



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ELECTRODO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE SENSORES FOTÓNICOS DE SILICIO POROSO

AUTOR: PAULA BALAGUER GARÍN

TUTOR: ALEJANDRO JOSÉ MARTÍNEZ ABIETAR

COTUTOR: JAIME GARCÍA RUPÉREZ

Curso Académico: 2019-20

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar la ocasión para agradecer a mis tutores la posibilidad que me ofrecieron de poder realizar el Trabajo Fin de Grado en un centro de investigación tan relevante como el Instituto de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València. En especial a Jaime por la supervisión continua y la orientación sobre el presente trabajo que me ha proporcionado durante estos meses. Además, de haber resuelto todas las dudas que se me han planteado y de motivarme a seguir aprendiendo.

Por otra parte, quiero agradecer tanto a mi familia como a mis amigos por todo el apoyo constante que me han brindado, no solo durante el periodo de realización de este proyecto, sino durante mi vida académica.

Resumen

El silicio poroso es un material nanoestructurado ampliamente estudiado que despierta un gran interés en múltiples aplicaciones, incluido el desarrollo de sensores fotónicos. Uno de los ámbitos donde presenta un futuro más prometedor es en el de la biomedicina debido a propiedades como la biocompatibilidad, biodegradabilidad y la elevada superficie específica disponible para el reconocimiento entre el receptor y el analito.

Dicho material se puede obtener mediante distintos métodos de fabricación como el ataque electroquímico. Sin embargo, este proceso se encuentra sujeto a una gran variedad de parámetros que influyen en cómo de homogéneo es el ataque sobre la oblea de silicio y cómo van a resultar las estructuras porosas fabricadas en esta.

Dependiendo de las condiciones del ataque realizado (concentración del electrolito, densidad de corriente o resistividad de la oblea, entre otros) es posible controlar la porosidad, el tamaño de los poros y la velocidad de ataque. Para fabricar sensores que realmente tengan una aplicación práctica, será necesario disponer de un proceso de fabricación que sea controlado y repetible, de forma que siempre proporcione resultados con una respuesta conocida. Uno de los aspectos fundamentales para obtener un ataque uniforme es que la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio en el proceso de fabricación sea lo más homogénea posible.

En consecuencia, el presente trabajo fin de grado se centrará en estudiar el perfil de densidad de corriente obtenido en función de la geometría, imperfecciones, distancia, etc. del electrodo utilizado, de forma que se pueda asegurar un ataque homogéneo de la oblea de silicio utilizada. Dichos estudios se realizarán mediante distintas simulaciones a través del software COMSOL Multiphysics.

Palabras Clave: Silicio poroso; Ataque electroquímico; Electrodo; COMSOL Multiphysics

Resum

El silici porós és un material nanoestructurat àmpliament estudiat que desperta un gran interès en múltiples aplicacions, inclòs el desenvolupament de sensors fotònics. Un dels àmbits on presenta un futur més prometedor és en el de la biomedicina a causa de propietats com la biocompatibilitat, la biodegradabilitat i una elevada superfície específica disponible per al reconeixement entre el receptor i l'analit.

Aquest material es pot obtenir mitjançant diversos mètodes com l'atac electroquímic. No obstant això, aquest procés es troba subjecte a una gran varietat de paràmetres que influeixen en com d'homogeni és l'atac sobre l'òbvia de silici i com van a resultar les estructures poroses fabricades en aquesta.

Depenent de les condicions de l'atac realitzat (concentració de l'electròlit, densitat de corrent o resistivitat de l'òbvia, entre altres) és possible controlar la porositat, la mida dels porus i la velocitat d'atac. Per obtenir sensors que realment tinguen una aplicació pràctica, serà necessari disposar d'un procés de fabricació que siga controlat i repetible, de manera que sempre proporcione resultats amb una resposta coneguda. Un dels aspectes fonamentals per aconseguir un atac uniforme és que la distribució de la densitat de corrent en la superfície de l'òbvia de silici en el procés de fabricació siga el més homogènia possible.

En conseqüència, el present treball fi de grau es centrarà en estudiar el perfil de densitat de corrent obtingut en funció de la geometria, imperfeccions, distància, etc. de l'elèctrode utilitzat, de manera que es pugui assegurar un atac homogeni de l'òbvia de silici utilitzada. Aquests estudis es realitzaran mitjançant diferents simulacions a través del software COMSOL Multiphysics.

Paraules clau: Silici porós; Atac electroquímic; Elèctrode; COMSOL Multiphysics

Abstract

Porous silicon is a widely studied nanostructured material that sparks tremendous interest in multiple applications, including the development of photonic sensors. One of the fields where it has a more promising future is in biomedicine due to properties such as biocompatibility, biodegradability and high specific surface available for recognition between the receptor and the analyte.

This material can be obtained by different manufacturing methods such as electrochemical etching. However, this process is subject to a wide variety of parameters that influence how homogeneous the etching on the silicon wafer is and how the porous structures manufactured in it will be.

Depending on the conditions of the etching carried out (electrolyte concentration, current density, wafer resistivity, etc.) it is possible to control the porosity, the size of the pores and the etching speed. In order to obtain sensors that really have practical application, it will be necessary to have a manufacturing process that is controlled and repeatable, so that it always provides results with a known response. One of the fundamental aspects to obtain a uniform etching is that the distribution of the current density on the surface of the silicon wafer in the manufacturing process is as homogeneous as possible.

Consequently, this final degree project will focus on studying the current density profile obtained as a function of geometry, imperfections, distance, etc. of the electrode used, so that a homogeneous etching of the silicon wafer used can be ensured. These studies will be carried out by doing different simulations using the COMSOL Multiphysics software.

Keywords: Porous silicon; Electrochemical etching; Electrode; COMSOL Multiphysics

Índice general

Resumen	III
Índice general	XI
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XXI
Índice de ecuaciones	XXIII
I Memoria	1
1. Introducción	3
1.1. Motivación y justificación	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Metodología	5
1.4. Estructura	5
2. Estado del arte	7
2.1. Introducción	7
2.2. Historia	8
2.3. Silicio Poroso	8
2.3.1. Métodos de fabricación	9
2.3.2. Formación de poros	9
2.3.2.1. Clasificación	11
2.3.3. Proceso de fabricación	11
2.3.4. Parámetros fundamentales	12
2.4. Biosensor	13
2.4.1. Óptico	14
3. Definición del modelo	15
3.1. Introducción	15
3.2. Geometría	16
3.2.1. Electrodo	17
3.2.1.1. Espiral	17
3.2.1.2. Malla	19
3.2.2. Electrolito	20
3.2.3. Oblea de silicio	20

3.2.4. Conjunto	21
3.3. Estudio	21
3.3.1. Geometría	22
3.3.2. Materiales	22
3.3.2.1. Platino	23
3.3.2.2. Disolución electrolítica	23
3.3.2.3. Silicio	24
3.3.3. Corrientes eléctricas (ec)	24
3.3.3.1. Conservación de corriente	25
3.3.3.2. Aislamiento eléctrico	25
3.3.3.3. Valores iniciales	25
3.3.3.4. Tierra	25
3.3.3.5. Potencial eléctrico	25
3.3.4. Mallado	26
4. Resultados de los estudios	29
4.1. Introducción	29
4.2. Geometría del electrodo	29
4.3. Tamaño del electrodo	33
4.3.1. Mayor	34
4.3.2. Menor	37
4.4. Posición del electrodo	41
4.5. Distancia entre el electrodo y la oblea de silicio	46
4.6. Resistividad que presenta la oblea de silicio	54
4.7. Tipo de oblea de silicio	56
5. Propuesta	59
5.1. Introducción	59
5.2. Estudio	60
5.2.1. Especificaciones	60
5.2.2. Resultados	61
6. Conclusiones y trabajos futuros	65
6.1. Conclusiones	65
6.2. Trabajos futuros	66
II Presupuesto	67
7. Presupuesto	69
7.1. Necesidad del presupuesto	69
7.2. Estructura	69
7.3. Cuadro de precios	69
7.4. Cuadro de precios unitarios	71
7.5. Cuadro de precios descompuestos	71
7.6. Presupuesto parcial	74
7.7. Presupuesto de ejecución, por contrata y base de licitación	74

Índice de figuras

2.1. Cambio de propiedades en el silicio y en el silicio poroso [14]	8
2.2. Mecanismo de reacción para la formación de estructuras porosas en silicio [14]. . .	10
2.3. Curva característica corriente-tensión (I-V) de una oblea de silicio tipo p [19][6]. .	10
2.4. Figura de la izquierda: esquema de una celda electroquímica vertical. Figura de la derecha: fotografía de una celda electroquímica real [9].	11
2.5. Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo puntual (hilo de platino de radio 0.3mm).	12
2.6. Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo en forma de espiral.	12
2.7. Esquema de los elementos de un biosensor [26].	13
2.8. Esquemas y espectros de las estructuras más comunes de biosensores ópticos de PS: (a) Capa única, (b) Reflector de Bragg, (c) Microcavidad,(d) Filtro rugado, (e) Guía de onda plana acoplada a rejilla y (f) Anillo resonador [7].	14
3.1. Esquema 2D de la geometría de la simulación del ataque electroquímico que se va a emplear en el presente trabajo.	16
3.2. Geometría del electrodo de espiral de hilo de platino de radio de 0.2 mm, 7 revoluciones y un paso de rosca de 0.4mm.	17
3.3. Especificaciones de la geometría del electrodo de espiral de un hilo de platino de radio de 0.2 mm, 7 revoluciones y un paso de rosca de 0.4mm.	17
3.4. Geometría del electrodo de espiral de hilo de platino de radio de 0.2 mm, 10 revoluciones y un paso de rosca de 0.3mm.	18
3.5. Especificaciones de la geometría del electrodo de espiral de hilo de platino de un radio de 0.2 mm, 10 revoluciones y un paso de rosca de 0.3mm.	18
3.6. Geometría del electrodo de espiral de radio de 0.2 mm, 3 revoluciones y un paso de rosca de 0.8mm.	18
3.7. Especificaciones de la geometría del electrodo de espiral de un radio de 0.2 mm, 3 revoluciones y un paso de rosca de 0.8mm.	18
3.8. Geometría del electrodo de malla de hilo de platino de forma global y patrón cuadrados.	19
3.9. Geometría del electrodo de malla de hilo de platino de forma global cilíndrica y patrón cuadrado.	19
3.10. Geometría del electrodo de malla de hilo de platino de forma global y patrón cilíndricos.	20
3.11. Geometría del dominio del electrolito (10mm x 10mm x 5mm).	20
3.12. Geometría de la oblea de silicio.	21

3.13. Geometría en 3D del conjunto del modelo que se emplea para simular el ataque electroquímico.	21
3.14. Propiedades del material Pt-Platinum.	23
3.15. Propiedades de la disolución electrolítica.	23
3.16. Propiedades del material p-Silicon (single-crystal, lightly doped).	24
3.17. Parámetros referentes al tamaño de los elementos del mallado.	26
3.18. Mallado de la geometría global.	26
3.19. Vista superior del mallado global.	27
4.1. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones.	30
4.2. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones.	30
4.3. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones.	31
4.4. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas.	31
4.5. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada.	31
4.6. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas.	31
4.7. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de las distintas geometrías de los electrodos.	33
4.8. Geometría global cuando el electrodo ocupa toda la superficie superior del bloque del electrolito.	34
4.9. Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo de tamaño superior a la superficie del contorno superior del electrolito.	35
4.10. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando el tamaño se aumenta.	36
4.11. Geometría global cuando el electrodo en forma de espiral de 3 revoluciones ocupa toda la superficie superior del bloque del electrolito.	37
4.12. Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo de tamaño inferior al original.	38
4.13. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones de tamaño inferior al original.	38
4.14. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones de tamaño inferior al original.	38
4.15. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones de tamaño inferior al original.	39

4.16. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas de tamaño inferior al original.	39
4.17. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada de tamaño inferior al original.	39
4.18. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas de tamaño inferior al original.	39
4.19. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando el tamaño disminuye a 1/4 del original.	40
4.20. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espira de 7 revoluciones posicionado en un lateral.	41
4.21. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espira de 10 revoluciones posicionado en un lateral.	41
4.22. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espira de 3 revoluciones posicionado en un lateral.	42
4.23. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas posicionado en un lateral.	42
4.24. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada posicionado en un lateral.	42
4.25. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas posicionado en un lateral.	42
4.26. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando se posicionan en un lateral.	43
4.27. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones desplazado ligeramente a un lateral.	44
4.28. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones desplazado ligeramente a un lateral.	44
4.29. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones desplazado ligeramente a un lateral.	44
4.30. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas desplazado ligeramente a un lateral.	44
4.31. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadradas desplazado ligeramente a un lateral.	45
4.32. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas desplazado ligeramente a un lateral.	45

4.33. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando se posicionan ligeramente hacia un lateral.	45
4.34. Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 1.5mm.	47
4.35. Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 15mm.	47
4.36. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.	48
4.37. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.	48
4.38. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.	48
4.39. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.	48
4.40. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una una espiral de 3 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.	49
4.41. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.	49
4.42. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.	49
4.43. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.	49
4.44. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.	50
4.45. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.	50
4.46. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.	50
4.47. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.	50

4.48. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 15mm.	51
4.49. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 1,5mm.	52
4.50. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada a una distancia entre el cátodo y la oblea de 1.5mm y cuya posición esta desplazada ligermanete a un lateral.	54
4.51. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas a una distancia entre el cátodo y la oblea de 15mm y cuya posición esta desplazada ligermanete a un lateral.	54
4.52. Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuya resistividad es de $1\text{ m}\Omega \times \text{cm}$ y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.	55
4.53. Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuya resistividad es de $10\text{ m}\Omega \times \text{cm}$ y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.	55
4.54. Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuya resistividad es de $10\text{ }\Omega \times \text{cm}$ y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.	56
4.55. Propiedades del material n-Silicon (single-crystal, lightly doped).	57
4.56. Propiedades del material p-Silicon (single-crystal, lightly doped).	57
4.57. Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de n-silicio y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.	57
4.58. Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de p-silicio y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.	58
5.1. Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 10mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.5.	61
5.2. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 10mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.5	62
5.3. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 10mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.5.	62
5.4. Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 13mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.25.	62

5.5. Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 13mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.25.	63
5.6. Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 13mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.25.	63

Índice de tablas

4.1. Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio.	32
4.2. Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se emplean electrodos de tamaño elevado.	36
4.3. Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se emplean electrodos de tamaño menor.	40
4.4. Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando los electrodos se posicionan en un lateral.	43
4.5. Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando los electrodos se posicionan ligeramente hacia un lateral.	46
4.6. Factor de relación de homogeneidad de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se varía la distancia entre el electrodo y dicha oblea.	52
4.7. Valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se varía la distancia entre el electrodo y dicha oblea.	53
5.1. Elección de parámetros para el estudio propuesto.	60
7.1. Cuadro de precios de la mano de obra.	70
7.2. Cuadro de precios de los materiales y softwares.	70
7.3. Cuadro de precios de la maquinaria.	70
7.4. Capítulo 1. Planificación del proyecto e investigación del estado de arte.	71
7.5. Capítulo 2. Desarrollo del modelo y realización de simulaciones.	71
7.6. Capítulo 3. Redacción y defensa del Trabajo Fin de Grado.	71
7.7. C1.UO1. Reunión para definir el proyecto.	71
7.8. C1.UO2. Búsqueda bibliográfica del estado del arte.	72
7.9. C2.UO1. Desarrollo y diseño del modelo.	72
7.10. C2.UO2. Simulaciones.	72
7.11. C3.UO1. Redacción de los documentos del trabajo.	73
7.12. C3.UO2. Revisión y corrección de errores.	73
7.13. C3.UO3. Preparación de la defensa.	73
7.14. Presupuesto parcial del Capítulo 1.	74
7.15. Presupuesto parcial del Capítulo 2.	74
7.16. Presupuesto parcial del Capítulo 3.	74
7.17. Presupuesto por capítulos.	74
7.18. Presupuesto de ejecución, por contrata y base de licitación.	75

Índice de ecuaciones

2.1. Reacción química de la disolución directa del silicio	9
2.2. Reacción química de la oxidación del silicio	9
2.3. Reacción química de la disolución del silicio	10
3.1. Ecuación temporal que rige el estudio	24
3.2. Aislamiento eléctrico	25
3.3. Potencial eléctrico	25
3.4. Potencial eléctrico del cátodo	25

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación y justificación

El presente documento expone la labor realizada para el trabajo de fin de grado “Estudio de la influencia del electrodo en el proceso de fabricación de sensores fotónicos de silicio poroso” de la titulación de Grado en Ingeniería Biomédica cursada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universitat Politècnica de València durante los años 2016-2020.

El proyecto consiste en la realización de un modelo y de distintas simulaciones variando algunos de los parámetros que intervienen e influyen en el proceso de fabricación de sensores fotónicos de silicio poroso mediante ataque electroquímico. A través de estos estudios, se permitirá validar la influencia de dichos parámetros en la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio que es atacada. Junto a ello, se creará una propuesta para determinar qué combinación de parámetros es la que permite obtener un ataque más homogéneo.

El trabajo surge a partir del creciente interés en el silicio poroso y en su aplicación como biosensor y la necesidad de crear un marco común que permita homogeneizar su proceso de fabricación ya que este depende de una gran variedad de factores.

El silicio poroso (PS) es un material nanoestructurado que presenta un gran interés en su aplicación en distintas áreas tales como la biomedicina, la optoelectrónica o la conversión de energía [1]. En este primer ámbito es interesante debido a que la geometría de las estructuras porosas se puede controlar, la superficie específica disponible para el reconocimiento es elevada y que es biocompatible y biodegradable. Estas características resultan relevantes en aplicaciones como la administración de fármacos, la inmunoterapia para tratar el cáncer o la biodetección [2][3].

