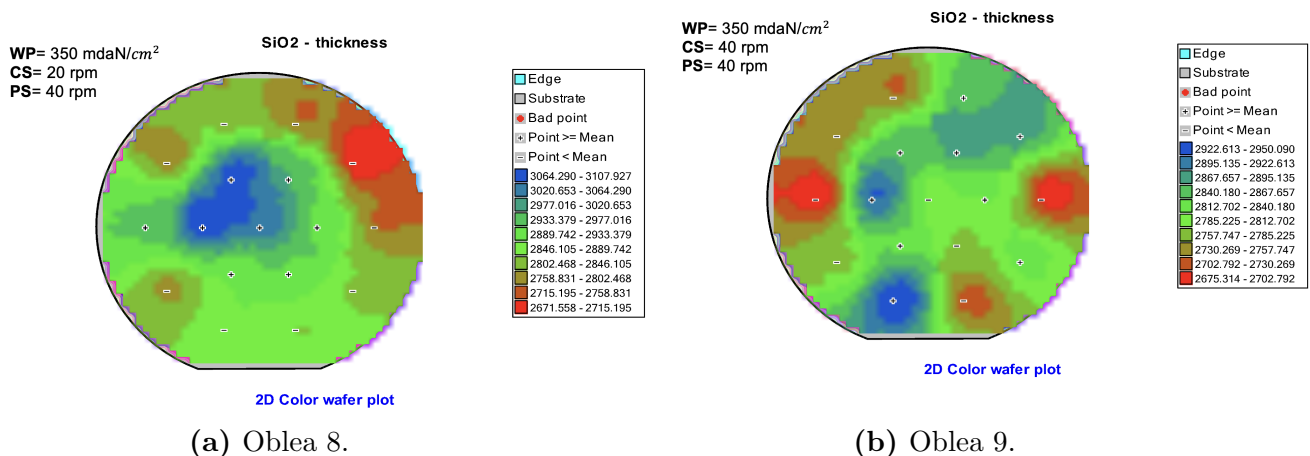


Fig. 8: Mapa de espesores de obleas 8 - 9 de SiO_2 .

La figura 8a corresponde al mapa de la oblea 8, en el cual el borde derecho superior de la oblea se ha pulido más con respecto a las demás áreas de la oblea, con un espesor de aproximadamente 271.5 nm. Mientras la zona central izquierda representada en azul presenta un mayor espesor alrededor de los 310.7 nm. Por lo tanto la diferencia de espesores entre el punto máximo y mínimo corresponde a 39.2 nm aproximadamente. La figura 8b corresponde al mapa de la oblea 9. La zona con mayor espesor tiene un valor de 295 nm, mientras la zona con menor espesor es de 270.2 nm. Obteniendo una diferencia de

aproximadamente 24.8 nm entre el máximo y el mínimo espesor.

La figura 9a representa el mapa de la oblea 10 para el cual su mayor espesor corresponde a 291 nm, mientras el mínimo es de 263.2 nm. La diferencia entre ambos es de 27.8 nm. Al comparar los resultados de las obleas 8, 9 y 10 se encuentra como efectivamente la oblea 9 presenta la mejor uniformidad del pulido sobre la oblea, ya que al evaluar la diferencia entre espesores máximo y mínimo, el resultado es de 24.8 nm, el cual representa el menor entre las tres opciones descritas entre las obleas.

La figura 9b corresponde al mapa de la oblea 11. En este caso, la zona del borde superior presenta el menor espesor de 119.2 nm, mientras el borde inferior cercano al flat tiene un espesor mayor de 169.3 nm. Mientras el resto de la oblea presenta espesores mas uniformes. La diferencia entre el espesor máximo y mínimo es de 50.1 nm.

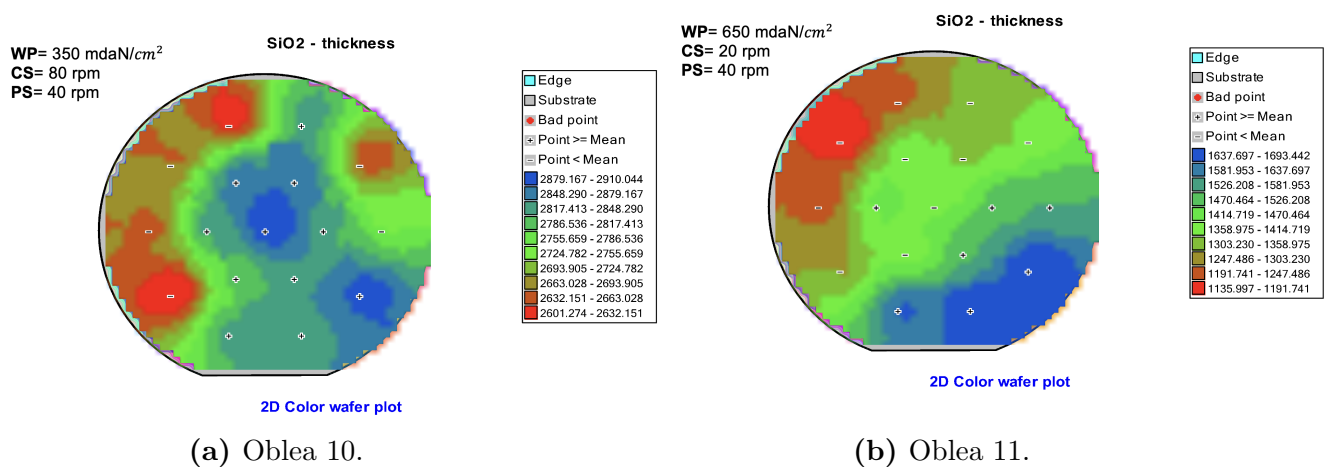


Fig. 9: Mapa de espesores de obleas 10 - 11 de SiO_2 .

La figura 10a representa el mapa de la oblea 12 la cual arroja la mejor respuesta de uniformidad posterior al proceso de pulido, lo cual se puede apreciar según la distribución de los colores sobre la oblea. El área con menor espesor corresponde al borde superior con 118.3 nm. Mientras que en el borde inferior derecho se encuentra el área con mayor espesor de 145.9 nm. Presentándose una diferencia de 27.7 nm entre ambas zonas.

Por ultimo, se tiene la figura 10b la cual representa el mapa de la oblea 13, para el cual se tienen las zonas con mayor y menor espesor cercanas a los bordes opuestos de la oblea. En el borde superior, se tiene el menor espesor correspondiente a 110.1 nm. Mientras en el borde inferior, el mayor espesor de 167.3 nm. La diferencia entre ambos es de 57.2 nm.