Una de sus considerables ventajas en su uso como sensor óptico es que su índice de refracción se encuentra alterado cuando entra en contacto con alguna especie química extraña. Además, dependiendo de cual sea esta, el índice de refracción variará de una determinada manera. Dicho reconocimiento se lleva a cabo a través de las estructuras porosas del silicio. Esto se consigue ya que la superficie específica se puede funcionalizar a través de modificaciones químicas que, por

ejemplo, permite la unión entre receptores de distintos analitos, tales como proteínas, anticuerpos o enzimas, a la superficie interna de los poros [1][4][5].

Las estructuras porosas se pueden formar mediante distintos métodos de fabricación. El más ampliamente usado es la anodización. Esta se basa en un ataque electroquímico sobre la oblea de silicio mediante las reacciones producidas por el contacto entre un electrodo, normalmente de platino, con una disolución electrolítica, generalmente una mezcla de ácido fluorhídrico y agua. Sin embargo, este proceso depende de muchos factores que determinan en mayor o menor grado la homogeneidad del ataque y, por ello, la uniformidad de las estructuras porosas que se busca fabricar. Esta estandarización del proceso es esencial para potenciar el uso de este material a nivel comercial.

Como se menciona en la subsección 2.3.4 uno de estos parámetros fundamentales es el cátodo. Debido a esto, estudiar la influencia del electrodo en dicho proceso es imprescindible para poder determinar aquellas características que determinan en un mayor grado la homogeneidad del ataque. Junto con este, los otros componentes fundamentales del proceso de fabricación mediante anodización son el electrolito y la oblea de silicio.

En general, los estudios realizados en este campo han sido experimentales en laboratorios. Es por ello, que es interesante diseñar un modelo que simule el ataque electroquímico pero sin necesidad de desarrollar los distintos experimentos en un laboratorio. Esto supondría una reducción de recursos tanto económicos, humanos como temporales puesto que se podrían determinar de una manera más sencilla la combinación de parámetros a emplear dependiendo de cuál sea el objetivo del estudio.

Cabe destacar que en un primer momento el presente trabajo se iba a componer mayormente de parte experimental en el laboratorio pero debido a la situación actual provocada por el COVID-19 esta no ha sido posible. Es por ello, que los resultados expuestos han sido obtenidos a través de simulaciones realizadas mediante el software COMSOL Multiphysics.

1.2 Objetivos

Los objetivos que se pretenden conseguir son los siguientes:

- Diseño y desarrollo de un modelo que simule el proceso de fabricación del silicio poroso. Dicho modelo deberá cumplir con las especificaciones del ataque electroquímico y será fácilmente modificable para variar cualquier parte del mismo sin necesidad de alterar las restantes.
- Estudio del modelo variando aquellos factores de interés que afectan en el proceso de fabricación, analizando sus diferencias y semejanzas.
- Determinación de los parámetros fundamentales que influyen en mayor grado de forma positiva en la homogeneidad del proceso de fabricación.
- Obtención de una propuesta de estudio óptima. Dicha propuesta será compuesta por aquellos parámetros que se han comprobado que son más representativos en el ataque electroquímico.

1.3 Metodología

La correcta realización del presente trabajo recae en una buena metodología para poder llevarlo a cabo y conseguir un resultado óptimo. En primer lugar, es esencial realizar una exhausta búsqueda bibliográfica con la intención de comprender la problemática referente al proceso de fabricación del silicio poroso así como asimilar conceptos básicos relacionados con este y seleccionar los aspectos fundamentales para poder desarrollar los pasos posteriores.

A continuación, cuando se ha realizado dicha búsqueda se procede a diseñar y desarrollar el modelo que simula el método del proceso de fabricación del silicio poroso mediante el ataque electroquímico. Primeramente, se realizan propuestas teóricas y se selecciona la que se considera más apta para los estudios. Posteriormente, se procede a elaborarla a través de algún software que permita realizar geometrías en 3D.

En tercer lugar, se realiza un análisis de programas que permitan llevar a cabo las simulaciones necesarias para determinar qué parámetros influyen en un mayor grado en la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio durante el ataque y, por tanto, aquellos con los que se obtenga un ataque más homogéneo.

Finalmente, se procede a analizar y estudiar los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas variando distintos aspectos de los componentes fundamentales del proceso de fabricación. Además, se integran las conclusiones de estas para sugerir una propuesta de estudio con la que se obtenga un ataque homogéneo.

1.4 Estructura

A continuación se presentan los diferentes capítulos de los que se compone la memoria del trabajo de fin de grado.

- Capítulo 1. Introducción.
Presenta una breve introducción al trabajo de fin de grado y describe los diferentes objetivos y capítulos que lo componen, así como se presenta la metodología, la motivación y la justificación del trabajo.
- Capítulo 2. Estado del arte
Expone el estado del arte del proceso de fabricación del silicio poroso y de sus aplicaciones. Más concretamente se centra en el proceso de fabricación mediante ataque electroquímico y en el uso de dicho material como biosensor fotónico.
- Capítulo 3. Definición del modelo.
Describe la geometría y el estudio del modelo diseñado para simular el proceso de fabricación, especificando tanto las características de cada componente como de la estructura global.
- Capítulo 4. Resultados de los estudios.
A partir del modelo identificado, se diseñan distintos supuestos de estudios variando: la geometría del electrodo, el tamaño del electrodo, la posición de este, la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio, la resistividad de la oblea empleada así como el tipo de oblea dependiendo del dopado.

- Capítulo 5. Propuesta de estudio.
Determina, con la información obtenida tras las simulaciones, cuál sería en principio la combinación más óptima para que la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea del silicio fuera homogénea.
- Capítulo 6. Conclusiones y trabajos futuros.
Con todos los resultados obtenidos en los diferentes capítulos, se analizan y se presentan posibles futuros trabajos que permitan comprobar experimentalmente estos así como posibles mejoras en el modelo empleado.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Introducción

El silicio poroso (PS) es uno de los materiales que ha captado más la atención en los últimos años para su aplicación como biosensor. Esto se debe a que al reducir el silicio a un material de tamaño nanométrico presenta características muy interesantes tales como la facilidad de fabricación, propiedades físicas y ópticas especiales, adaptabilidad de la estructura morfológica a medida y posible mejora de la superficie mediante reacciones químicas [6].

Además, otras propiedades que presenta son la compatibilidad con la tecnología convencional del procesamiento de silicio o la gran superficie interna (hasta $800 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) que resulta esencial para albergar las moléculas y las interacciones y reconocimientos que deben ocurrir en el interior de las estructuras porosas para la detección de especies químicas [7].

El principio sobre el que se basa es que cuando se produce la adsorción de moléculas químicas o biológicas en los poros, las distintas propiedades eléctricas y/o ópticas del material se modifican. En consecuencia, es posible realizar una medición sensible y adecuada a dicho cambio [6]. En el caso de los sensores ópticos esta variación se detecta debido a la alteración que se produce en el índice de refracción. Dependiendo de la manera en la que se altere dicho índice se puede determinar qué reconocimiento se ha producido, es decir, la unión de qué molécula sobre el receptor ha sucedido.

2.2 Historia

El PS fue descubierto en el 1956 por Arthur e Ingeborg Uhlir mientras estaban realizando unos estudios sobre el electropulido del silicio en soluciones de agua y ácido fluorhídrico (HF) [8]. En este estudio se dieron cuenta que se obtenían distintos depósitos de colores (negro, marrón y rojo) en el esqueleto del silicio. No obstante, se pensó que estos depósitos eran producidos por alguna clase de subóxidos de silicio.

En la década de los noventa fue cuando se empezaron a realizar estudios para determinar sus propiedades, su morfología y sus parámetros de fabricación [9]. Debido a esto, actualmente se tiene un gran conocimiento de dicho material [10].

A finales de esta década es cuando aparecieron las primeras aplicaciones del silicio poroso en el campo de la biomedicina después de demostrarse que era un material biocompatible. Así, en los estudios se inmovilizaron anticuerpos para estudiar y analizar distintas propiedades como la estabilidad [11][12][13].

Sin embargo, debido a que el proceso de fabricación es muy sensible a ligeras variaciones y a una considerable cantidad de parámetros todavía no se ha podido explotar comercialmente su uso.

2.3 Silicio Poroso

Las propiedades de un material puro son bastante diferentes a las de un material con una nanoestructura. Esto se debe a que al reducir el tamaño de un material puede conllevar cambios estructurales que afectan a las propiedades de este y que hacen que sea adecuado para distintas aplicaciones que, en un inicio, como material puro no lo era (figura 2.1) [14].

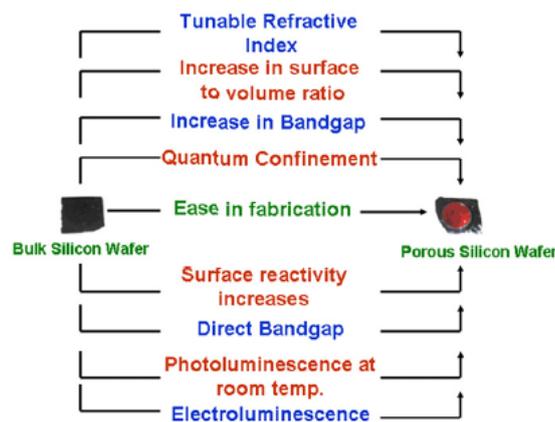


Figura 2.1: Cambio de propiedades en el silicio y en el silicio poroso [14]

El silicio es un material que presenta muy buenas prestaciones como material puro pero estas se encuentran modificadas cuando se disminuye a tamaño nanométrico. Sin embargo, es entonces cuando sus propiedades son óptimas para su aplicación como biosensor. Tal y como se ha mencionado anteriormente, una de las aplicaciones más prometedoras del silicio poroso es en el campo de la biomedicina para realizar acciones como la administración de fármacos o la inmunoterapia contra el cáncer [2][3].

2.3.1 Métodos de fabricación

El silicio poroso es un material nanoestructurado que se puede obtener mediante distintos métodos para su fabricación tales como el procedimiento físico, fisicoquímico, químico y electroquímico [6][15]. No obstante, hay dos métodos más ampliamente usados. Estos son la anodización y el grabado litográfico.

El presente trabajo se centra en el proceso de fabricación del silicio poroso mediante la anodización. Se ha elegido esta técnica debido a que ha sido ampliamente estudiada y empleada. Además, es relativamente sencilla de llevar a cabo tanto porque consta de un único proceso como por el equipamiento básico necesario.

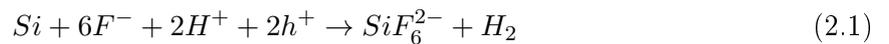
La anodización es un ataque electroquímico en el que mediante la aplicación de un campo eléctrico se hace reaccionar la oblea de silicio con un electrolito. El objetivo es intentar extraer un átomo de la red cristalina del silicio. Para conseguirlo es necesario que el electrolito presente un alto poder de reducción. De este modo, podrá formar un compuesto con el silicio y, en consecuencia, habrá extraído un átomo de la oblea.

Para poder disolver el silicio con una mayor facilidad se emplean baños electrolíticos basados en disoluciones de agua y fluoruro de hidrógeno para obtener ácido fluorhídrico. Se usa el flúor ya que es el elemento más electronegativo y, en consecuencia, esta disolución será más sencilla [16].

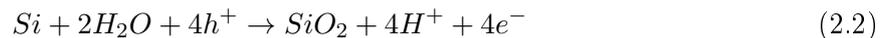
2.3.2 Formación de poros

Durante el ataque electroquímico se producen dos procesos de formación de poros simultáneos [17]. Estos son la disolución directa del silicio y la oxidación del silicio y disolución.

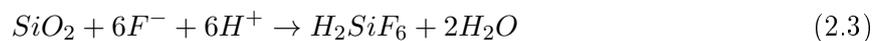
Por una parte, la disolución directa del silicio (ecuación 2.1 y figura 2.2) se produce cuando existen cargas libres, h^+ , que desencadenen que el flúor y el silicio reaccionen. En este caso el silicio se disuelve directamente. El producto que se obtiene en esta reacción se disuelve en la disolución electrolítica y se libera hidrógeno en estado gaseoso.



Por otra parte, la oxidación del silicio y disolución consta de dos fases. En primer lugar, se produce la oxidación del silicio (ecuación 2.2) debido a la presencia de oxígeno. Este proviene principalmente del agua que junto al fluoruro de hidrógeno forman el ácido fluorhídrico que actúa como electrolito.



En segundo lugar, el óxido formado que se encuentra en la superficie de la oblea reacciona con el flúor de la disolución electrolítica y que no había participado en la disolución del silicio (ecuación 2.3).



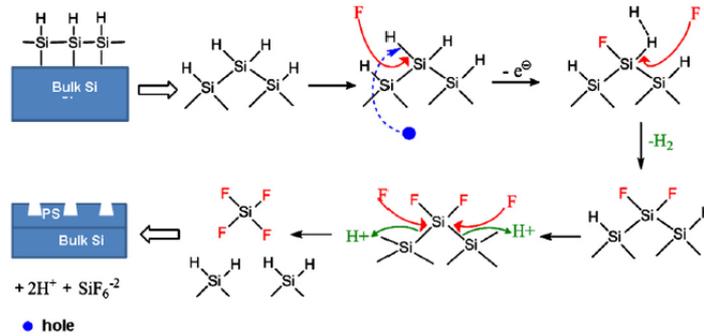


Figura 2.2: Mecanismo de reacción para la formación de estructuras porosas en silicio [14].

La porosidad es la fracción de volumen total que se encuentra vacío respecto al volumen de silicio inicial, esta puede variar desde el 1 % al 99 % [18]. Uno de los factores de los que esta depende es de la diferencia de potencial que se esté aplicando durante el proceso de fabricación ya que conforme este aumenta, la facilidad con la que van a extraer los átomos de la red cristalina del silicio también lo va a hacer. Dicha relación se puede apreciar en la figura 2.3.

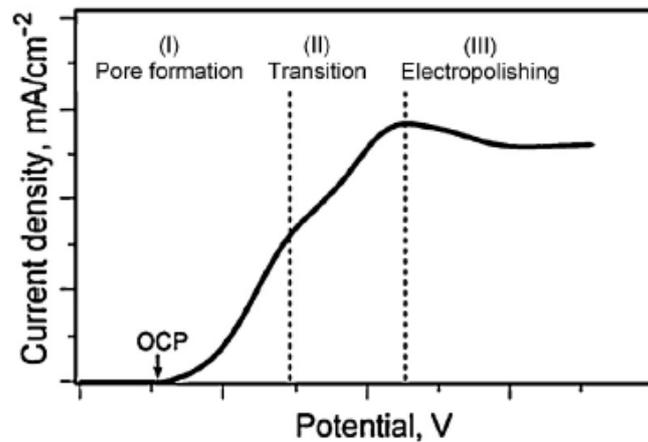


Figura 2.3: Curva característica corriente-tensión (I-V) de una oblea de silicio tipo p [19][6].

Las obleas de silicio que se emplean en el proceso de fabricación del silicio poroso pueden estar dopadas positivamente o negativamente. Estas primeras serían las que están dopadas con iones que contienen cargas positivas (huecos) y las segundas están dopadas con cargas negativas (electrones) [9]. En ambos tipos se pueden realizar estructuras porosas pero hay que tener presente que en las reacciones del ataque electroquímico las cargas necesarias son positivas. Es por ello que si se emplean obleas de silicio tipo n se debe iluminar la cara posterior de la oblea para obtener suficientes huecos para que se puedan llevar a cabo las reacciones del ataque. Además, dependiendo del tipo de oblea es más probable que se consigan unas estructuras porosas determinadas.

2.3.2.1 Clasificación

Los poros y las capas que se forman en la oblea de silicio pueden presentar una morfología distinta dependiendo de los parámetros, tipo de oblea y de las condiciones que se empleen durante el proceso de fabricación. Las principales formas son cilíndrica, piramidal, de sección cuadrada o de embudo [20].

En general, la clasificación que se suele emplear es dependiendo del tamaño del poro medio. Según estas las capas de PS que se formen pueden ser [1][6]:

- Microporos: $\leq 5nm$
- Mesoporos: $5 - 50nm$
- Macroporos: $\geq 50nm$

Uno de los factores que influyen en el tamaño del poro es la densidad de corriente que se aplica al electrodo. Cuanto mayor sea la corriente, se obtienen poros de un diámetro mayor [6]. Esto se debe a que como se observa en la figura 2.3 si la densidad de corriente aumenta, favorece el pulido de la oblea creando poros mayores. Además, la aplicación de corriente constante favorece el control sobre el tamaño de los poros y de las capas que se forman [21].

2.3.3 Proceso de fabricación

El ataque electroquímico es un proceso de fabricación de silicio poroso relativamente sencillo de llevar a cabo. Este se realiza en una celda electroquímica que suele estar fabricada de teflón [8], ya que es un material resistente al ácido fluorhídrico que se emplea como electrolito, y debe poder sellarse herméticamente. Además, se introduce un cátodo en el baño electrolítico y se usa la propia oblea de silicio como ánodo.

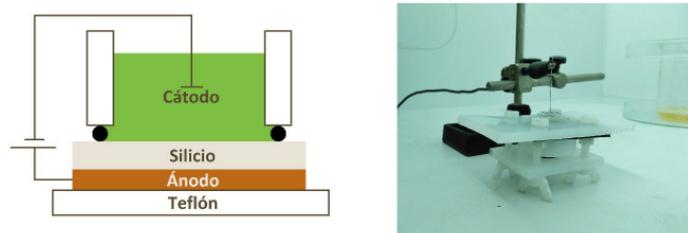


Figura 2.4: Figura de la izquierda: esquema de una celda electroquímica vertical. Figura de la derecha: fotografía de una celda electroquímica real [9].

Existen distintos tipos de celdas electroquímicas dependiendo del grado de automatización y la cantidad de parámetros que se quieran controlar durante el proceso de fabricación [9].

Por otra parte, otro material fundamental es el generador y suministrador de potencial. Con este se genera el campo eléctrico necesario para poder desencadenar las reacciones necesarias para el ataque electroquímico.

2.3.4 Parámetros fundamentales

A la hora de realizar el proceso de fabricación del silicio poroso hay cinco parámetros fundamentales a tener en cuenta [9]. Dichos parámetros son los que van a determinar las propiedades de la estructura que se obtenga:

- Concentración de ácido fluorhídrico (HF): con altas concentraciones de HF se consiguen poros más pequeños pero en mayor cantidad. En cambio, a más bajas concentraciones se obtiene una menor cantidad de poros pero con un tamaño mayor.
- Densidad de corriente: una mayor densidad de corriente crea estructuras con mayor porosidad. En contraposición, concentraciones muy bajas de HF disminuyen la densidad de corriente y favorece la interconexión de los poros.
- Velocidad de ataque: depende de la densidad de corriente y determina el tiempo de ataque.
- Dopado de la oblea de silicio: hay que tener en cuenta la resistividad de la oblea. El grado de dopado y la resistividad son inversamente proporcionales, es decir, una oblea fuertemente dopada presentará una resistividad menor.
- Cátodo: idealmente el campo eléctrico debería ser uniforme en toda la superficie del silicio. Hay que tener en cuenta la forma que este presente ya que, por ejemplo, los cátodos con forma de espiral o planos ofrecen una mayor uniformidad que los cátodos puntuales (figura 2.5 y figura 2.6). Es por ello que el presente trabajo se centra en estudiar la influencia de este parámetro en el proceso de fabricación.

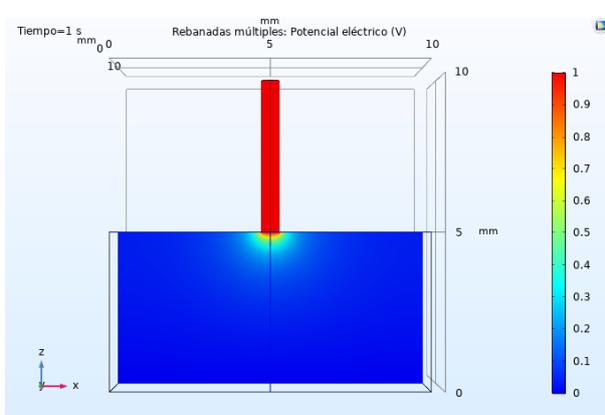


Figura 2.5: Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo puntual (hilo de platino de radio 0.3mm).

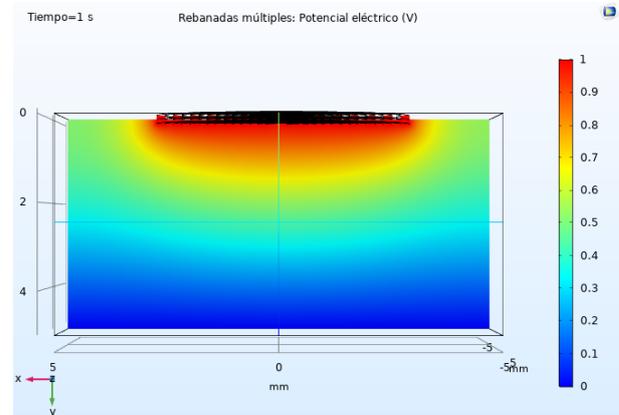


Figura 2.6: Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo en forma de espiral.

Por otra parte, es necesario conocer que bajas densidades de corriente junto con bajas concentraciones de ácido fluorhídrico aumentan las irregularidades de forma y de longitud entre los distintos poros. En cambio, si el ataque se produce con densidades de corriente demasiado elevadas puede favorecer los efectos de borde [9]. En ambos casos el resultado que se consigue es un ataque no homogéneo ya que como cada zona de la oblea ha sido atacada de forma diferente las estructuras porosas fabricadas tampoco serán uniformes entre ellas.

2.4 Biosensor

Un biosensor [22][23] es un dispositivo analítico capaz de detectar sustancias (analitos) con una alta sensibilidad, en base de un reconocimiento biomolecular específico y de modo rápido y directo. Dicho reconocimiento se realiza a través de transductor (óptico, electrónico...) que se une íntimamente con una molécula biológica. El evento del reconocimiento del analito por el elemento biológico debe dar una señal directa en el transductor sin necesidad ningún marcaje adicional.

Los biosensores están formados por dos partes principales (figura 2.7): el receptor bioactivo y el transductor fisicoquímico. El receptor es el componente que tiene la función de detectar el analito de interés dentro de la muestra global. En cambio, el transductor es el componente que se encarga de convertir dicha detección en una señal cuantificable [24][25].

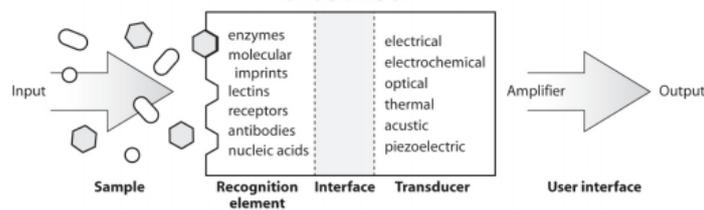


Figura 2.7: Esquema de los elementos de un biosensor [26].

Una de las clasificaciones de los biosensores se puede realizar dependiendo de estos dos elementos fundamentales [27]. En primer lugar, según el transductor son [23]:

- Electroquímicos
- Piezoeléctricos
- Ópticos
- Mecánicos
- Térmicos

Por otra parte, dependiendo del receptor bioactivo que se emplee se pueden diferenciar tres clases distintas [23]:

- Enzimáticos
- Inmunológicos (Inmunosensores)
- Otros basados en: ADN, microorganismos y células y tejidos.

Estos dispositivos surgen de la necesidad de encontrar una alternativa a los procesos de biodetección tradicionales. Estos eran más complejos, se requería de un mayor tiempo para el análisis y el procesado era de un costo económico más elevado [28]. Es por ello que algunas de las características más interesantes de los biosensores son su elevada sensibilidad y selectividad, la rapidez de análisis, el bajo coste, el empleo de volúmenes de muestra pequeños ya que son capaces de detectar concentraciones de valores pequeños (<1ppb) y la posibilidad de miniturización. Hay que tener presente que dichas propiedades también dependen de la tecnología que se esté empleando.

2.4.1 Óptico

Las estructuras fotónicas resonantes del PS junto con su amplia superficie modificada químicamente proporciona una plataforma excelente y flexible para la detección de una gran variedad de biomoléculas [6]. En general, el principio de los biosensores ópticos se basa en un aumento del índice de refracción de la estructura fotónica tras la infiltración de los analitos en los poros [6]. Es decir, la detección del analito es la que provoca un cambio en las propiedades ópticas del biosensor que puede ser medida y analizada.

El silicio poroso es uno de los material dieléctricos que más se emplean en los biosensores [29]. Es por ello que se han estudiado y existen distintas estructuras que se emplean en dichos biosensores ópticos basados en PS. Las más comunes se pueden observar en la figura 2.8:

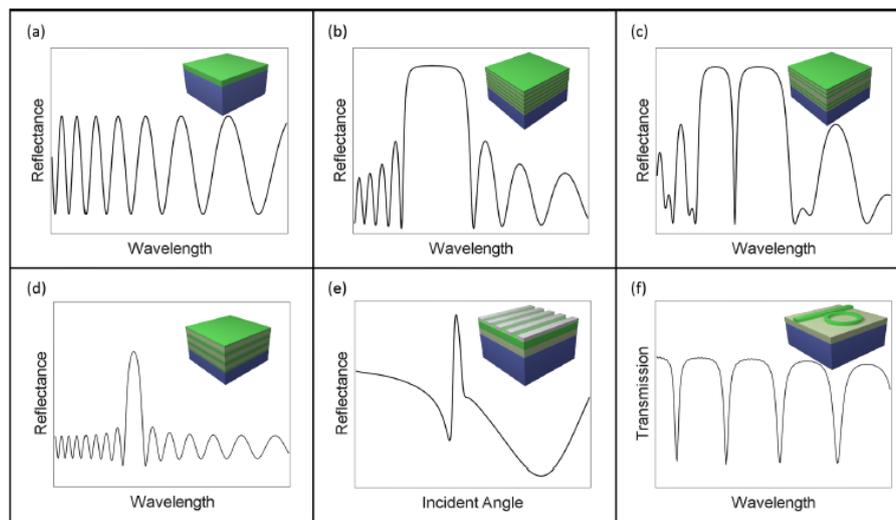


Figura 2.8: Esquemas y espectros de las estructuras más comunes de biosensores ópticos de PS: (a) Capa única, (b) Reflector de Bragg, (c) Microcavidad, (d) Filtro rugado, (e) Guía de onda plana acoplada a rejilla y (f) Anillo resonador [7].

Como se ha mencionado uno de los parámetros más utilizados en la detección y en la cuantificación de los analitos es el índice de refracción. Esto se debe a que la variación de dicho parámetro es proporcional a la concentración existente del analito y existen métodos que permiten medir dicha variación de forma fiable. Uno de estos es el método que se basa en los plasmones de superficie [30].

La clase más simple de detectar y de analizar son los cambios del índice de refracción que se producen en los biosensores que presentan una sola capa o doble capa de poros [31]. Más concretamente, por ejemplo, el interferómetro de Fabry-Pérot está compuesto por una capa de poros homogénea que es atacada por una única corriente durante el ataque electroquímico [32].

Definición del modelo

3.1 Introducción

En el apartado 2 se ha explicado cómo es el método del ataque electroquímico o de anodización que se emplea en el proceso de fabricación del silicio poroso. Por tanto, se procede a adaptar este proceso a un modelo de una manera sencilla pero con suficiente robustez como para poder realizar las distintas simulaciones de interés y obtener resultados fiables que, posteriormente, se puedan extrapolar a experimentos en el laboratorio.

Analizando dicho método se extrae que las partes fundamentales que forman este proceso son:

- Electrodo: hace la función de cátodo. Dependiendo de la geometría que tenga dicho electrodo, el ataque produce una distribución con un mayor o menor grado de homogeneidad en la superficie de la oblea de silicio. Generalmente el material con el que está fabricado es con hilo de platino.
- Electrolito: en general se emplea una mezcla de agua con ácido fluorhídrico. Añadiendo aditivos y variando la proporción de la mezcla el ataque se ve modificado [33].
- Oblea de silicio: hace la función de ánodo y de conexión a tierra. Como se ha expuesto anteriormente dependiendo de parámetros como la resistividad y el dopado de la oblea la formación de las estructuras porosas se ve modificada.

En consecuencia, la geometría del modelo simplificado debe estar formada por estas tres partes. Tras estudiar distintas opciones se opta por un modelo compuesto por dos electrodos separados por un dominio central que es el electrolito.

3.2 Geometría

Una vez se han determinado los componentes básicos con los que se puede partir para realizar simulaciones y obtener unos resultados con fiabilidad se procede a determinar las distintas geometrías que van a presentar dichos componentes.

En un primer lugar, se realiza un esquema en 2D para concretar las partes y la disposición de los componentes. Tal y como se aprecia en la figura 3.1 está formado por dos rectángulos de distinto tamaño:

- El rectángulo superior representa el cátodo. Su tamaño es de 0.4mm x 5mm. Se han establecido estos valores ya que se tiene en cuenta que para el electrodo se emplea un hilo de platino de 0.4mm de diámetro.
- El rectángulo inferior representa el baño electrolítico y la superficie de la oblea de silicio. La parte superior y central son el electrolito y el contorno inferior la oblea de silicio. El tamaño es de 5mm x 10mm. Este se ha decidido teniendo en cuenta que el tamaño de la oblea que se suele emplear es de 10 mm x 10 mm [9].

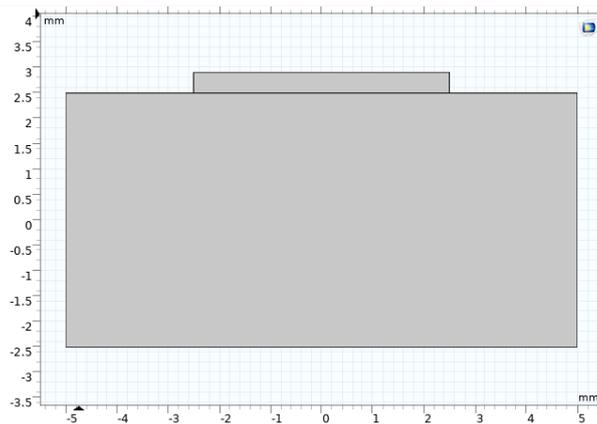


Figura 3.1: Esquema 2D de la geometría de la simulación del ataque electroquímico que se va a emplear en el presente trabajo.

Los distintos estudios se van a llevar a cabo en un entorno 3D pero tener una primera versión de una vista en 2D del modelo ofrece una propuesta geométrica que visualmente permite diferenciar claramente las tres partes que es la intención. Por ello, como se ha mencionado con anterioridad se determina que en la parte superior se encontrará el electrodo que hará la función de cátodo. La parte central, será el dominio de la disolución electrolítica. Finalmente, la parte inferior simulará la oblea de silicio.

3.2.1 Electrodo

En primer lugar, puesto que el objetivo de este trabajo es determinar la manera en la que influye el electrodo en el proceso de fabricación del silicio poroso se realizan distintos tipos de geometrías que en principio, según lo expuesto, deben dar resultados con una densidad de corriente relativamente homogénea en la superficie de la oblea que está siendo atacada.

Es por ello que para los estudios se seleccionan electrodos con forma de espiral y de malla. Ambos tipos de cátodos elaborados a partir de hilo de platino.

3.2.1.1 Espiral

Esta clase de geometría es la que se suele emplear en el laboratorio del Instituto de Tecnología Nanofotónica (NTC). Más concretamente se suele elaborar un electrodo en forma de espiral de hilo de platino de entre 5 y 9 revoluciones.

Con el propósito de estudiar cómo varía la distribución de la densidad de corriente dependiendo de cómo es el cátodo se realizan 3 espirales variando las revoluciones y el paso de rosca de estas para obtener espirales con una distancia más concentrada o dispersa. Esta variación del paso de rosca es interesante ya que al realizar estos electrodos a mano no se puede controlar de una manera muy precisa la distancia entre las distintas revoluciones del hilo de platino. En consecuencia, esta variación permite simular de una manera más realista la variabilidad entre los electrodos fabricados a mano.

Las geometrías de las espirales se realizan con el programa Solidworks ya que permite obtener de una manera más sencilla este tipo de formas.

Partiendo del cátodo que se suele emplear en el laboratorio del NTC de manera más generalizada se obtiene una espiral de un radio de 0.2 mm ya que se emplea un hilo de platino que presenta dicho radio, 7 revoluciones y un paso de rosca de 0.4mm, como se observan en las figuras 3.2 y 3.3.

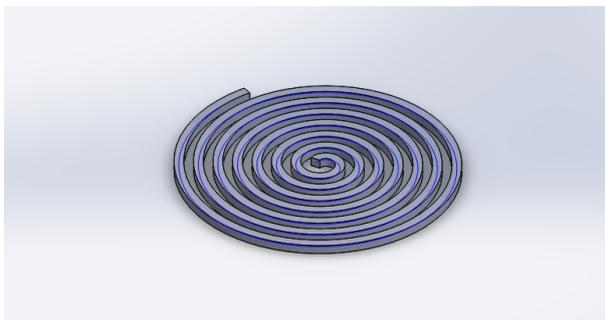


Figura 3.2: Geometría del electrodo de espiral de hilo de platino de radio de 0.2 mm, 7 revoluciones y un paso de rosca de 0.4mm.

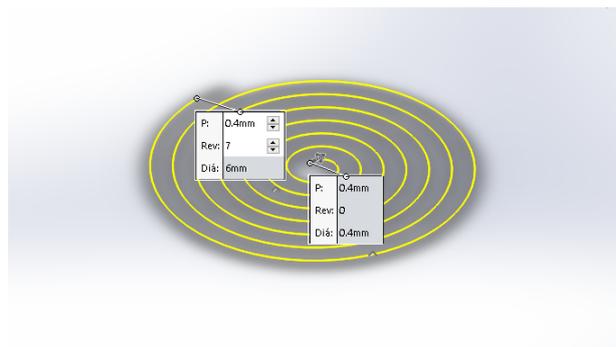


Figura 3.3: Especificaciones de la geometría del electrodo de espiral de un hilo de platino de radio de 0.2 mm, 7 revoluciones y un paso de rosca de 0.4mm.

Por otra parte, si se realiza un electrodo que presente un mayor número de revoluciones y con un paso de rosca inferior se consigue un electrodo más compacto y denso. Con estas características se asemejaría más a un electrodo plano con el que obtener, en principio, un ataque más homogéneo.

En consecuencia, se elabora un electrodo con el mismo material que el anterior, es decir, se considera que se usa un hilo de platino de 0.2mm. Pero dicho electrodo presenta 10 revoluciones y un paso de rosca de 0.3mm.



Figura 3.4: Geometría del electrodo de espiral de hilo de platino de radio de 0.2 mm, 10 revoluciones y un paso de rosca de 0.3mm.

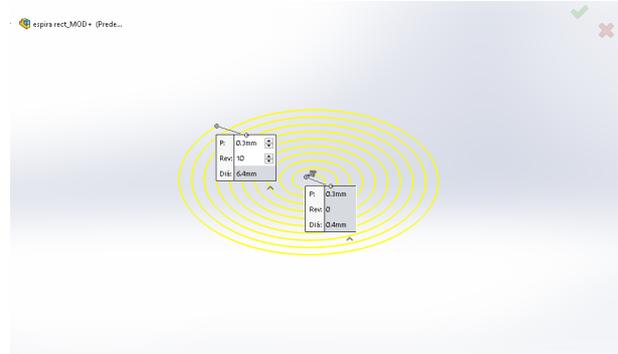


Figura 3.5: Especificaciones de la geometría del electrodo de espiral de hilo de platino de un radio de 0.2 mm, 10 revoluciones y un paso de rosca de 0.3mm.