Al comparar los resultados de las obleas 11, 12 y 13 corrobora a través de las diferencias entre el espesor máximo y mínimo de las obleas, como la receta configurada en la oblea 12 presenta la mejor respuesta de uniformidad, con una diferencia de espesor de 27.7 nm la cual corresponde a un σ de 7.4 nm.

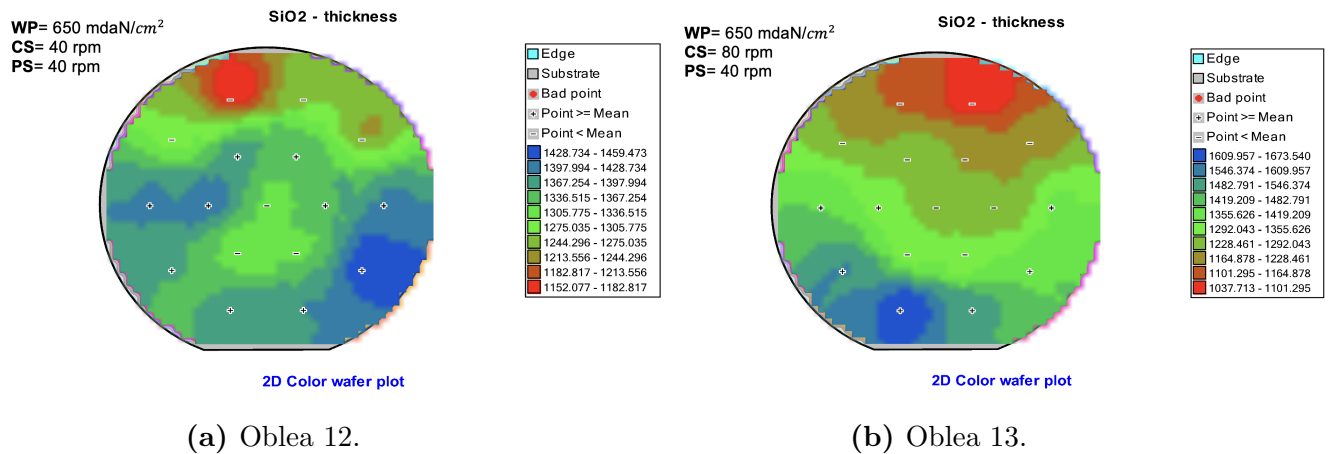


Fig. 10: Mapa de espesores de obleas 12 - 13 de SiO_2 .

4.3.2. Resultados obleas de SiO_2 para distintos valores de PS y WP, cuando CS=PS.

En la sección 4.3.1 se caracterizó la tasa de pulido y la respuesta de uniformidad conforme a la variación de parámetros en la receta como *Working pressure* y *Carrier Speed*.

En este caso se propone caracterizar cómo afecta sobre el resultado la variación del parámetro de *Platen Speed*. Para esto, se consideran de los resultados anteriores, configurar CS=PS, ya que de esta forma se obtuvo una mejor respuesta en términos de uniformidad sobre la oblea.

■ Obleas de la 14 a la 19 - SiO_2

En la tabla 16 se muestran las configuraciones sobre la receta y los resultados obtenidos en cada oblea.

<i>Slurry Ultra-Sol 7A</i> 120 ml							
Oblea	WP (mdaN/cm ²)	CS (rpm)	PS (rpm)	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)	
14	350	20	20	128.5	11.8	84.6	
15	350	40	40	131.2	15.0	149.6	
16	350	80	80	130.6	17.2	275.3	
17	650	20	20	121.9	15.5	135.8	
18	650	40	40	134.3	7.4	244.7	
19	650	80	80	135.0	17.4	440.6	

Tabla 16: Receta y resultados obleas 14-19 de SiO_2 .

Las obleas se pulieron durante diferentes tiempos de pulido con el objetivo de que el espesor final estuviera entre 130 nm y 135 nm aproximadamente, para poder realizar una comparativa entre las obleas y determinar cómo impactaban en el resultado cada uno

de los parámetros seleccionados en la receta. Los tiempos de pulido para cada oblea se encuentran en la tabla 17.

Oblea	14	15	16	17	18	19
Tiempo de pulido (s)	265	150	81	168	90	50

Tabla 17: Tiempos de pulido de obleas 14 - 19 de SiO_2 al variar *platen speed* (PS).

En los resultados de la tabla 16 se observa que a medida que se incrementa el parámetro de *Platen Speed*, la tasa de pulido por minuto aumenta. Para las obleas 14, 15 y 16, cuando el parámetro de *Working pressure* es 350 mdaN/cm^2 , la configuración que ofrece el mejor resultado en términos de uniformidad es la de la oblea 14, con bajas velocidades de pulido, para la cual se obtuvo una tasa de pulido de 84.6 nm/min y una desviación estándar (σ) de 11.8 nm . Sin embargo, con una *Working pressure* de 650 mdaN/cm^2 , la mejor uniformidad se logró en la oblea 18, configurada a una velocidad de pulido media, con una tasa de pulido de 244.7 nm/min y un σ de 7.36 nm .

La figura 11a y 11b representan los mapas de espesores correspondientes a la oblea 14 y 18 respectivamente, las cuales a través de la configuración de los parámetros de la receta, arrojaron los mejores resultados en términos de uniformidad para valores de *Working pressure* bajo y alto, cuando $CS=PS$. Las diferencias entre el espesor máximo y mínimo de la oblea 14 es de 36.6 nm , la cual corresponde a un σ de 11.8 nm . Mientras para la oblea 18, la diferencia del espesor es de 27.6 nm para un σ de 7.36 nm .