Del mismo modo, se realiza un electrodo con un número menor de revoluciones y un mayor paso de rosca. En este caso se elige un hilo de platino de 0.2mm de radio como en los otros electrodos pero con solo 3 revoluciones y un paso de rosca de 0.8mm. De esta manera se estudiará como afectaría al ataque que se emplee un electrodo de un tamaño de número de vueltas inferior del que se usa pero con un paso de rosca mayor. Con esta mayor distancia entre las revoluciones se intenta compensar el volumen que ocupa debido a la falta de vueltas del cátodo.



Figura 3.6: Geometría del electrodo de espiral de radio de 0.2 mm, 3 revoluciones y un paso de rosca de 0.8mm.

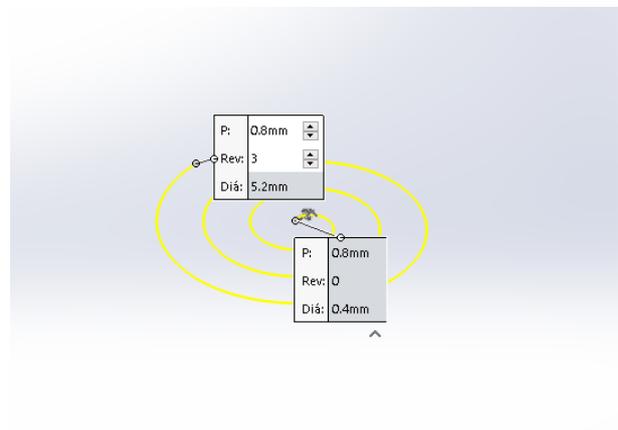


Figura 3.7: Especificaciones de la geometría del electrodo de espiral de un radio de 0.2 mm, 3 revoluciones y un paso de rosca de 0.8mm.

3.2.1.2 Malla

Por otra parte, los electrodos de malla de hilo de platino se han elaborado a través de la sección de Geometrías del programa COMSOL Multiphysics. Para estos se ha tenido en consideración que se está usando un hilo de platino de entre 0.2mm y 0.3mm de radio. De este modo a la hora de comparar resultados entre los distintos cátodos de geometría diversa se van a poder comparar de una manera más similar.

Como en el caso de los electrodos en forma de espiral se decide realizar tres cátodos de malla de hilo de platino pero variando tanto la forma global del electrodo como el patrón de la forma que presentan las aberturas de la malla.

En primer lugar, se elabora un cátodo que presente una forma global cuadrada y que cuyas cavidades también sean cuadradas (figura 3.8). Con esta geometría se diferencia ligeramente de las geometrías más circulares como las espiras o las otras mallas.

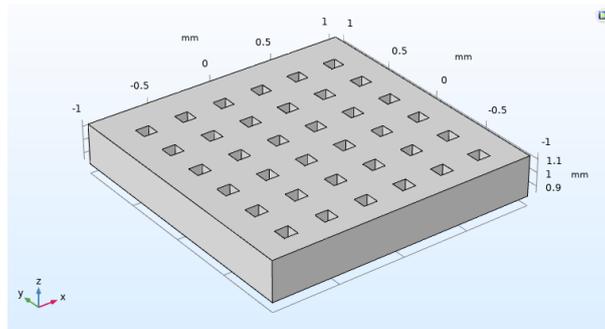


Figura 3.8: Geometría del electrodo de malla de hilo de platino de forma global y patrón cuadrados.

En segundo lugar, se realiza una malla con una forma global cilíndrica pero que como en el cátodo anterior presente unas cavidades cuadradas (figura 3.9).

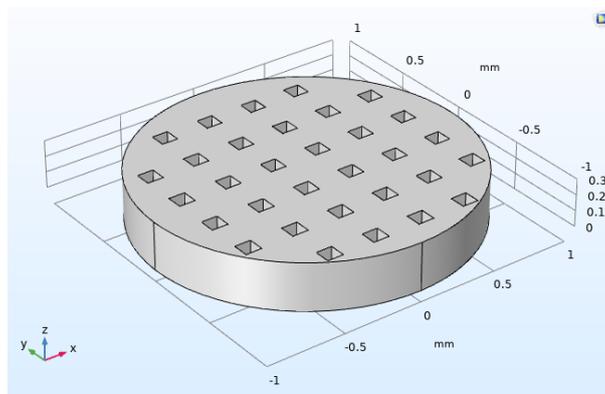


Figura 3.9: Geometría del electrodo de malla de hilo de platino de forma global cilíndrica y patrón cuadrado.

Finalmente, el último electrodo de malla de platino muestra tanto una geometría cilíndrica global como en su patrón (figura 3.10).

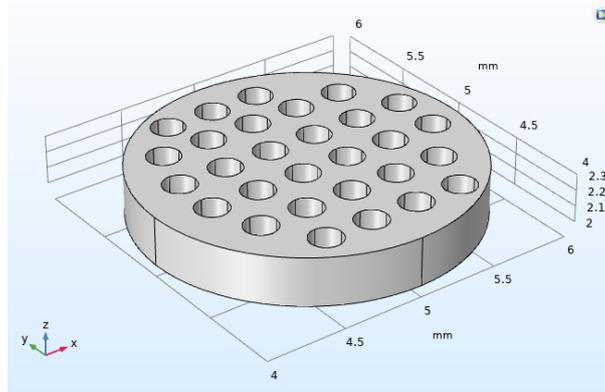


Figura 3.10: Geometría del electrodo de malla de hilo de platino de forma global y patrón cilíndricos.

3.2.2 *Electrolito*

De una forma sencilla se construye en el apartado de *Geometrías* del software COMSOL Multiphysics un bloque que simule la fase que ocupa el electrolito (figura 3.11). Para el tamaño de dicho bloque se toma como referencia el tamaño de la oblea de silicio que se suele usar. En este caso es de 1cm x 1cm [9] y la altura se ha establecido de 5mm pero esta variará posteriormente dependiendo del estudio que se esté realizando.

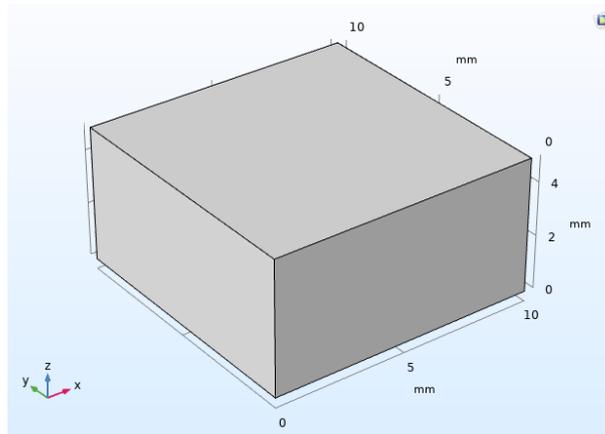


Figura 3.11: Geometría del dominio del electrolito (10mm x 10mm x 5mm).

3.2.3 *Oblea de silicio*

El interés recae en ver cómo se distribuye y varía la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio. Debido a esto esta está representada por la superficie inferior del bloque que se ha elaborado para hacer la función del electrolito (figura 3.12).

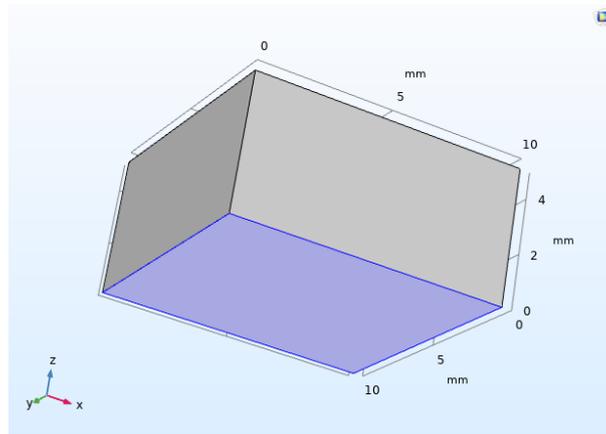


Figura 3.12: Geometría de la oblea de silicio.

3.2.4 Conjunto

Finalmente, de modo ilustrativo y para que se visualice de una mejor manera el conjunto de las distintas geometrías que componen el conjunto del modelo, la geometría global se aprecia en la figura 3.13.

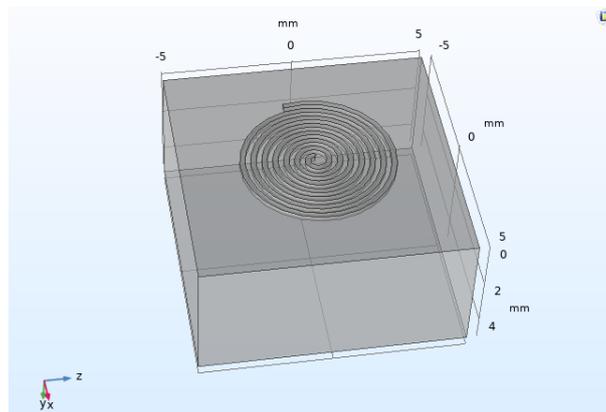


Figura 3.13: Geometría en 3D del conjunto del modelo que se emplea para simular el ataque electroquímico.

La parte superior, en este caso la espiral, representa el electrodo en el ataque. La parte central, en este caso el bloque, hace la función del electrolito. Finalmente, la parte inferior de este, que no se puede visualizar en esta vista, simula la oblea de silicio que va a ser atacada.

3.3 Estudio

Una vez se ha establecido la geometría que va a presentar el modelo tanto por separado como en conjunto se procede a definir las características globales y propias de cada componente tales como los materiales, la conexión a tierra o la fuente de tensión aplicada.

Para realizar estas simulaciones se emplea el software COMSOL Multiphysics puesto que permite realizar las simulaciones necesarias para estudiar y analizar la influencia de los distintos parámetros en la homogeneidad del proceso de fabricación del silicio poroso [35][36]. Este es el mismo programa con el que se han realizado algunas de las geometrías presentadas en la sección 3.2.

En primer lugar, se selecciona la dimensión del espacio. En este caso se elige 3D. A continuación, se tienen que escoger las interfaces físicas y el tipo de estudio que se van a realizar. Para el propósito del trabajo se selecciona y añade como física *corrientes eléctricas* y como estudio *temporal*.

Una vez se han seleccionado estos apartados iniciales se deben completar aquellos que van a definir el comportamiento y las especificaciones de las simulaciones los cuales se estudian en las secciones 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 y la 3.3.4. Estos se encuentran definidos dentro del apartado de *Componente 1 (comp 1)* del modelo general y se encuentran expuestos y explicados en las subsecciones siguientes.

3.3.1 Geometría

En primer lugar, se deben especificar los distintos componentes que forman la geometría global del modelo. Estos son los comentados en la sección 3.2.

Por ello se importan o se construyen las geometrías. En el caso de los electrodos se importan directamente las geometrías que se han realizado previamente en SolidWorks o en COMSOL Multiphysics. En el caso de haber sido construidas en SolidWorks es necesario que se hayan guardado en un archivo que sea compatible con el software que se emplea para las simulaciones. Más concretamente, se han guardado como archivo .sat y .dxf puesto que ambos son compatibles con COMSOL Multiphysics.

Finalmente, se construye el bloque especificado en la subsección 3.2.2 que simula el electrolito y cuyo contorno inferior representa la superficie de la oblea de silicio. De este modo ya se tiene el modelo con las distintas geometrías que lo componen.

3.3.2 Materiales

En segundo lugar, una vez se ha definido la geometría se tienen que especificar los materiales de que está compuesta cada parte del modelo. Puesto que en dicho modelo se han definido tres partes diferenciadas cada una estará fabricada por un material distinto teniendo en cuenta la teoría expuesta en la Capítulo 2.

El software COMSOL Multiphysics posee una librería propia con una gran variedad de materiales predeterminados. Un mismo material puede aparecer varias veces ya que cada opción puede haber estado definida para una física distinta y presentar propiedades que en las otras opciones no se especifican ya que no son necesarias. Esto es porque para una física de corrientes eléctricas se necesitan unas ciertas propiedades de un material que, por ejemplo, para una física de transferencia de calor pueden no ser requeridas. Además, en caso de ser necesario se pueden añadir más propiedades a las opciones de los materiales predeterminados de la librería.

Del mismo modo, aunque la librería de materiales es extensa también se puede crear un material desde cero especificando todas las propiedades que sean requeridas.

3.3.2.1 Platino

El electrodo, generalmente, está fabricado con hilo de platino. Si se busca dicho material en la librería de COMSOL Multiphysics aparece en varias ocasiones. Para seleccionar el más adecuado se estudian las propiedades que aparecen especificadas en cada opción. Después de este análisis se selecciona el *Pt - Platinum* cuyas propiedades se observan en la figura 3.14.

»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad eléctrica	sigma_iso...	8.9e6[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/>	Permitividad relativa	epsilon_r_1...	1.0003	1	Basic
	Coefficiente de expansión térmica	alpha_iso...	8.80e-6[1/K]	1/K	Basic
	Capacidad térmica a presión constante	Cp	133[J/(kg*K)]	J/(kg-K)	Basic
	Densidad	rho	21450[kg/m...]	kg/m ³	Basic
	Conductividad térmica	k_iso ; kii...	71.6[W/(m*K)]	W/(m-K)	Basic
	Módulo de Young	E	168e9[Pa]	Pa	Módulo de Young y coeficiente de P...
	Coefficiente de Poisson	nu	0.38	1	Módulo de Young y coeficiente de P...

Figura 3.14: Propiedades del material Pt-Platinum.

Tanto la *conductividad eléctrica* como la *permeabilidad relativa* han tenido que ser especificadas posteriormente puesto que estas no venían definidas en el programa y son necesarias para poder realizar el estudio [37].

Una vez ya se ha determinado el material y las propiedades requeridas por la física que se va a emplear, es necesario determinar que dominio de la geometría está compuesto por este material. En este supuesto se trata del dominio del electrodo.

3.3.2.2 Disolución electrolítica

La disolución electrolítica que se suele emplear es una compuesta por H_2O y HF (75:25). Si se busca un material predeterminado formado por estos dos componentes no se encuentra en la librería de materiales.

Sin embargo, partiendo del material H_2O (*water*) [*liquid*] se modifican algunas propiedades para que el comportamiento sea el del electrolito deseado. Para ello la *conductividad eléctrica* y la *permeabilidad relativa* han sido definidas como aquellas correspondientes a la mezcla compuesta por H_2O y HF [38]. Así la distribución de la densidad de corriente simulada será más similar a la que se obtiene experimentalmente en el laboratorio.

»	Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
<input checked="" type="checkbox"/>	Conductividad eléctrica	sigma_iso...	10	S/m	Básico
<input checked="" type="checkbox"/>	Permitividad relativa	epsilon_r_1...	80.1	1	Básico
	Conductividad térmica	k_iso ; kii...	k_liquid_2(Tl...	W/(m-K)	Básico
	Coefficiente de expansión térmica	alpha_iso...	(alpha_liquid...	1/K	Básico
	Capacidad térmica a presión constante	Cp	C_liquid_2(Tl...	J/(kg-K)	Básico
	HC	HC	HC_liquid_2(...	J/(mol-K)	Básico
	VP	VP	VP_liquid_2(...	Pa	Básico
	Densidad	rho	rho_liquid_2(...	kg/m ³	Básico
	TD	TD	TD_liquid_2(...	m ² /s	Básico
	Viscosidad dinámica	mu	eta_liquid_1(...	Pa-s	Básico
	Coefficiente tangencial de expansión térmica	alphatan_i...	CTE_liquid_2...	1/K	Expansión térmica
	Deformación térmica	dL_iso ; d...	(dL_liquid_2(...	1	Expansión térmica
	Coefficiente tangencial isotrópico de expan...	alphatanIso	CTE_liquid_2...	1/K	Expansión térmica
	Deformación térmica isotrópica	dLIso	(dL_liquid_2(...	1	Expansión térmica

Figura 3.15: Propiedades de la disolución electrolítica.

Del mismo modo que en el caso del electrodo, cuando el material se encuentra definido para la física que se va a emplear se procede a determinar que dominio presenta dicho material. En este caso, el dominio se corresponde al bloque construido ya que es el que hace la función de electrolito.

3.3.2.3 Silicio

Finalmente, se debe seleccionar el tipo de silicio del que está fabricada la oblea que va a ser atacada. Si se busca en la librería de materiales aparecen una gran variedad de tipos de silicio. El que mejor se adecua y el que se va a emplear en la mayoría de simulaciones es el *p-Silicon (single-crystal, lightly doped)*.

Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad
Densidad	rho	2330[kg/m^3]	kg/m ³	Basic
Permitividad relativa	epsilon_r_i...	4.5	1	Basic
Conductividad eléctrica	sigma_iso...	sigma0(ndf...	S/m	Basic
Resistividad	res_iso ; re...	0.01	Ω·m	Basic
Matriz de elasticidad	{D11, D12,...	{166[GPa], 6...	Pa	Anisotrópico
Factor de pérdida de matriz de elasticidad D	eta_D_iso...	0	1	Anisotrópico
Matriz de elasticidad, notación de Voigt	{DVo11, D...	{166[GPa], 6...	Pa	Anisotrópico, notación de Voigt
Factor de pérdida de matriz de elasticidad...	eta_DVo_i...	0	1	Anisotrópico, notación de Voigt
Matriz de acoplamiento piezoresistivo	{Pii11, Pii1...	{6.6e-11[1/P...	m ² /(s·A ²)	Forma Piezo-resistiva
Matriz de acoplamiento elasto-resistivo	{mi11, ml...	{9.6/sigma0(...	Ω·m	Elastoresistance form

Figura 3.16: Propiedades del material p-Silicon (single-crystal, lightly doped).

Más concretamente, en este material las propiedades que aparecen predefinidas en el software son suficientes para los estudios. Sin embargo, se añade la propiedad de resistividad puesto que es un parámetro que se va a estudiar si afecta a la distribución de la densidad de corriente que se produce en la superficie de dicha oblea.

Como paso final se selecciona el contorno inferior del bloque que simula el electrolito puesto que este contorno es el que hace la función de la superficie de la oblea de silicio que va a ser atacada.

3.3.3 Corrientes eléctricas (*ec*)

Una vez se ha especificado la geometría y de que material está compuesto cada uno de los componentes se procede a determinar el comportamiento eléctrico de cada uno y del conjunto.

Primeramente, se seleccionan los tres componentes ya que todos van a formar parte de esta física. Además, como el estudio se ha seleccionado como temporal este va a estar regido por las ecuaciones de Maxwell (Ecuación 3.1).

$$\begin{cases} \nabla J = Q_{j,v} \\ J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \\ E = -\nabla V \end{cases} \quad (3.1)$$

Otros aspectos que aparecen en este apartado son las variables dependientes (*Potencial eléctrico (V)*) y el valor de la impedancia de entrada ($Z_{ref} = 50\Omega$).

3.3.3.1 Conservación de corriente

En este apartado también se seleccionan los tres componentes del sistema. Además, se especifica de forma predeterminada en dicho apartado que el valor de la temperatura que presenta el conjunto del estudio ($T_{ref} = 293,15K$).

3.3.3.2 Aislamiento eléctrico

En un principio todos los contornos forman parte del aislamiento eléctrico el cual se rige por la ecuación 3.2.

$$nJ = 0 \quad (3.2)$$

Conforme se van especificando los otros apartados se va anulando esta propiedad. De hecho, los contornos que presentan esta característica son los del bloque del electrolito exceptuando el contorno que simula la oblea de silicio.

3.3.3.3 Valores iniciales

Para determinar desde qué punto parte el sistema se especifica que los 3 componentes al inicio del estudio presentan un potencial eléctrico nulo ($V = 0V$).

3.3.3.4 Tierra

En el laboratorio se suele emplear una placa de cobre situada debajo de la oblea de silicio que será la conexión a tierra (ecuación 3.2). No obstante, en otras ocasiones esta conexión es el propio silicio. Es por ello que se determina que en las simulaciones la superficie de la oblea, es decir, el ánodo sea también la conexión a tierra. De esta manera se cierra el circuito eléctrico.

3.3.3.5 Potencial eléctrico

El electrodo es el elemento que funciona como fuente de tensión (ecuación 3.3). Es por ello que se especifica el potencial eléctrico que presenta el cátodo (ecuación 3.4) y que, por tanto, es el responsable del ataque a la oblea de silicio. Además, la distribución del potencial eléctrico puede ser de utilidad para comprobar si se está realizando el ataque correctamente.

$$V = V_0 \quad (3.3)$$

Para determinar el valor del potencial eléctrico que se aplica al cátodo se tiene en cuenta la figura 2.3 y en la zona de la región en la que se pretende estar.

$$V_0 = 1V \quad (3.4)$$

3.3.4 Mallado

El mallado es un aspecto fundamental cuando se emplea el método de elementos finitos. Dependiendo de las características tales como el tamaño o la forma geométrica que presenten los elementos que conforman la malla el resultado obtenido podrá ser más o menos realista.

Hay que encontrar un balance óptimo entre emplear un mallado de elementos suficientemente finos para obtener un buen resultado pero sin tener un tamaño demasiado pequeño que conlleve un gasto computacional considerable.

En estos estudios se ha comprobado que empleando un mallado con elementos tetraédricos y con un tamaño fino es suficiente. Los parámetros de los elementos se pueden modificar pero se emplean los que se pueden observar en la figura 3.17.

Tamaño máximo de elemento:	<input type="text" value="0.8"/>	mm
Tamaño mínimo de elemento:	<input type="text" value="0.1"/>	mm
Tasa de crecimiento máxima de elemento:	<input type="text" value="1.45"/>	
Factor de curvatura:	<input type="text" value="0.5"/>	
Resolución de regiones estrechas:	<input type="text" value="0.6"/>	

Figura 3.17: Parámetros referentes al tamaño de los elementos del mallado.

Los elementos se van adaptando a la geometría del modelo como se visualiza en figura 3.18. Aquellas zonas en las que el bloque y la espiral mantienen contacto los elementos son de un menor tamaño ya que probablemente en esas zonas haya una mayor actividad de la física.

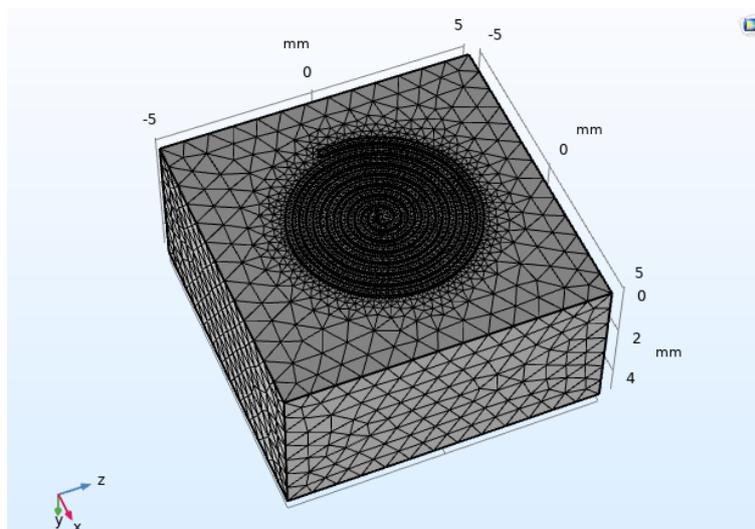


Figura 3.18: Mallado de la geometría global.

Del mismo modo, en la figura 3.19 se aprecia como los elementos que conforman la espira son de un tamaño menor que aquellos del bloque. Además, de cómo el tamaño va variando conforme se acerca o se aleja del electrodo.

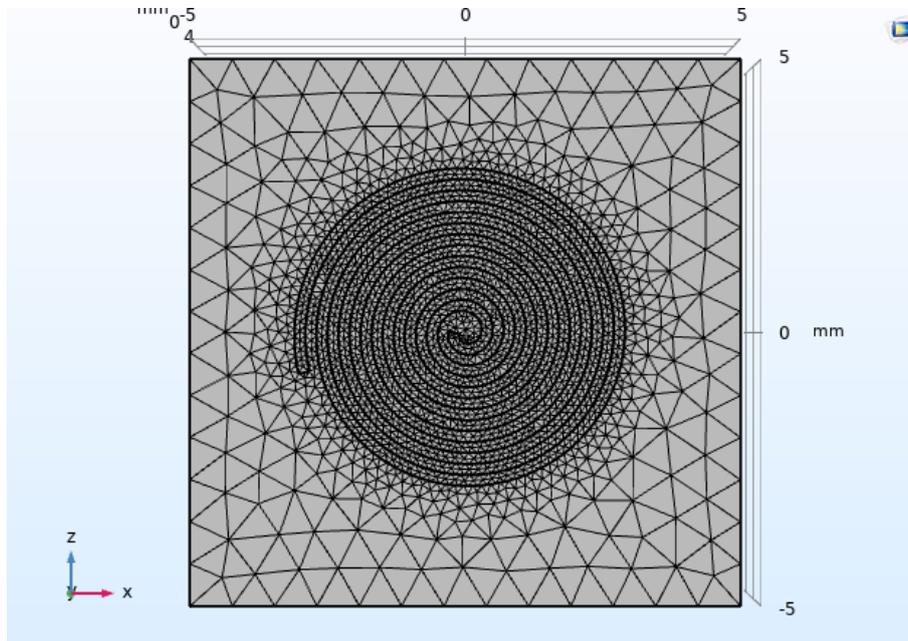


Figura 3.19: Vista superior del mallado global.

Resultados de los estudios

4.1 Introducción

Una vez se ha expuesto cómo es el proceso de fabricación del silicio poroso y el modelo que se ha diseñado para llevar a cabo los estudios, se procede a determinar qué simulaciones se van a realizar mediante el software COMSOL Multyphysics.

En los sucesivos apartados se puede observar cuales son aquellos parámetros que presentan un mayor interés en su estudio para determinar en qué grado son relevantes en obtener un ataque homogéneo. A continuación, se presentan brevemente los parámetros que se van a modificar de cada parte fundamental del proceso de fabricación:

- Electrodo: geometría, tamaño y posición.
- Baño electrolítico: estrictamente las características de este no se van a modificar pero sí su volumen. Dicha variación permite aumentar o disminuir la distancia entre el cátodo y la oblea de silicio.
- Oblea de silicio: resistividad y tipo de dopaje (n-Silicio y p-Silicio).

4.2 Geometría del electrodo

En primer lugar, se estudia la influencia de la manera en la que se distribuye la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio dependiendo de la geometría que presente el electrodo que se está empleando.

En el apartado 3.2.1 se han presentado las distintas geometrías de los electrodos que se van a usar en las simulaciones. Con el fin de estandarizar los distintos estudios se emplea el mismo bloque que hace la función del electrolito y de la superficie de la oblea de silicio. Más concretamente, las proporciones de este son de 1cmx1cm y 5mm de altura como se ha especificado en la subsección 3.2.2.

Además, el cátodo se encuentra posicionado en el centro de dicho bloque en todos los casos. Esta puntualización es importante remarcarla puesto que en las geometrías que han sido importadas de SolidWorks, es decir las espirales, el centro no se encuentra específicamente en el (0,0,0) pero sí que se encuentran posicionadas en el centro de la superficie superior del baño electrolítico. De este modo, se podrán comparar los distintos estudios.

De las figuras que representan la distribución de la densidad de corriente en 2D sobre la superficie de la oblea se puede extraer que en los casos en que se emplea un electrodo de malla de hilo de platino se obtiene una distribución más esférica. No obstante, esto también se puede deber a que en proporción el tamaño de estos electrodos es ligeramente inferior a las espirales pero esto se estudiará en el siguiente apartado 4.3.

Una distribución esférica implica que hay una zona central que focaliza el efecto del ataque electroquímico. Es decir, esta zona presenta una densidad de corriente más elevada que las otras zonas. Además, la densidad de corriente disminuye conforme se va aumentando la distancia a dicha zona central. Por tanto, cabe esperar que cuando se obtiene una distribución esférica la densidad de corriente de la superficie de la oblea no será uniforme y, en consecuencia, esta distribución no es óptima para la homogeneización del ataque electroquímico.

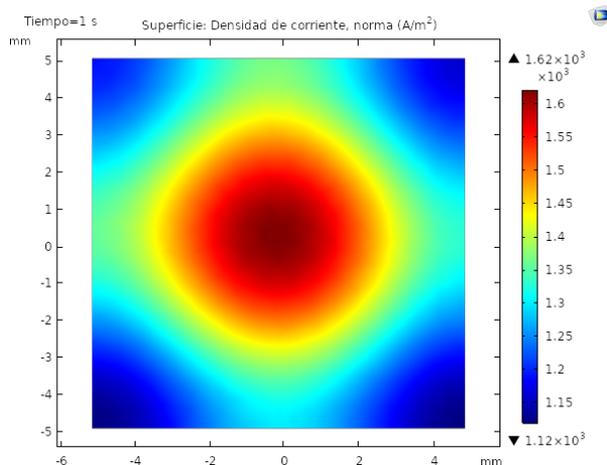


Figura 4.1: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones.

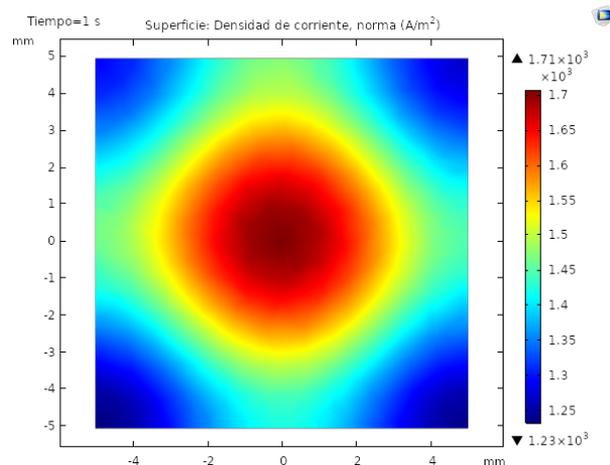


Figura 4.2: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones.

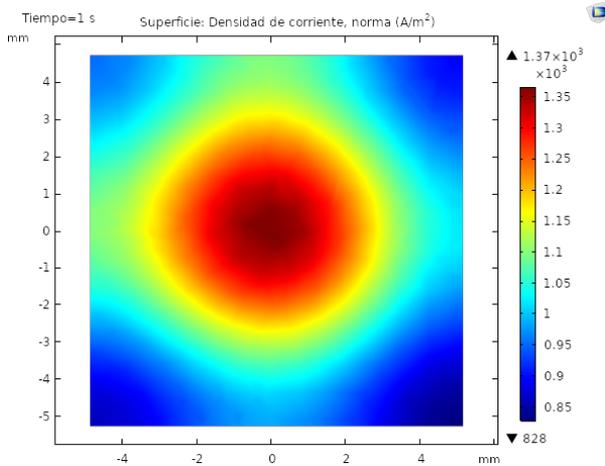


Figura 4.3: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones.

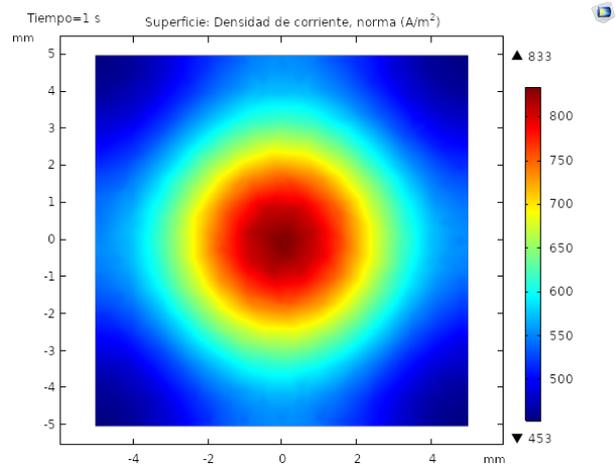


Figura 4.4: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas.

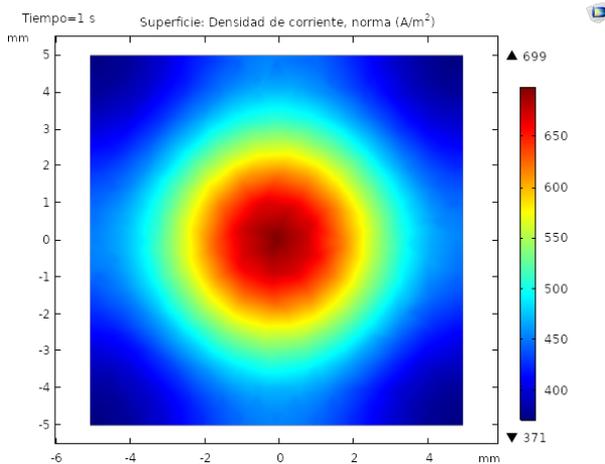


Figura 4.5: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada.

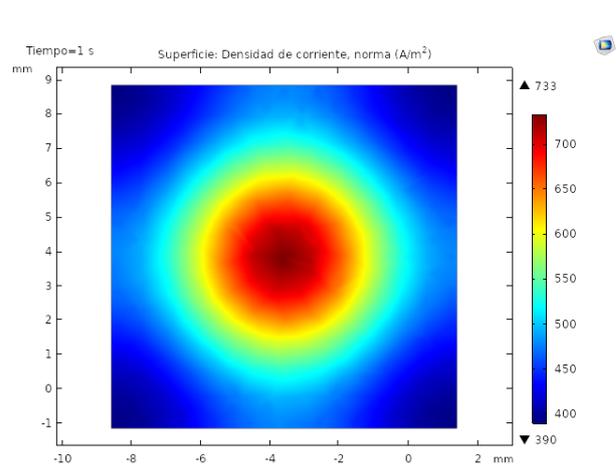


Figura 4.6: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas.

En los casos en que el electrodo presenta forma de espiral la densidad de corriente que llega a la superficie de la oblea es mucho mayor que en el caso de las mallas de hilo de platino. Si se analiza detenidamente el valor más grande se da en el caso del cátodo de la espiral de 10 revoluciones (figura 4.2). Este presenta un valor máximo en la zona central, justo debajo de la parte central del electrodo, de $1.71 \times 10^3 A/m^2$. En las partes más externas de la superficie el valor desciende a $1.23 \times 10^3 A/m^2$.

No obstante, más que el valor de la densidad de corriente que consigue atacar la superficie de la oblea es de interés comprobar cual es la relación entre el valor máximo y el mínimo de esta ya que esto permite saber como de homogéneo ha sido el ataque. Por tanto, si se realiza el cociente

entre ambos valores $\frac{J_{max}}{J_{min}}$ se podrá determinar cómo de uniforme ha sido. En el supuesto de que el ataque fuera completamente homogéneo se obtendría que el valor de dicho cociente es 1 ya que el valor máximo y mínimo de la densidad de corriente es el mismo.

Sin embargo, conforme vaya aumentando el valor del cociente implicará una disminución de la homogeneidad del ataque. Esto se debe a que los valores máximo y mínimo diferirán más a lo largo de la superficie de la oblea de silicio y, por tanto, toda esta no estará sufriendo el mismo ataque formando zonas con características distintas. Esto supondrá, por ejemplo, que los poros que se estén formando en el silicio serán diferentes dependiendo de la zona en la que se encuentren.

En la tabla 4.1 se encuentran recogidos tanto el factor de relación de homogeneidad como los valores máximos de la densidad de corriente y cómo influyen en la uniformidad del ataque electroquímico. De esta se extrae que los valores de los cocientes oscilan entre un rango de 1,390 y 1,885. Esto resulta en que ninguno presenta una distribución completamente homogénea. La opción que muestra un valor menor es el cátodo de la espiral de 10 revoluciones. Del mismo modo, los electrodos en forma de espiral han obtenido valores más cercanos al 1 que los de malla de hilo de platino que presentan un patrón más esférico y no hay una distribución tan uniforme como en el caso de los primeros electrodos.