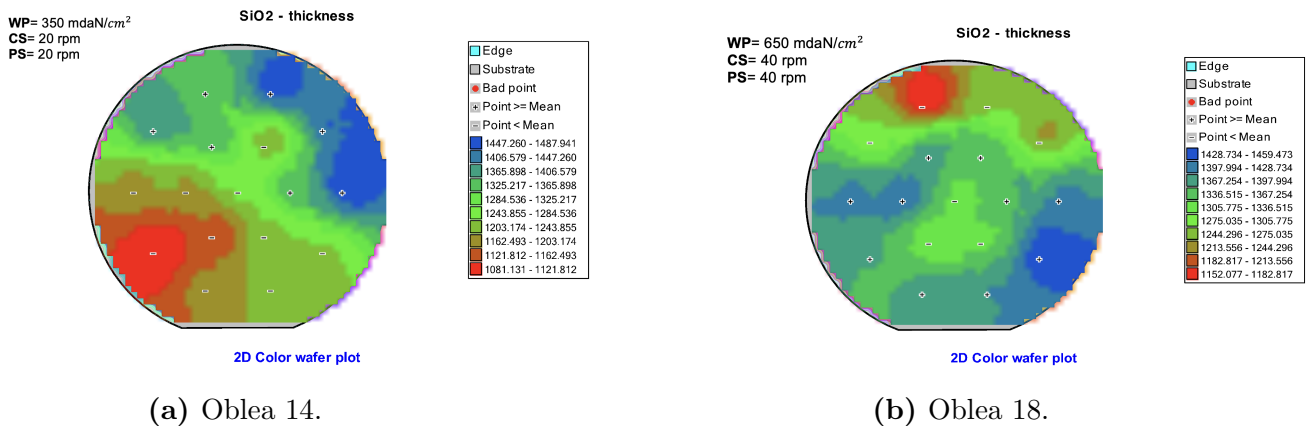


Fig. 11: Mapa de espesores de obleas 14 y 18 de SiO_2 .

4.3.3. Resultados obleas de Si_3N_4 para distintos valores de PS y WP, cuando $CS=PS$.

Después de caracterizar en obleas de SiO_2 el efecto de variar los parámetros de *Working pressure*, *Carrier Speed* y *Platen Speed*, se realizaron pruebas en obleas de Si_3N_4 para evaluar la tasa de pulido y uniformidad sobre este material.

▪ Obleas de la 20 a la 25 - Si_3N_4

Considerando a través de las pruebas realizadas anteriormente que se tiene una mejor respuesta en términos de uniformidad en las obleas cuando PS=CS. Se propusieron configuraciones para la receta en donde se configuró PS=CS para valores bajo, medio y alto. En la tabla 18 se muestran las recetas propuestas para cada oblea así como los resultados obtenidos en cada caso.

<i>Slurry Ultra-Sol 7A</i> 120 ml							
Oblea	WP (mdaN/cm ²)	CS (rpm)	PS (rpm)	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)	
20	350	20	20	165.6	8.2	29.9	
21	350	40	40	169.6	9.6	58.6	
22	350	80	80	166.4	5.5	112.5	
23	650	20	20	178.6	7.9	50.0	
24	650	40	40	171.5	5.0	97.9	
25	650	80	80	164.4	6.0	181.8	

Tabla 18: Receta y resultados obleas 20-25 de Si_3N_4 .

Las obleas se pulieron durante diferentes tiempos de pulido como se muestra en la tabla 19, ya que a medida que se incrementa el parámetro de *Platen Speed*, la tasa de pulido por minuto aumenta.

Oblea	20	21	22	23	24	25
Tiempo de pulido (s)	300	156	83	172	90	52

Tabla 19: Tiempos de pulido de obleas 20-25 de Si_3N_4 al variar *platen speed*.

En los resultados de las oblea 20, 21 y 22, cuando el parámetro de *Working pressure* es 350 mdaN/cm², la configuración que ofrece el mejor resultado en términos de uniformidad es la de la oblea 22, la cual corresponde a una velocidad alta de pulido. Para esta oblea se obtuvo una tasa de pulido de 112.5 nm/min y un σ de 5.5 nm. Sin embargo, para *Working pressure* de 650 mdaN/cm², la mejor uniformidad se logró en la oblea 24, configurada a una velocidad de pulido media, lo cual dio como resultado una tasa de pulido de 97.9 nm/min y un σ de 5.0 nm.

Comparando las tasas de pulido obtenidas para las obleas de SiO_2 con los resultados obtenidos para Si_3N_4 , se observa que para este último material la tasa de pulido es mucho menor. Además, para las obleas de SiO_2 cuando el parámetro de *Working pressure* es bajo, la mejor uniformidad se presenta a velocidades de pulido de 20 rpm. En cambio, para el Si_3N_4 , la oblea es más uniforme cuando las velocidades de pulido son altas (80 rpm). Mientras que para una configuración de *Working pressure* elevada para ambos materiales, la oblea es más uniforme a velocidades de pulido medias de 40 rpm.

En la figura 12, se muestran los mapas de colores correspondientes a las obleas de Si_3N_4 para la configuración de la receta que presentó los mejores resultados en términos

de uniformidad de la oblea. Cada color en el mapa representa el espesor correspondiente a cada uno de los 17 puntos donde se realizó la medida de elipsometría.

La figura 12a corresponde al mapa de la oblea 22, para la cual la diferencia entre el espesor máximo y mínimo es de 20.9 nm. El mapa de la oblea 24 esta representado en la figura 12b, el cual tiene una diferencia de espesores de 14.4 nm.

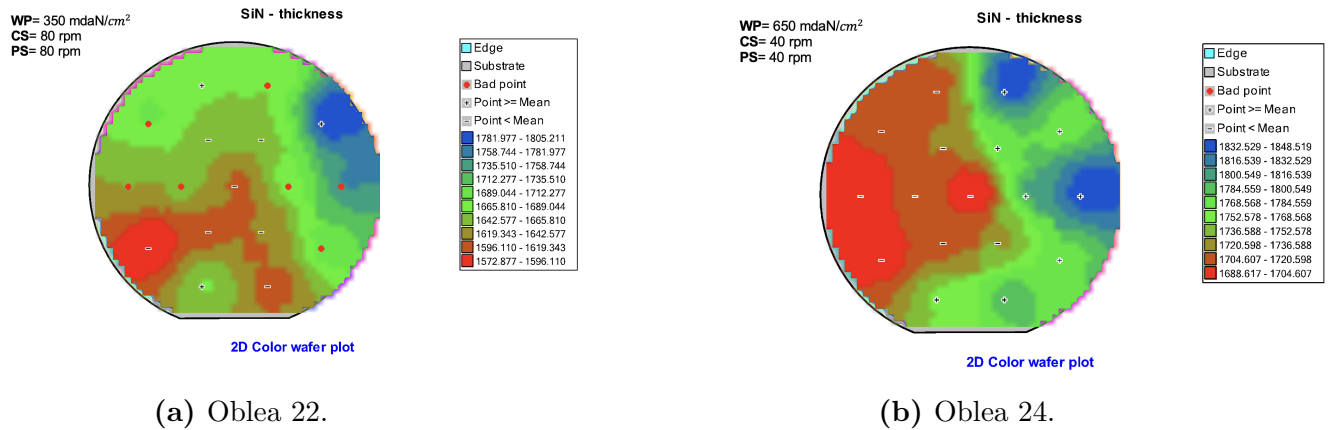


Fig. 12: Mapa de espesores de obleas 22 y 24 de Si_3N_4 .

4.4. Resultados - Caso 4

En este caso se propone realizar pulidos utilizando un *slurry* basado en partículas de ceria, considerando algunas de las configuraciones de parámetros de las recetas implementadas en el caso 3 para las cuales se encontraron mejores resultados. Se consideran las especificaciones iniciales de las obleas de SiO_2 y Si_3N_4 expuestas en la tabla 14.

■ Oblea 26 de SiO_2

En la tabla 20 se muestra la configuración de los parámetros de la receta así como los resultados obtenidos para la oblea 26. La cual se pulió durante 20 segundos utilizando el *slurry* Ultra-Sol Cerium, con el objetivo de encontrar la selectividad de este *slurry* sobre la oblea de SiO_2 y comparar su resultado con el obtenido en el caso anterior.

Se encuentra que el *slurry* basado en partículas de ceria tiene una tasa de pulido de 930.6 nm/min. Mientras que la tasa de pulido de la oblea 14 correspondiente al caso 3 es de 84.6 nm/min utilizando el *slurry* basado en partículas de sílica. Al comparar los resultados, se encuentra que utilizando el *slurry* de ceria la tasa de pulido fue once veces mayor a la que se caracterizó para el *slurry* Ultra-Sol 7A (sílica).

■ Oblea 27 de Si_3N_4

En el caso de Si_3N_4 , la oblea 27 se pulió durante 60 segundos y la configuración de la receta y los resultados utilizando el *slurry* Ultra-Sol cerium oxide se muestran en la tabla 21. Además, en la tabla también se muestra el resultado de la oblea 24 la cual había

<i>Slurry Ultra-Sol Cerium Oxide</i> 120 ml						
Oblea	WP (mdaN/cm ²)	CS (rpm)	PS (rpm)	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
26	350	20	20	192.0	16.0	930.6
<i>Slurry Ultra-Sol 7A (Silica)</i> 120 ml						
14	350	20	20	128.5	11.8	84.6

Tabla 20: Receta y resultados obleas 26 y 14 de SiO_2 para diferentes slurry.

sido pulida bajo las mismas condiciones pero utilizando el *slurry* Ultra-Sol 7A. En los resultados, se observa que la tasa de pulido para el *slurry* de ceria correspondiente a la oblea 27 es 153.9 nm/min, lo cual es alrededor de cinco veces mayor a la tasa que se obtuvo utilizando el *slurry* de silica en la oblea 24. Comparando los resultados del *slurry* de ceria para obleas de SiO_2 y Si_3N_4 , se demuestra con los resultados de la tasa de pulido que este tiene mayor selectividad sobre el SiO_2 .

<i>Slurry Ultra-Sol Cerium Oxide</i> 120 ml						
Oblea	WP (mdaN/cm ²)	CS (rpm)	PS (rpm)	Th (nm)	σ (nm)	RR (nm/min)
28	350	20	20	168.1	15.73	153.9
<i>Slurry Ultra-Sol 7A (Silica)</i> 120 ml						
24	350	20	20	165.6	8.16	29.93

Tabla 21: Receta y resultados obleas 27 y 24 de Si_3N_4 para diferentes slurry.

5. Caracterización de rugosidad

Con el objetivo de caracterizar la rugosidad de la oblea posterior al proceso de CMP se emplea un Microscopio de fuerza atómica (AFM). Se analizaron cuatro muestras, dos de ellas antes del proceso de CMP y dos posteriores al proceso, para así evaluar si se presentaron cambios en la rugosidad y posibles defectos en la topografía de la superficie de las muestras.

5.1. Muestra de Silicio

El análisis de AFM se realizó escaneando un área de $10 \mu m^2$ sobre un trozo de muestra de oblea de silicio que no ha sido expuesto a proceso de CMP, como se muestra en la figura 13. Para medir la rugosidad de la muestra, se seleccionó sobre los $10 \mu m^2$ escaneados un área de $1 \mu m \times 1 \mu m$, encontrándose que R_a en esa área es 0.118 nm. El parámetro R_a representa la rugosidad media aritmética, la cual es el promedio de las desviaciones absolutas de la altura del perfil con respecto a una línea media a lo largo de la superficie de la muestra escaneada y es un parámetro que se utiliza para cuantificar la textura de la superficie. Mientras la rugosidad de la muestra correspondiente al área de $10 \mu m^2$ fue de 0.131 nm representado por el parámetro de *Image* R_a .

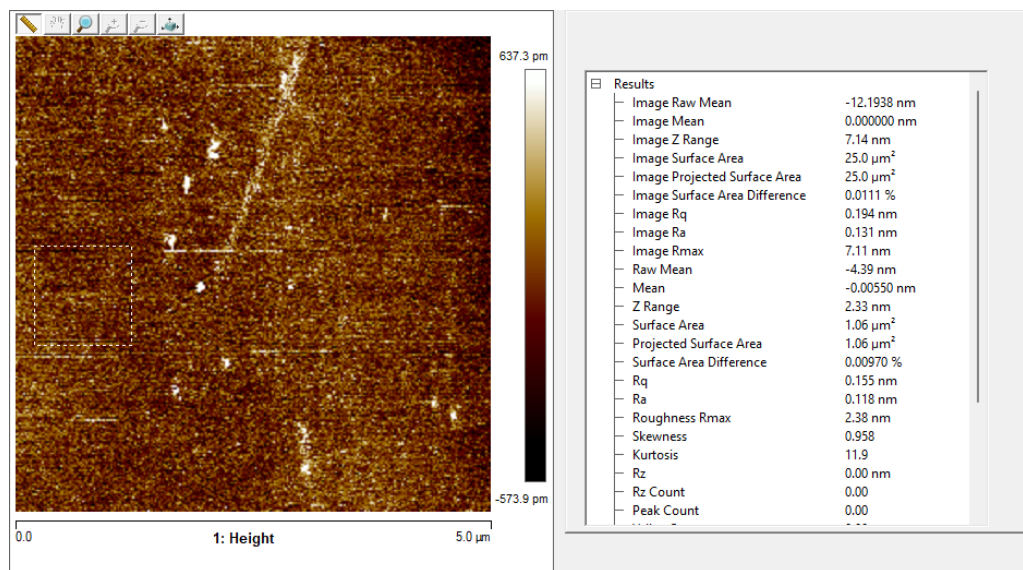


Fig. 13: Medida de rugosidad para muestra de Si obtenida por AFM.