Tabla 4.1: Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio.

Electrodo	$\frac{J_{max}}{J_{min}}$	$J_{max}(A/m^2)$
Espiral 3 revoluciones	1.654	1.37×10^3
Espiral 7 revoluciones	1.446	1.62×10^3
Espiral 10 revoluciones	1.390	1.71×10^3
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	1.843	833
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	1.885	699
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	1.879	733

En cambio, aunque la densidad de corriente sea diferente en cada uno de los distintos casos sí que, como se observa en los gráficos lineales en la figura 4.7, presentan una distribución similar. Esta concentra el valor máximo en la zona inferior de donde se encuentra el electrodo, en estos caso en el centro de la superficie superior del electrolito, y se distribuye disminuyendo el valor de manera uniforme conforme se aleja de la zona central.

La figura 4.7 muestra los valores de la densidad de corriente normalizados respecto al máximo en cada caso. Se ha elegido representarlo así puesto que, de este modo, se aprecia mejor el grado de homogeneidad de cada electrodo y se pueden comparar entre estos más claramente.

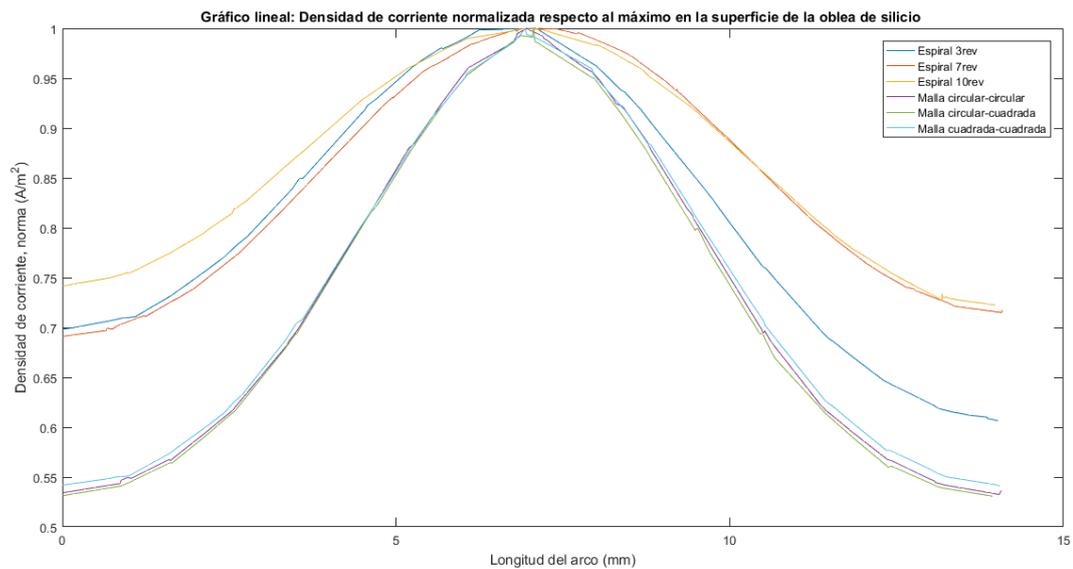


Figura 4.7: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de las distintas geometrías de los electrodos.

En los gráficos lineales se busca que la distribución sea lo más plana posible ya que esto supone que a lo largo de la superficie de la oblea la densidad de corriente es similar y, por tanto, el ataque es uniforme. En cambio, conforme la pendiente es más abrupta existe un menor grado de homogeneidad.

En los casos expuestos la uniformidad en estos es similar si se analizan los gráficos lineales puesto que presentan una gran similitud (figura 4.7) pero sí que se llega a vislumbrar como los gráficos correspondientes a los electrodos en forma de espiral muestran una mayor uniformidad ya que los valores de la densidad de corriente a lo largo de la superficie de la oblea varían en menor medida.

Además, si se tienen en consideración los gráficos 2D y los valores obtenidos del cociente entre el valor de densidad de corriente máxima y la mínima en los distintos estudios también se observa como en los casos en los que el electrodo en espiral la distribución es más homogénea. Igualmente, estos muestran un valor de densidad de corriente superior con lo que el ataque sería más efectivo.

4.3 Tamaño del electrodo

En el apartado 4.2 se ha mencionado como algunas de las variaciones que aparecían podían deberse a la diferencia de tamaño entre los electrodos. Es por ello que es conveniente estudiar la manera en la que fluctúa la distribución de la densidad de corriente cuando se modifica el tamaño de cada cátodo manteniendo constantes los otros parámetros de interés.

Hay que tener en cuenta que como cada electrodo tiene un tamaño ligeramente distinto se va a seguir la pauta de que el tamaño más grande de cada electrodo sea aquel que ocupe la superficie

superior del bloque del electrolito como aparece en la figura 4.8. Sin embargo, para el tamaño menor se va a usar un electrodo cuyo tamaño sea 1/4 el del original ya que se ha comprobado que valores inferiores a este dan resultados prácticamente iguales.

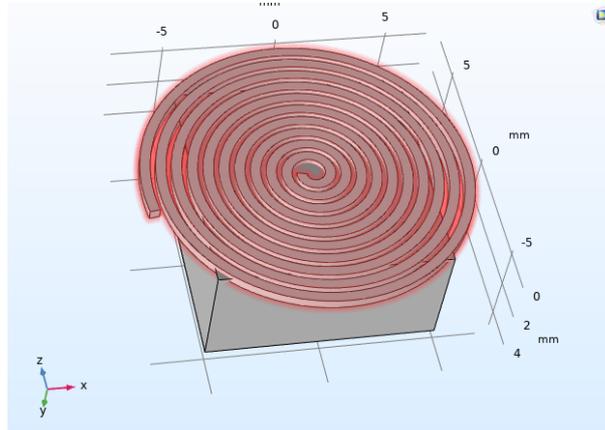


Figura 4.8: Geometría global cuando el electrodo ocupa toda la superficie superior del bloque del electrolito.

4.3.1 Mayor

En primer lugar, se analizan las distribuciones de la densidad de corriente de los electrodos cuyo tamaño cubre la superficie superior del electrolito. Con esto se consigue que el potencial eléctrico se distribuya de una manera plana y paralela a todo el electrolito y a la oblea de silicio con lo que se espera obtener un resultado más homogéneo (figura 4.9).

Cabe remarcar que el supuesto de emplear un electrodo que presente un tamaño mayor que la superficie del contorno del baño electrolítico no siempre se va a poder recrear en un laboratorio experimentalmente puesto que esto supondría que el electrodo es más grande que la celda electroquímica donde se está realizando el proceso de fabricación.

De hecho, teniendo en cuenta la geometría del recipiente de la celda electroquímica que se ha empleado en los estudios, el único cátodo que podría cubrir de una manera más completa la superficie superior del electrolito sería el electrodo de malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas debido a que tanto su superficie como la del electrolito es cuadrada. Sin embargo, este caso de forma teórica permite estudiar cómo influye el aumento del tamaño del electrodo en la homogeneidad del proceso.

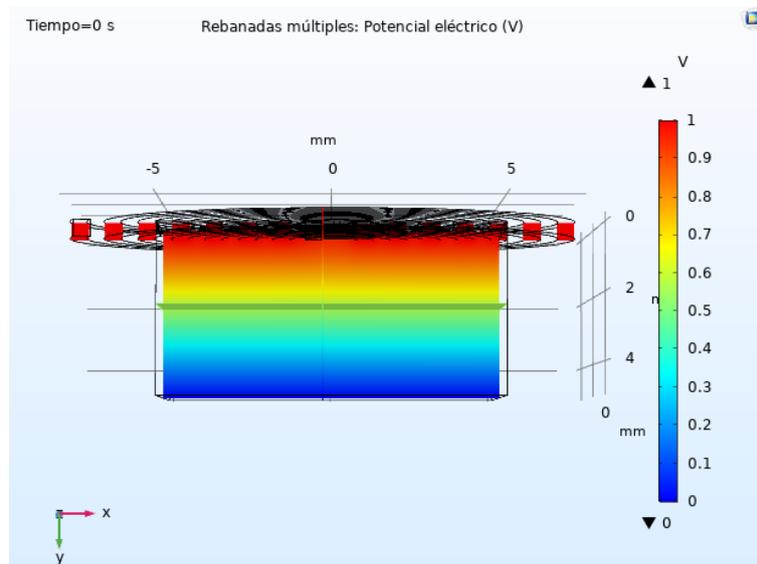


Figura 4.9: Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo de tamaño superior a la superficie del contorno superior del electrolito.

Tras realizar los distintos estudios aumentando el tamaño de los cátodos se obtienen resultados que, en efecto, muestran un ataque uniforme en la superficie de la oblea de silicio. Es por ello, que en este caso es más interesante analizar directamente los gráficos lineales y no tanto la distribución de la densidad de corriente en 2D ya que es prácticamente la misma en todos los supuestos.

En el análisis de las gráficas de la figura 4.10 se vislumbra como la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea empleando la mayoría de los electrodos es constante, es decir, se consigue un ataque prácticamente homogéneo. Aquellos que consiguen una recta más constante son la espiral de 7 revoluciones, la espiral de 10 revoluciones y el electrodo de malla de hilo de platino cuadrado con los orificios cuadrados es con la que se obtiene un ataque homogéneo. Este último se puede deber a que como la forma que presenta es cuadrada se puede acoplar completamente a la superficie superior del bloque del electrolito, es decir, en este caso el tamaño del cátodo es 1cmx1cm que corresponde con el mismo tamaño del contorno desde donde empieza la disolución electrolítica. Por tanto, la distribución se propaga de forma paralela a este y se consigue obtener el mismo valor en toda la superficie de la oblea. Además, en estos supuestos, en los estudios con este electrodo sería el único que no se estaría desperdiciando material ya que toda la superficie del cátodo estaría en contacto con el electrolito.

Del mismo modo si se analizan los gráficos lineales de los otros electrodos al tratarse de un ataque uniforme en toda la oblea se aprecia una mínima fluctuación pero no es representativa. De hecho, esta ligera variación se puede corresponder a la posición de los orificios del electrodo ya que hacen que una zona de esta pueda ser más o menos densa.

En estos otros casos, puesto que existe una ligera diferencia en el valor de la densidad de corriente y el electrodo se encuentra posicionado en el centro de la geometría de la disolución electrolítica, los gráficos presentan una distribución similar a los gráficos lineales del apartado 4.2. Es decir, presentan una densidad superior en una zona determinada y disminuye ligeramente en otra zona de la oblea.

Teniendo en cuenta esta fluctuación de la densidad de corriente, el caso de la espiral de 3 revoluciones es la que presenta un ataque menos homogéneo y con un valor de la densidad de corriente menor. Esto se puede deber a que al tratarse de un electrodo con una gran distancia entre las vueltas presenta más zonas sin material que provoca que haya huecos que no consigan atacar la oblea.

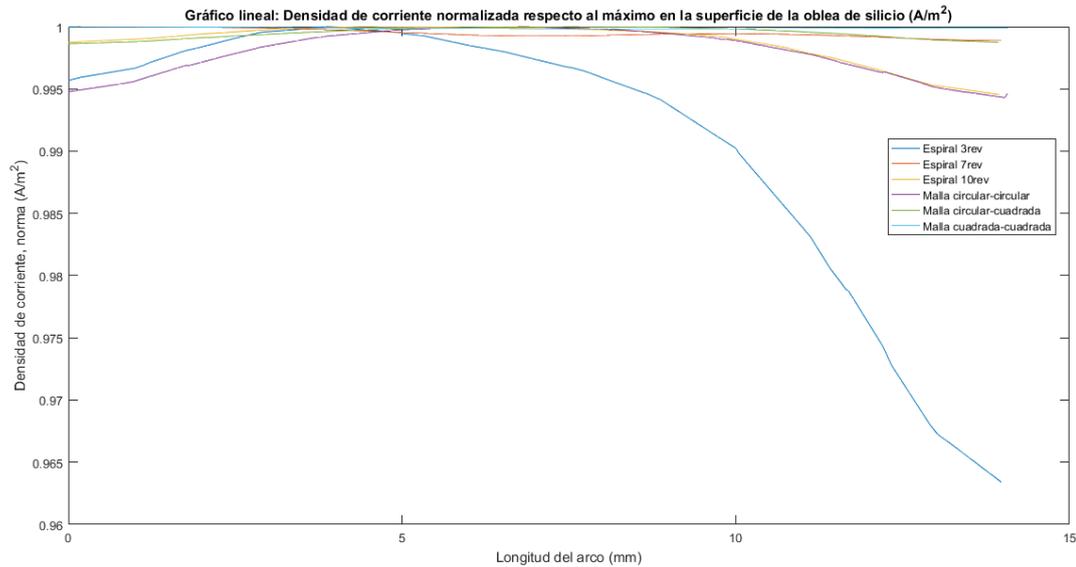


Figura 4.10: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando el tamaño se aumenta.

En la tabla 4.2 se observa como el ataque es prácticamente homogéneo en todos los casos. El único que presenta una ligera dispersión superior es el cátodo en forma de espiral de 3 espiras. Esto es consecuencia, tal y como se ha comentado anteriormente a que al presentar un menor número de vueltas y que haya una mayor separación entre estas existe una mayor parte de la superficie del electrolito que no tiene contacto directo con el electrodo.

Tabla 4.2: Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se emplean electrodos de tamaño elevado.

Electrodo	$\frac{J_{max}}{J_{min}}$	$J_{max}(A/m^2)$
Espiral 3 revoluciones	1.026	1.981×10^3
Espiral 7 revoluciones	1.001	2.017×10^3
Espiral 10 revoluciones	1.000	2.087×10^3
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	1.000	1.999×10^3
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	1.001	2.356×10^3
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	1.001	2.294×10^3

Dicha fluctuación se puede visualizar mejor si se comparan la figura 4.11 y la figura 4.8. La segunda es mucho más compacta y hace que afecte a una mayor superficie de la zona electrolítica

y, por tanto, que ataque a una mayor parte de superficie del silicio.

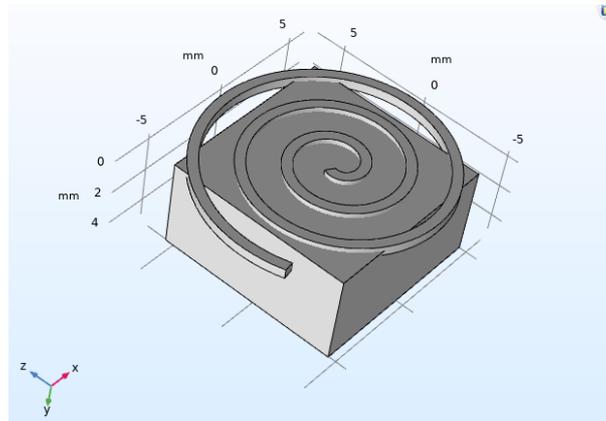


Figura 4.11: Geometría global cuando el electrodo en forma de espiral de 3 revoluciones ocupa toda la superficie superior del bloque del electrolito.

Según lo expuesto cuando se emplea un electrodo de un mayor tamaño, en efecto, se consigue un ataque más homogéneo y que la densidad de corriente que llega a la oblea de silicio sea mayor.

Sin embargo, hay que tener en cuenta algunas de las limitaciones como que también se está usando una mayor cantidad de material (en este caso platino) para poder realizar un electrodo que ocupe la superficie del electrolito y que, por tanto, el precio será superior a si se emplea un electrodo de tamaño inferior o que al tratarse de un cátodo con un tamaño superior al de la superficie del baño electrolítico no va a caber en la celda electroquímica donde se lleva a cabo el proceso de fabricación.

El único caso práctico, aparte del expuesto al inicio de esta subsección, en el que se podría emplear un electrodo de estas proporciones sería si la disolución electrolítica ocupara todo el volumen disponible del recipiente de la celda. Pero dicho experimento sería más costoso no solo por emplear más electrolito sino porque también se estaría usando más platino para fabricar un electrodo más grande y parte de dicho material se estaría desperdiciando por fuera de la celda.

4.3.2 Menor

En contraposición, cuando se disminuye el tamaño del electrodo se espera obtener un resultado con una dispersión más esférica y que la mayor densidad de corriente se concentre en general en la parte justamente inferior a donde se encuentra posicionado el electrodo. Junto con ello, la distribución del potencial eléctrico se ve alterada ya que esta también se concentra entorno al electrodo como se visualiza en la figura 4.12.

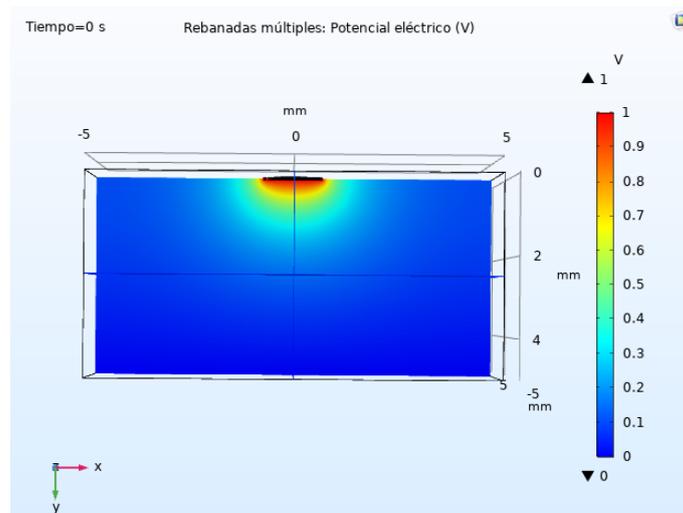


Figura 4.12: Distribución del potencial eléctrico cuando se emplea un electrodo de tamaño inferior al original.

Además, como el electrodo es de un tamaño inferior a la superficie de la oblea no llegará un valor de densidad de corriente tan elevado como en el caso anterior de tener un electrodo que cubra la superficie superior del electrolito.