5.2. Muestra de Óxido de Silicio

En la figura 14, se muestra el área escaneada por el AFM para una muestra de oblea de SiO_2 que no ha sido expuesta a proceso de CMP. Encontrándose un R_a de 0.138 nm y un $\text{Image } R_a$ de 0.445 nm.

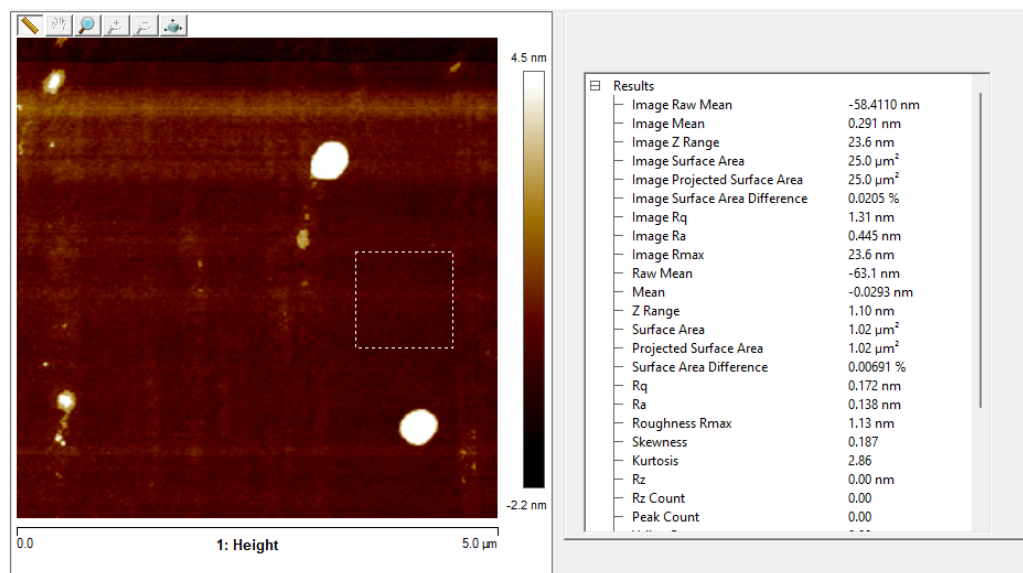


Fig. 14: Medida de rugosidad para muestra de Óxido de Silicio obtenida por AFM.

5.3. Muestra de Óxido de Silicio. Post CMP - Oblea 15

En la figura 15, se observa el área escaneada por el AFM para una muestra de oblea de SiO_2 correspondiente a la oblea 15 la cual fue expuesta a un proceso de CMP, según la receta configurada en la tabla 16. Se determinó para esta muestra un R_a de 0.197 nm y un $Image R_a$ de 0.286 nm.

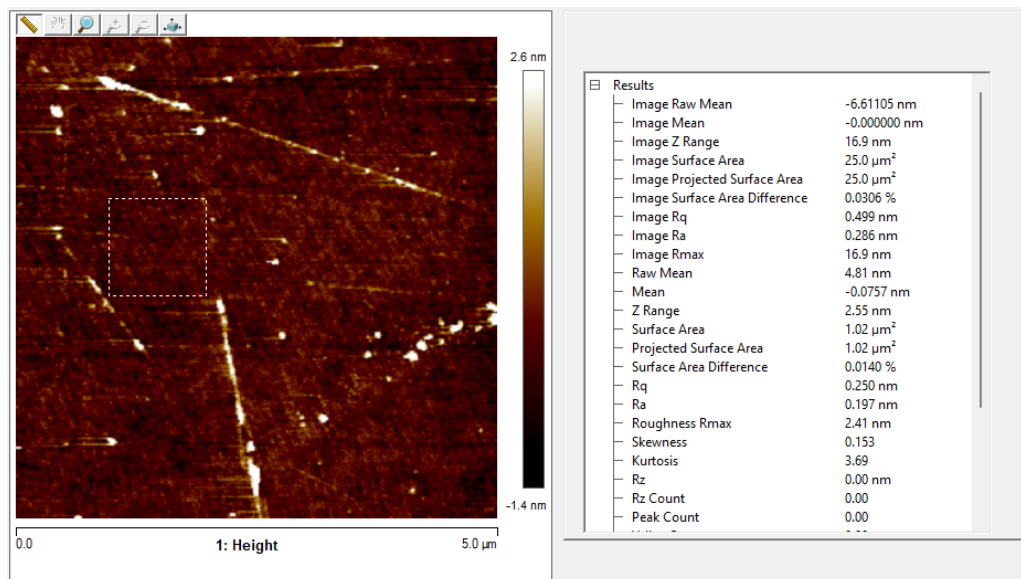


Fig. 15: Medida de rugosidad para muestra de SiO_2 - Oblea 15 obtenida por AFM.

5.4. Muestra de Óxido de Silicio. Post CMP - Oblea 18

Se realizó la medida de rugosidad para la muestra de la oblea 18 de SiO_2 , la cual fue sometida a una receta diferente a la oblea correspondiente al resultado anterior (oblea 15). En la figura 16 se muestra el área escaneada, para la cual se encontró un R_a de 0.170 nm y un $Image R_a$ de 0.211 nm. La receta y resultados de esta oblea se encuentran en la tabla 16.

En la tabla 22 se recopilieron los resultados de R_a y de $Image R_a$ descritos para las obleas de Si, SiO_2 sin CMP y SiO_2 Post CMP.

Material de la oblea	R_a (nm)	$Image R_a$ (nm)
Si	0.118	0.131
SiO_2	0.138	0.445
SiO_2 (oblea 15)	0.170	0.211
SiO_2 (oblea 18)	0.197	0.286

Tabla 22: Resultados de caracterización de rugosidad

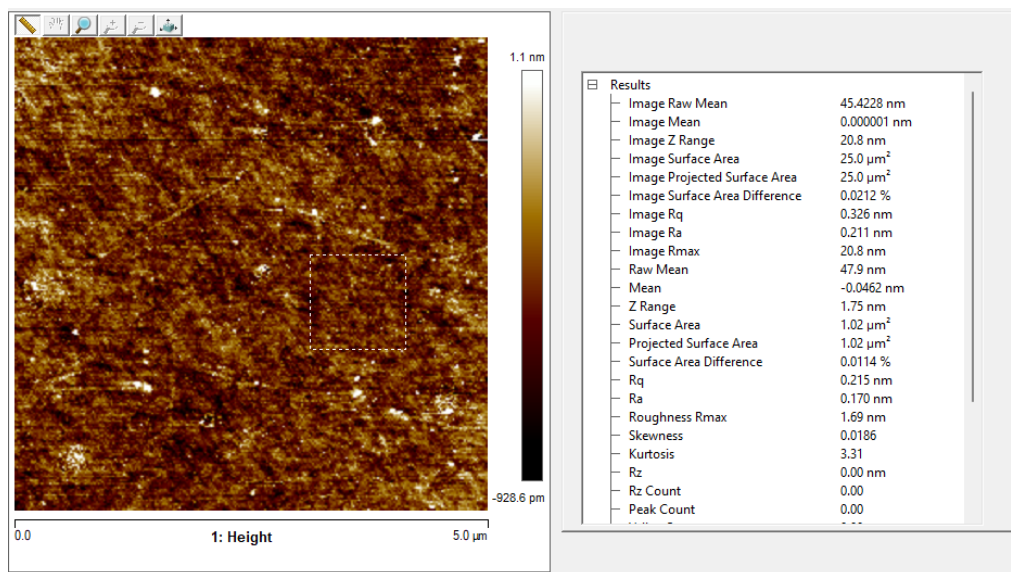


Fig. 16: Medida de rugosidad para muestra de Óxido de Silicio - Oblea 18 obtenida por AFM.

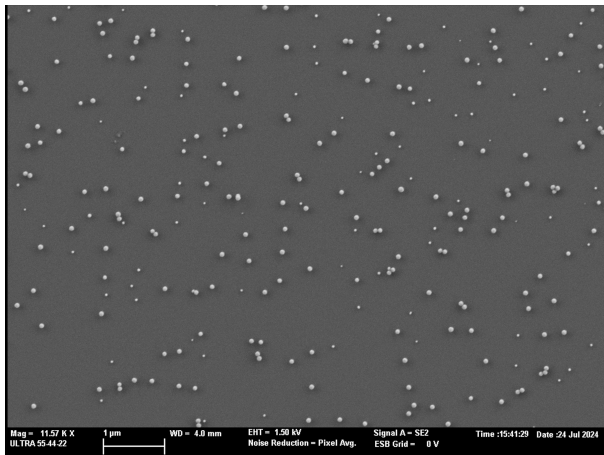
6. Caracterización de defectos

Utilizando el microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM), se analizaron dos muestras correspondientes a obleas de SiO_2 que fueron sometidas a procesos de pulido bajo la misma receta utilizada para la oblea 18 del caso 3. Sin embargo las técnicas de limpieza aplicadas para estas dos obleas fueron diferente entre sí. La primera oblea, posterior al proceso de CMP se limpió utilizando la técnica de *jet spray*, donde se roció abundante cantidad de agua sobre la oblea y posteriormente esta se secó utilizando nitrógeno. Mientras que la segunda oblea, se limpió utilizando la técnica de *jet spray* y posteriormente se sometió a baños de ultrasonido a 45 kHz de frecuencia, utilizando la herramienta de limpieza ultrasonido modelo USC-TH del fabricante VWR. Se realizaron cinco baños, donde la oblea se sumergió en un recipiente con diferentes líquidos en cada caso como se describen a continuación:

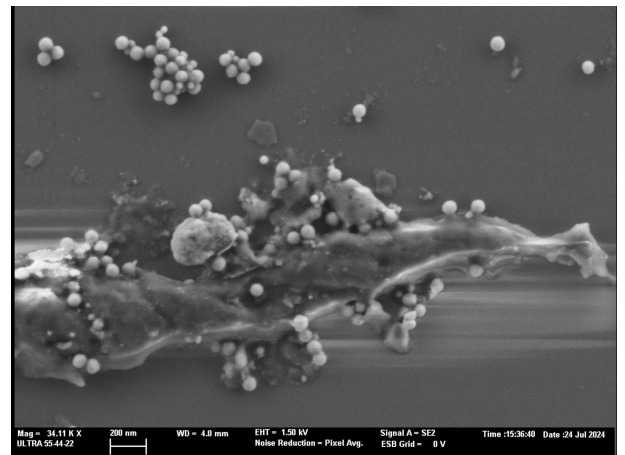
- Oblea sumergida en agua, baño de ultrasonido durante 15 minutos
- Oblea sumergida en agua, baño de ultrasonido durante 10 minutos
- Oblea sumergida en acetona, baño de ultrasonido durante 5 minutos
- Oblea sumergida en alcohol isopropílico, baño de ultrasonido durante 5 minutos
- Oblea sumergida en agua, baño de ultrasonido durante 10 minutos

La figura 17 corresponde a las imágenes analizadas con el FESEM, para la oblea que se limpió únicamente con agua utilizando la técnica de *jet spray*. Se encuentra en la figura 17a la gran cantidad de partículas de *slurry* que han quedado adheridas a la superficie de

la oblea. Mientras, la figura 17b muestra una aglomeración de estas partículas sobre la superficie.



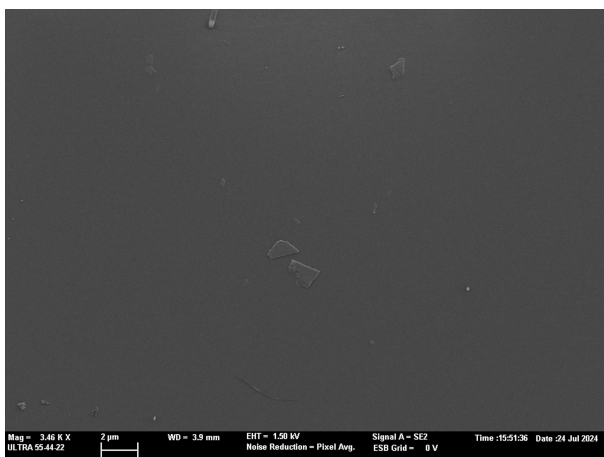
(a) Partículas de slurry sobre la oblea después de pulir.



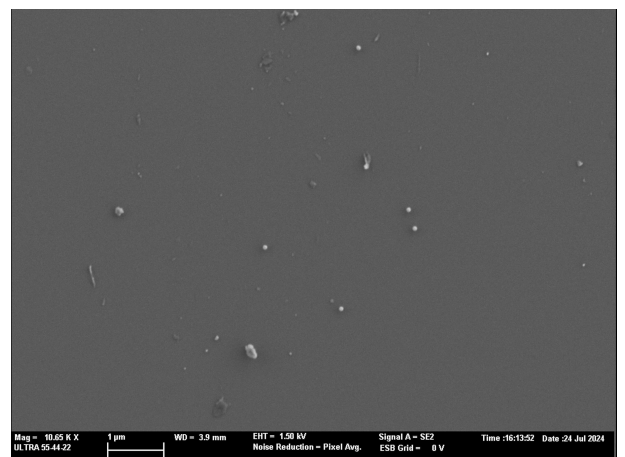
(b) Aglomeración de partículas de slurry sobre una oblea.