Una de las ventajas respecto al supuesto anterior es que al usar un electrodo de un tamaño inferior no se necesita tanto material para fabricarlo y, por tanto, el experimento es más económico. Además, de ser un caso más realista.

En este supuesto sí que es de gran interés visualizar la dispersión de la densidad de corriente en la superficie de la oblea. Si se tienen en cuenta las figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 y 4.18 se extrae que siguen un mismo patrón. Este se caracteriza porque el ataque presenta una distribución concéntrica. Esto es que la zona central presenta una mayor densidad de corriente y disminuye conforme nos acercamos a los vértices de la oblea, lo cual es signo de un ataque no uniforme.

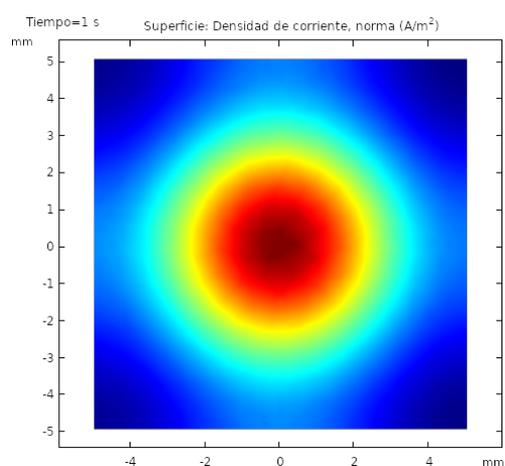


Figura 4.13: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones de tamaño inferior al original.

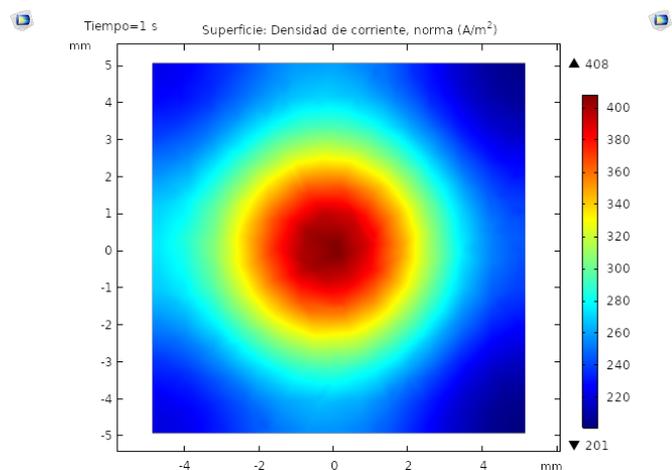


Figura 4.14: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones de tamaño inferior al original.

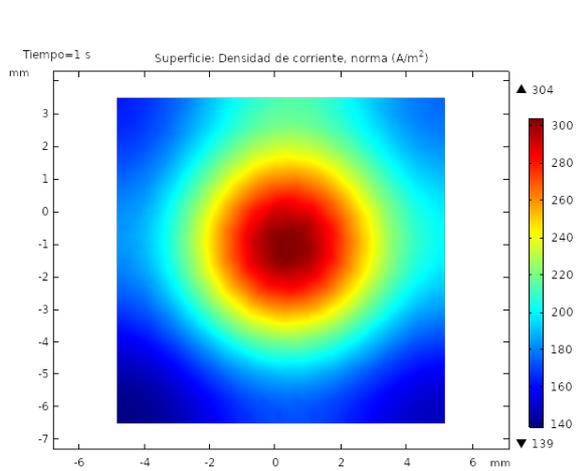


Figura 4.15: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones de tamaño inferior al original.

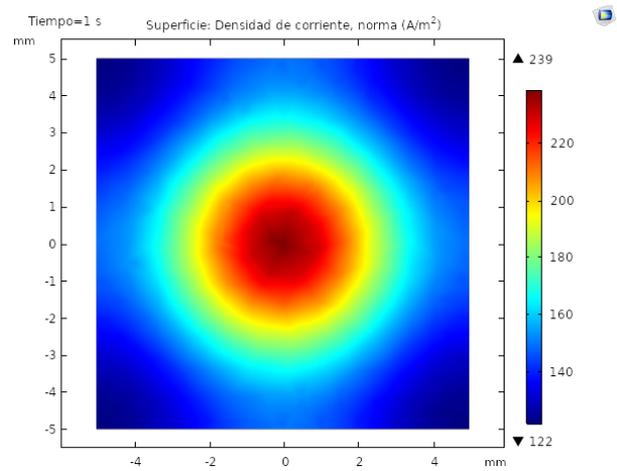


Figura 4.16: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas de tamaño inferior al original.

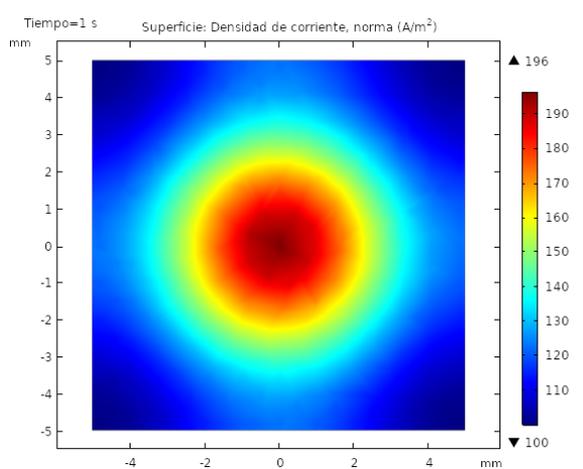


Figura 4.17: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada de tamaño inferior al original.

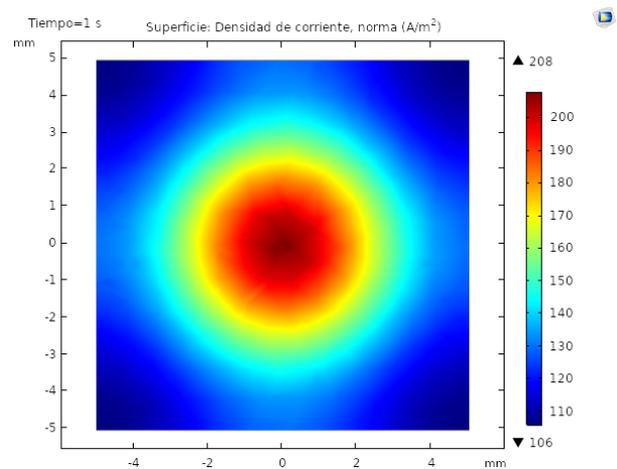


Figura 4.18: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas de tamaño inferior al original.

En la tabla 4.3 se aprecia que los rangos de valores de la relación entre el valor máximo de la densidad de corriente y el valor mínimo oscila entre valores cercanos a 1,948 y 3,924. En el conjunto de los casos en todos el factor aumenta respecto al caso de emplear un electrodo de un tamaño superior. Así aumenta la inhomogeneidad del ataque en la superficie de la oblea ya que se concentra en un espacio menor. Además, los valores máximos de la densidad de corriente de la superficie del silicio son mucho menores que cuando se emplea un electrodo de un tamaño superior.

Tabla 4.3: Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se emplean electrodos de tamaño menor.

Electrodo	$\frac{J_{max}}{J_{min}}$	$J_{max}(A/m^2)$
Espiral 3 revoluciones	2.187	304
Espiral 7 revoluciones	2.070	466
Espiral 10 revoluciones	1.948	408
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	1.962	230
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	3.924	196
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	1.971	208

Más concretamente, analizando el valor del cociente entre el valor máximo y el mínimo de la densidad de corriente, los cátodos que presentan valores inferiores y similares son los de la espiral de 10 revoluciones, la malla cuadrada con aberturas cuadradas y la malla cilíndrica con aberturas cilíndricas que tienen un factor entorno al 2. Ligeramente superior se encuentran los valores de las espirales de 3 y 7 revoluciones. En contraposición, el electrodo de malla cilíndrica con aberturas cuadradas es el que muestra una dispersión mayor alcanzando un cociente entre el valor de densidad máximo y mínimo de casi 4.

Del mismo modo, para apreciar de una mejor manera el rango de homogeneidad del ataque se estudian las gráficas lineales de cada caso en la figura 4.19. En esta se aprecia como la distribución en todos los casos es similar. Esta, como se ha mencionado, presenta una distribución esférica ya que tiene un máximo en la zona central coincidiendo en la posición del electrodo y conforme se acerca a los vértices de la oblea el valor de la densidad de corriente disminuye.

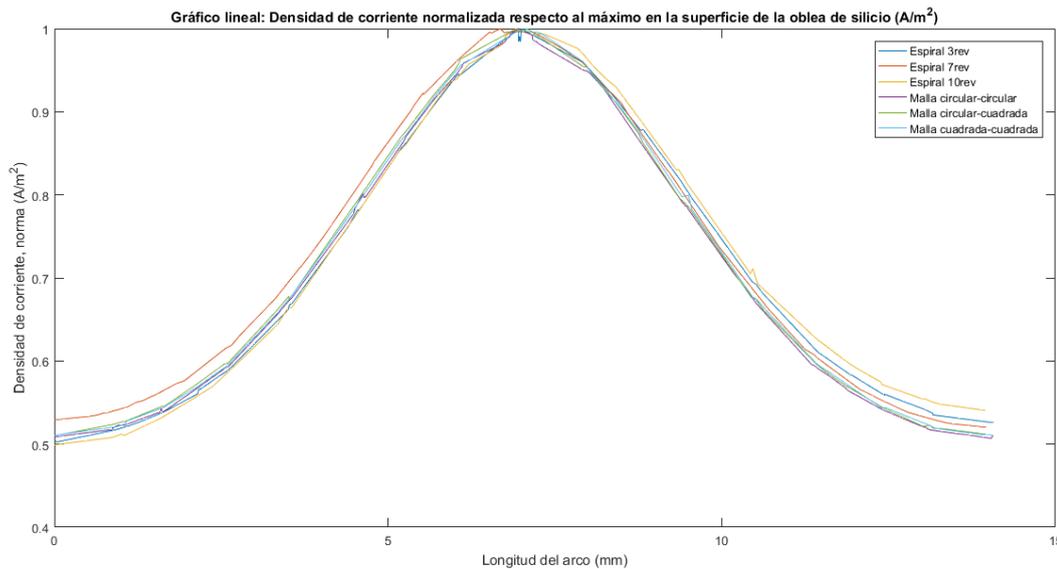


Figura 4.19: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando el tamaño disminuye a 1/4 del original.

En todos los casos el valor de densidad de corriente es considerablemente inferior a los supuestos anteriores debido a que al tratarse de un electrodo de un tamaño mucho inferior en comparación con la superficie de la oblea de silicio no se consigue realizar un ataque ni uniforme ni con la densidad de corriente necesaria para atacar la oblea de silicio.

4.4 Posición del electrodo

Un apartado clave es estudiar la manera en la que afecta la posición del electrodo. Los estudios presentados hasta el momento se han realizado con el electrodo posicionado en el centro de la superficie superior de la zona electrolítica.

De los gráficos lineales de las distribuciones de la densidad de corriente vistos en los apartados anteriores se extrae que estos presentaban un máximo en la zona central puesto que el cátodo se encontraba en esa zona. Debido a esto cabe esperar que si se desplaza la posición del electrodo a otra zona de la superficie se obtendrán un gráfico 2D y un gráfico lineal desplazados obteniendo el máximo de densidad de corriente en la parte inferior de donde se haya posicionado el electrodo.

Para realizar los distintos estudios se emplean los mismos componentes básicos, es decir, electrodos, zona electrolítica y oblea de silicio que los usados en el apartado 4.2 pero alterando la posición de los cátodos.

Se elige posicionar los electrodos en primer lugar en una esquina de la zona electrolítica y posteriormente desplazados ligeramente a un lateral.

Por una parte, cuando se posiciona el electrodo en un lateral en todos los gráficos 2D se puede observar como la mayor densidad de corriente se concentra en aquel lugar donde en la parte superior se encuentra el electrodo.

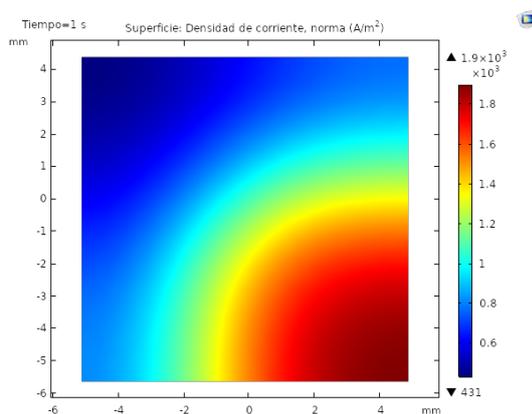


Figura 4.20: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espira de 7 revoluciones posicionado en un lateral.

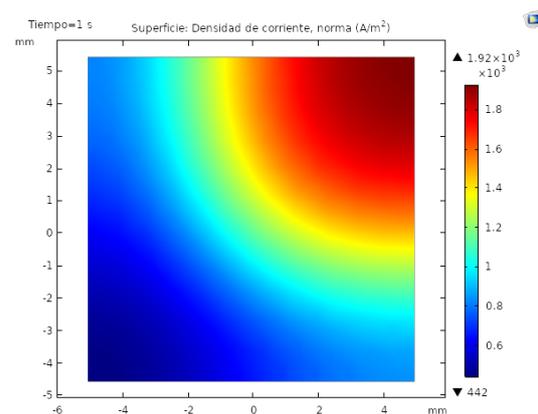


Figura 4.21: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espira de 10 revoluciones posicionado en un lateral.

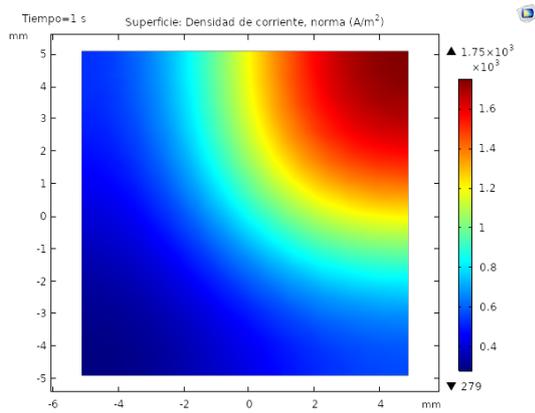


Figura 4.22: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espira de 3 revoluciones posicionado en un lateral.

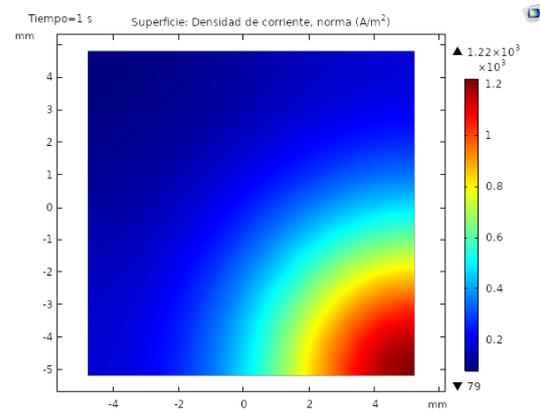


Figura 4.23: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas posicionado en un lateral.

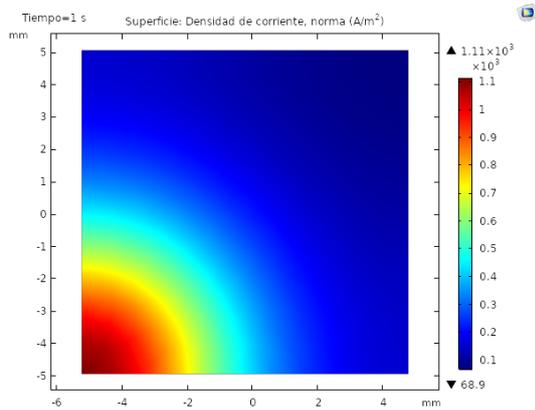


Figura 4.24: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada posicionado en un lateral.

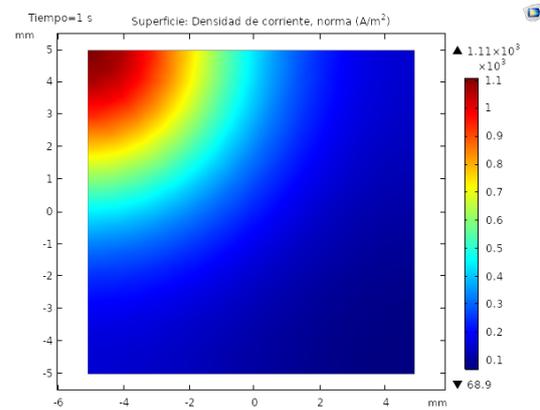


Figura 4.25: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas posicionado en un lateral.

De forma similar a estudios anteriores la distribución de la densidad de corriente es concéntrica disminuyendo bruscamente conforme se aleja de la posición del electrodo. De hecho la diferencia entre el valor máximo y mínimo es mucho más notoria que en los supuestos que el electrodo se encuentra posicionado en la zona central.

De hecho, si se analizan los gráficos lineales de la figura 4.26 que representan la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo, la gráfica es prácticamente una recta con una pendiente decreciente. Esto representa la disminución tan repentina que ocurre en función de la lejanía a la posición del electrodo. Sin embargo, en los electrodos en forma de espiral dicho decrecimiento es mucho más progresivo y menos brusco que en los electrodos en forma de malla. En consecuencia, el ataque será más uniforme en dichos supuestos.

No se observa ningún pico como máximo puesto que al encontrarse el electrodo en un extremo, el inicio de la gráfica coincide con la posición de este y, por tanto, es el máximo valor de la densidad de corriente.

Analizando las gráficas, cuando estas alcanzan una distancia de aproximadamente 10mm en diagonal de la zona donde está posicionado el electrodo, el valor de la pendiente es prácticamente cero. Es decir, a partir de esta distancia aunque se aleje más del electrodo no va a influir porque la densidad de corriente que va a afectar esa zona es la misma que para distancias ligeramente menores ya que no consigue llegar suficiente densidad de corriente y no podrá ser atacada.