Fig. 17: Oblea de SiO_2 con limpieza de *jet spray* después de proceso CMP con slurry de sílica.

La figura 18 corresponde a las imágenes de la oblea a la que se le realizó la limpieza utilizando *jet spray*, junto con los baños de ultrasonido descritos. En la figura 18a se muestra una superficie de la oblea donde no se presentan partículas de *slurry* ni mayores defectos posteriores al proceso de CMP. En el caso de la figura 18b, se observa una zona de la muestra de la oblea, donde se localizan unas pocas partículas de *slurry*, en comparación a las encontradas en la oblea que se limpió únicamente con agua.



(a) Superficie de la oblea sin residuos



(b) Residuos de slurry

Fig. 18: Oblea de SiO_2 con limpieza de *jet spray* y baños de ultrasonido después de procesos de CMP

De esta manera, se pudo apreciar claramente la influencia de la limpieza sobre la superficie de la oblea posterior a un proceso de pulido. Para remover la mayoría de partículas residuales sobre la oblea es necesaria aplicar una limpieza más eficiente, lo cual se puede encontrar a través de la combinación de técnicas de limpieza.

7. Conclusiones

El trabajo realizado para la caracterización del proceso de Pulido Químico-Mecánico, *Chemical Mechanical Polishing* (CMP) ha proporcionado una comprensión detallada de cómo los ajustes y configuraciones de las variables involucradas en la receta de pulido afectan el resultado sobre la superficie de las obleas. Esta caracterización se llevó a cabo mediante una serie de pruebas experimentales realizadas utilizando la herramienta Alpsitec E460, que permitió configurar las condiciones del proceso. A lo largo de los experimentos realizados, se llevaron a cabo diversas combinaciones de parámetros para determinar su impacto en el resultado final del CMP. Uno de los hallazgos clave de este estudio fue que los parámetros ajustables, como la presión entre la oblea y el pad (WP), la velocidad del *carrier* (CS) y la velocidad del pad (PS), tienen una influencia significativa en la tasa de pulido de material y en la uniformidad de la oblea. La uniformidad de la oblea se evaluó mediante la desviación estándar de los espesores obtenidos en cada prueba, lo que permitió una evaluación de la consistencia del pulido. Estas métricas son cruciales para garantizar la calidad y el rendimiento de los dispositivos fabricados a partir de estas obleas. Los resultados que arrojaron un mejor resultado en términos de uniformidad se obtuvieron igualando la velocidad del *carrier* (CS) y la velocidad del plato (PS).

Además de los parámetros principales, se identificaron otros factores que afectan los resultados del proceso de CMP. Entre estos factores se encuentran el tipo de *pad* utilizado y la composición del *slurry*. En particular, se observó que el *slurry* basado en partículas de ceria mostró una mayor selectividad para las obleas de SiO_2 en comparación con las de Si_3N_4 . Esto se traduce en una tasa de pulido significativamente mayor para las obleas de SiO_2 , lo que resalta la importancia de elegir el *slurry* adecuado en función del material a pulir. La evaluación de la topografía de las obleas, tanto antes como después del proceso de CMP, se realizó mediante la técnica de caracterización de AFM, la cual permitió medir la rugosidad de la superficie con alta precisión. Los resultados obtenidos mostraron rugosidades inferiores a 0.2 nm, indicando que el proceso de CMP puede alcanzar superficies excepcionalmente uniformes. Lograr superficies de obleas uniformes bajo condiciones controladas es fundamental para aplicaciones que requieren alta precisión en la planarización de la superficie. Esto es especialmente relevante en la fabricación de dispositivos integrados fotónicos, donde pequeñas irregularidades pueden afectar el rendimiento del dispositivo final. Dentro de esta investigación también se menciona la importancia de una limpieza eficiente de la superficie de la oblea posterior al proceso de pulido. Una limpieza adecuada es esencial para eliminar cualquier residuo o contaminante que pueda causar defectos en la oblea, garantizando así la calidad y el rendimiento óptimo del dispositivo final. En conclusión, los resultados de este estudio han permitido una caracterización del proceso de CMP, seleccionando adecuadamente los ajustes en los parámetros de pulido.

Esto contribuye a mejorar la calidad y la uniformidad de las obleas, lo que es crucial para el desarrollo de dispositivos de alta precisión y rendimiento.

8. Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mis asesores académicos, Daniel Pastor Abellán e Isabelle Rodriguez, por el invaluable apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de fin de máster. Su dedicación, conocimiento y tiempo compartido fueron fundamentales para completar este proyecto. Gracias a mi colega, Adrián Fernández, quien fue mi mentor dentro de la sala blanca, enseñándome a utilizar los distintos equipos de proceso y caracterización del CMP, por su compañerismo, generosidad y disposición a colaborar en todo momento. Asimismo, agradezco a UPV Fab y a su director, Pascual Muñoz, por ofrecer el apoyo y el entorno de trabajo que hicieron posible la realización de esta investigación. Finalmente, extendiendo mi gratitud a los proyectos que participaron y contribuyeron al desarrollo de este trabajo:

Nombre del proyecto: External Cavity Laser Hybrid Photonic Integrated Circuit.

Referencia: PID2022-139447NB-I00.

Entidad Financiadora: Agencia Estatal de Investigación.

Fecha de inicio: 01/09/2023.

Duración: 3 años - 11 meses .

Nombre del proyecto: Integración híbrida en chip óptico de semiconductor III-V y Silicio para un sistema de imagen hiperespectral.

Referencia: TED2021-132584B-C21.

Entidad Financiadora: Agencia Estatal de Investigación.

Fecha de inicio: 01/12/2022.

Duración: 1 año - 11 meses.

Nombre del proyecto: Plataforma de fotónica integrada en nitruro de silicio para aplicaciones cuánticas en el infrarrojo medio.

Referencia: COMCUANTICA/002.

Entidad Financiadora: GENERALITAT VALENCIANA.

Fecha de inicio: 01/01/2021.

Duración: 4 años - 8 meses.

Referencias

- [1] R. Osgood and X. Meng, “Principles of photonic integrated circuits.” *Graduate Texts in Physics*, 2021.
- [2] K. Amsalu and S. Palani, “A review on photonics and its applications,” in *Materials Today: Proceedings*, vol. 33. Elsevier Ltd, 2020, pp. 3372–3377.

- [3] D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers, T. Komljenovic, G. T. Reed, L. Vivien, D. Marris-Morini, E. Cassan, L. Viot, J. M. Fédéli, J. M. Hartmann, J. H. Schmid, D. X. Xu, F. Boeuf, P. O'Brien, G. Z. Mashanovich, and M. Nedeljkovic, "Roadmap on silicon photonics," *Journal of Optics (United Kingdom)*, vol. 18, 2016.
- [4] "Integrated photonics — transitioning to end-to-end optical i/o." [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/research/integrated-photonics.html>
- [5] D. Inniss and R. Rubenstein, "Silicon photonics. fueling the next information revolution," *Silicon Photonics*, pp. 1–19, 2017. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128029756000016>
- [6] I. International, "2020 integrated photonic systems roadmap - international (ipsr-i) enabling technologies," 2020.
- [7] J. Plummer and M. D. Deal, "Silicon vlsi technology: Fundamentals, practice and modeling," 2000. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/230823028>
- [8] "The fabrication process inside a photonic foundry." [Online]. Available: <https://effectphotonics.com/insights/the-fabrication-process-inside-a-photonic-foundry/>
- [9] R. J. Molines, "Evaluation of chemical mechanical planarization capability of titan™ wafer carrier on silicon oxide," *Master Thesis. Royal Institute of Technology (KTH)*, 2017.
- [10] S. Babu, "Advances in chemical mechanical planarization (cmp)," *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*, 2022.
- [11] B. Davari, C. Koburger, R. Schulz, J. D. Warnock, T. Furukawa, M. Jost, Y. Taur, W. Schwittek, J. Debrosse, M. Kerbaugh, and J. L. Mauer, "A new planarization technique, using a combination of rie and chemical mechanical polish (cmp)," 1989.
- [12] D. Zhao and X. Lu, "Chemical mechanical polishing: Theory and experiment," *Friction*, vol. 1, pp. 306–326, 2013.
- [13] M. Krishnan, J. W. Nalaskowski, and L. M. Cook, "Chemical mechanical planarization: Slurry chemistry, materials, and mechanisms," *Chemical Reviews*, vol. 110, pp. 178–204, 2010.
- [14] J. Seo, "A review on chemical and mechanical phenomena at the wafer interface during chemical mechanical planarization," *Journal of Materials Research*, vol. 36, pp. 235–257, 2021.
- [15] S. H. Li and R. O. Miller, "Chemical mechanical polishing in silicon processing," *Semiconductors and Semimetals*, 1999.

- [16] M. R. Oliver, “Chemical-mechanical planarization of semiconductor materials.” *Springer Series in Materials Science*, 2004.
- [17] H. Lee, B. Park, and H. Jeong, “Influence of slurry components on uniformity in copper chemical mechanical planarization,” *Microelectronic Engineering*, vol. 85, pp. 689–696, 2008.
- [18] M. Keilen, “Investigation of chemical mechanical polishing to enhance feature resolution by atomic layer deposition,” *Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology*, 2020.
- [19] B. Mullany and G. Byrne, “The effect of slurry viscosity on chemical–mechanical polishing of silicon wafers,” *Materials Processing Technology*, vol. 132, pp. 28–34, 2003.
- [20] F.-C. Chang, S. Tanawade, and R. K. Singh, “Effects of stress-induced particle agglomeration on defectivity during {CMP} of low-k dielectrics,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 156, pp. 39–42, 2009.
- [21] S. P. Lo, Y. Y. Lin, and J. C. Huang, “Analysis of retaining ring using finite element simulation in chemical mechanical polishing process,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, pp. 547–555, 2007.
- [22] J. Steigerwald, S. Murarka, and R. Gutmann, “Chemical mechanical planarization of microelectronic materials.” [Online]. Available: <http://dnb.ddb.de>
- [23] M. Forsberg, “Chemical mechanical polishing of silicon and silicon dioxide in front end processing,” *Master Thesis. Acta Universitatis Upsaliensis*, 2004.
- [24] Z. Stavreva, D. Zeidler, M. Plötner, and K. Drescher, “Characteristics in chemical-mechanical polishing of copper: comparison of polishing pads,” *Applied Surface Science*, vol. 108, pp. 39–44, 1997.
- [25] D. Ouma, D. Boning, J. Chung, G. Shim, L. Olsen, and J. Clark, “An integrated characterization and modeling methodology for cmp dielectric planarization,” *International Interconnect Technology Conference (IITC)*, pp. 67–69, 1998.
- [26] K. Park, J. Oh, and H. Jeong, “Pad characterization and experimental analysis of pad wear effect on material removal uniformity in chemical mechanical polishing,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, pp. 7812–7817, 2008.
- [27] Y. Yamada, M. Kawakubo, O. Hirai, N. Konishi, S. Kurokawa, and T. Doi, “Frictional characterization of chemical-mechanical polishing pad surface and diamond conditioner wear,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, pp. 6282–6287, 2008.
- [28] Y. Y. Lin, “Influence of a retaining ring on strain and stress in the chemical mechanical polishing process,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 871–878, 2007.

- [29] M. Keswani and Z. Han, “Post-cmp cleaning,” *Developments in Surface Contamination and Cleaning*, pp. 145–183, 2015. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323299619000041>
- [30] Y. Chen, K. Mikhaylichenko, B. Brown, and F. Redeker, “Post-cmp cleaning,” *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology*, pp. 253–301, 2018.
- [31] M. Hubert and P. Pfeiffer, “Photonic damascene process for integrated high q microresonator based nonlinear photonic devices,” *Doctoral Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, 2018.
- [32] T. Y. Kwon, M. Ramachandran, and J. G. Park, “Scratch formation and its mechanism in chemical mechanical planarization (cmp),” *Friction*, vol. 1, pp. 279–305, 2013.
- [33] “Home - upvfab.” [Online]. Available: <https://www.fab.upv.es/>
- [34] Horiba, “Spectroscopic ellipsometry user guide.”
- [35] “What is atomic force microscopy and other afm faqs — bruker.” [Online]. Available: <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/microscopes/materials-afm/faq.html>
- [36] “Familia zeiss sigma: Sem de emisión de campo.” [Online]. Available: <https://www.zeiss.com/microscopy/es/productos/sem-fib-sem/sem/sigma.html>
- [37] R. Yates and D. Goodman, *Probability and Stochastic Processes*, 2005. [Online]. Available: <http://www.wiley.com/college/yates>