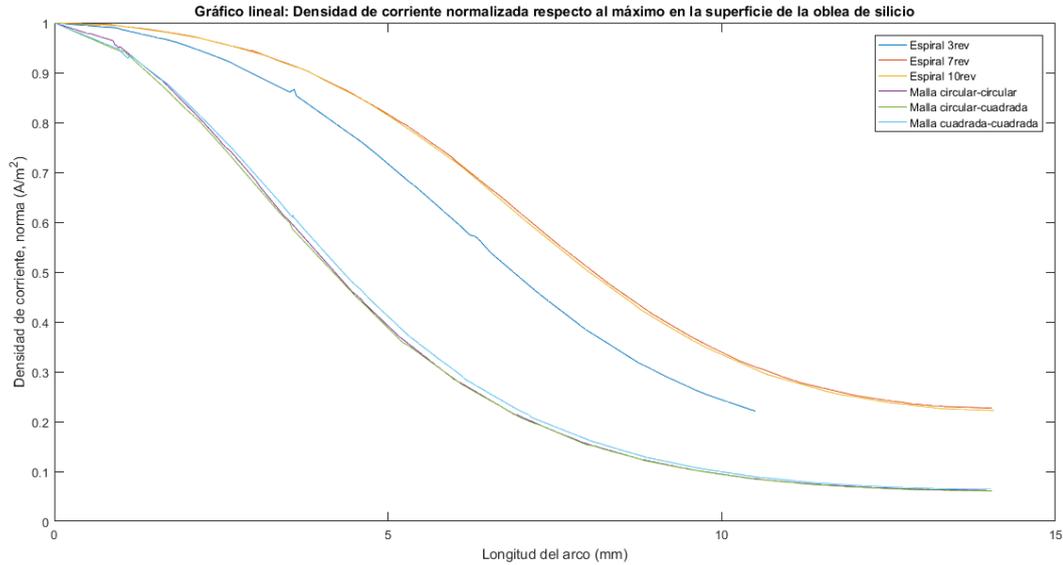


Figura 4.26: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando se posicionan en un lateral.

Respecto a las diferencias en la geometría de la distribución de la densidad de corriente entre los cátodos en forma de espiral y los de malla que se han observado en los gráficos 2D, es que mientras los segundos presentan una forma esférica los primeros tienden a una forma más cuadrada. En consecuencia, esto supone que una mayor superficie está siendo atacada con el mismo valor de densidad de corriente y que, por tanto, se obtiene una superficie más homogénea tal y como se aprecia en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando los electrodos se posicionan en un lateral.

Electrodo	$\frac{J_{max}}{J_{min}}$	$J_{max}(A/m^2)$
Espiral 3 revoluciones	6.423	1.75×10^3
Espiral 7 revoluciones	3.327	1.90×10^3
Espiral 10 revoluciones	3.265	1.92×10^3
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	15.297	1.22×10^3
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	16.110	1.11×10^3
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	15.031	1.11×10^3

Sin embargo, si se analizan los valores de los factores de dicha tabla 4.4 es notorio el aumento de la inhomogeneidad en el ataque de la superficie de la oblea de silicio en comparación con los otros estudios realizados modificando otros parámetros referentes al cátodo.

Por otra parte, puesto que se ha comprobado que posicionando en un extremo el electrodo la inhomogeneidad del ataque aumenta, se decide estudiar que ocurre si solo se desplaza ligeramente hacia un lateral.

En los gráficos 2D de dicho supuesto se observa como la distribución presenta una mayor uniformidad que en el caso del electrodo posicionado en un extremo de la zona electrolítica. Además, la variación entre el valor máximo y el mínimo ya no es tan elevada lo que implica, junto con los gráficos 2D, que la homogeneidad es mayor.

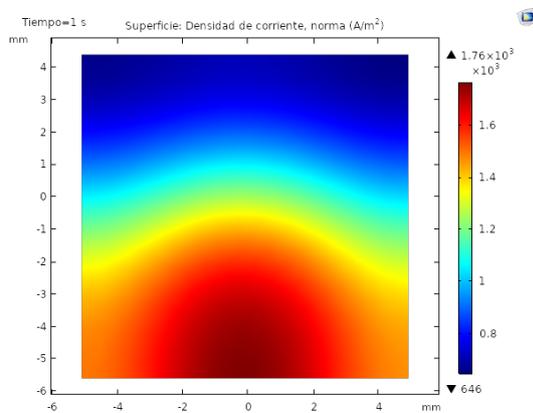


Figura 4.27: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones desplazado ligeramente a un lateral.

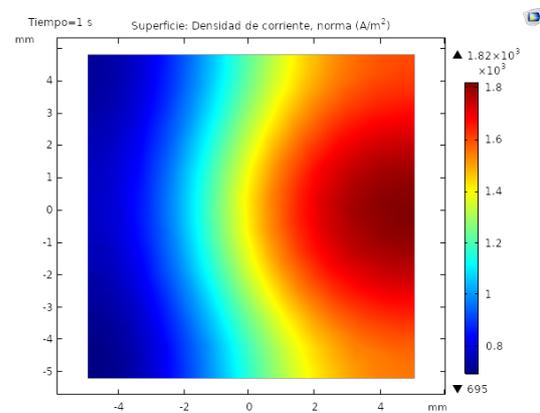


Figura 4.28: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones desplazado ligeramente a un lateral.

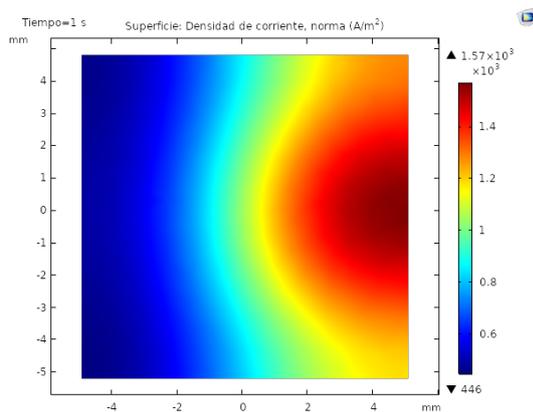


Figura 4.29: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones desplazado ligeramente a un lateral.

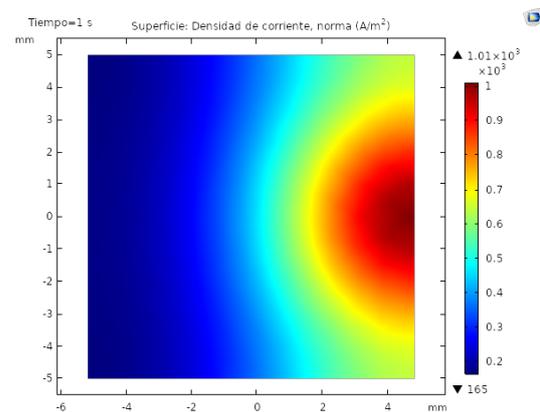


Figura 4.30: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas desplazado ligeramente a un lateral.

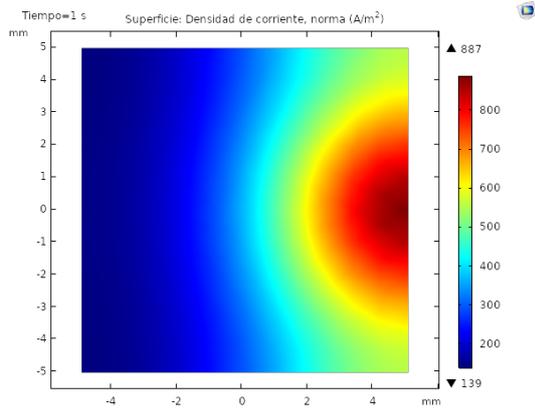


Figura 4.31: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadradas desplazado ligeramente a un lateral.

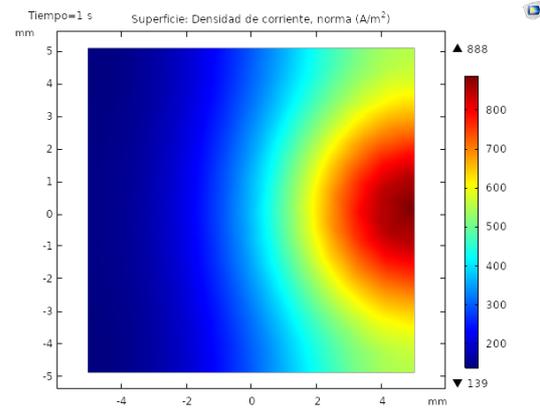


Figura 4.32: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas desplazado ligeramente a un lateral.

En contraposición al caso anterior, como el electrodo no se encuentra en el extremo de la zona electrolítica, en los gráficos lineales (figura 4.33) se vuelve a apreciar una zona con una mayor densidad de corriente que disminuye conforme se aleja de la posición del electrodo. Aunque este máximo se aprecia de una forma más tenue que en los casos anteriores proporcionando un ataque más uniforme que, por ejemplo, en el supuesto de posicionar el electrodo en el extremo de la superficie superior del baño electrolítico.

Sin embargo, esta zona no se encuentra en el centro sino que está ligeramente desplazada a un lateral correspondiendo con la actual posición del cátodo. Por tanto, la gráfica que se obtiene en este caso no es simétrica debido al desplazamiento de la posición del electrodo.

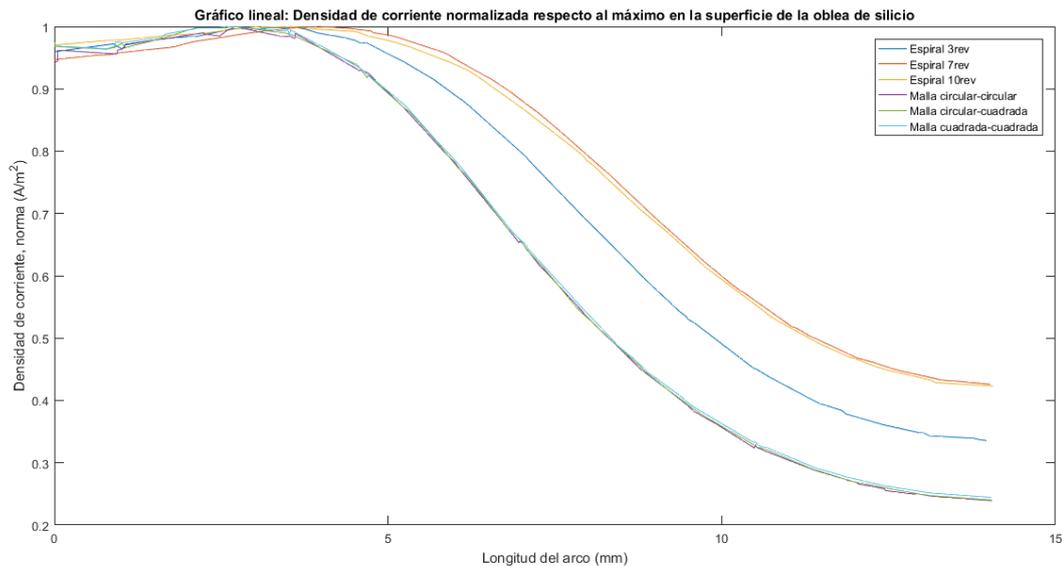


Figura 4.33: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando se posicionan ligeramente hacia un lateral.

De hecho, esta menor dispersión de la densidad de corriente se observa en la relación entre el valor máximo y mínimo de esta en la tabla 4.5. Los valores siguen siendo superior a los casos en que el electrodo se encontraba posicionado en la zona central pero es bastante inferior a cuando se ha desplazado a un lateral de la superficie del baño electrolítico.

En cambio, los valores máximos de la densidad de corriente de la superficie de la oblea de silicio sí que son similares a los de la sección 4.2 ya que el electrodo es el mismo pero posicionado ligeramente hacia un lateral. El valor que se observan en los gráficos 2D que ha variado es el de la densidad de corriente mínima ya que al encontrarse en un lateral el cátodo en la zona opuesta no llega la misma densidad de corriente que cuando se posicionaba en el centro.

Tabla 4.5: Factor de relación de homogeneidad y valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando los electrodos se posicionan ligeramente hacia un lateral.

Electrodo	$\frac{J_{max}}{J_{min}}$	$J_{max}(A/m^2)$
Espiral 3 revoluciones	3.528	1.57×10^3
Espiral 7 revoluciones	2.312	1.76×10^3
Espiral 10 revoluciones	2.217	1.92×10^3
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	4.561	1.02×10^3
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	4.107	997
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	4.178	998

Analizando con más detenimiento los resultados obtenidos en este apartado se puede deducir que los electrodos en forma de espiral de 7 y 10 revoluciones presentan una mayor tolerancia a desviaciones de la posición del electrodo ya que consiguen dar factores de homogeneidad relativamente inferiores aunque el cátodo no se encuentre posicionado en el centro de la zona superior del baño electrolítico.

4.5 Distancia entre el electrodo y la oblea de silicio

En los apartados anteriores 4.2, 4.3 y 4.4 se han variado distintos aspectos del electrodo. No obstante, una parte fundamental es ver cómo afecta la distancia a la que se encuentran el cátodo y la oblea de silicio.

Con este propósito se varía la altura del bloque que ocupa el electrolito para que de este modo la distancia entre el electrodo y la superficie de la oblea aumente o disminuya. Se ha elegido este método puesto que se han probado distintos pero se ha comprobado que este era el más efectivo para esta clase de estudio.

Cabe esperar que cuando la distancia entre ambos componentes sea más elevada el ataque será más uniforme y homogéneo aunque la densidad de corriente que llegue no presente un valor muy grande. En cambio, si se parte de una distancia muy pequeña, el electrodo atacará de una manera muy intensa la zona más próxima a él pero no conseguirá atacar de una manera similar las partes que queden más alejadas de este. Es por ello que cabe esperar tener una zona con una alta densidad de corriente justo donde esté posicionado el electrodo y que de forma concéntrica la

densidad de corriente disminuya de manera brusca y muy considerable, dando lugar a zonas de la oblea atacadas de distinta manera y que, por tanto, presentaran estructuras porosas diferentes.

Tras diversos estudios realizados variando la distancia y teniendo en cuenta que la empleada en los otros apartados es de 5mm, se elige mostrar en este trabajo los resultados obtenidos cuando la distancia es 1.5mm (figura 4.34) y 15mm (figura 4.35). Se han seleccionado estas alturas para el bloque formado por el electrolito puesto que los resultados obtenidos con ellas son representativos. Por ejemplo, con una altura de 15 mm ya se consigue un ataque relativamente homogéneo para los distintos electrodos y aumentar la distancia solo influye en que la densidad de corriente que es capaz de atacar la superficie de la oblea de silicio va disminuyendo conforme la distancia es mayor. Además, de que esto supondría disponer de una celda electroquímica que permitiera aumentar en más proporción la distancia entre estos dos componentes.

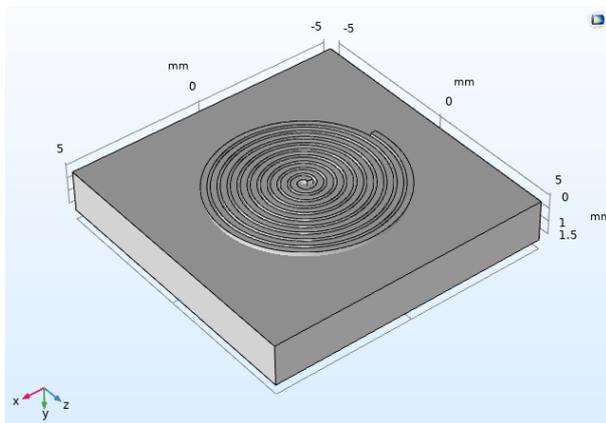


Figura 4.34: Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 1.5mm.

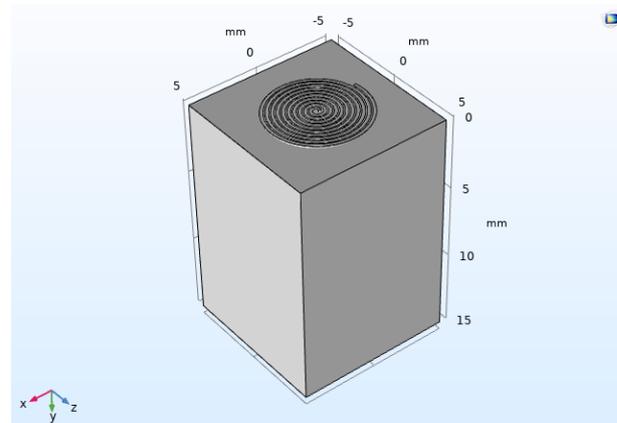


Figura 4.35: Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 15mm.

Es primer lugar, se compara como varía la distribución de la densidad de corriente cuando la distancia es de 1.5mm como se ha especificado (figuras 4.36, 4.38, 4.40, 4.42, 4.44 y 4.46) y cuando esta es de 15mm (figuras 4.37, 4.39, 4.41, 4.43, 4.45 y 4.47) en los gráficos 2D de la superficie de la oblea.

El análisis de los gráficos 2D permite observar claramente las diferencias en la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea dependiendo de cuál sea la distancia entre el electrodo y el silicio.

En primer lugar, cuando la distancia es inferior se obtiene una distribución marcadamente esférica que da lugar a una concentración elevada de densidad de corriente en una zona pequeña central provocando que en zonas más alejadas no llegue suficiente densidad de corriente y que, por ende, no se consiga un ataque uniforme a lo largo de la superficie de la oblea de silicio.

En contraposición, en los casos donde la distancia es más elevada sí que se consigue alcanzar un ataque sobre la oblea de silicio homogéneo. Sin embargo, el valor de la densidad de corriente que ataca dicha superficie presenta valores mucho más pequeños debido al aumento de la distancia. Esto hay que tenerlo en cuenta ya que aunque con alturas superiores se consigue un ataque

uniforme, si se aumenta demasiado puede no llegar a la oblea la suficiente densidad de corriente para obtener estructuras porosas.

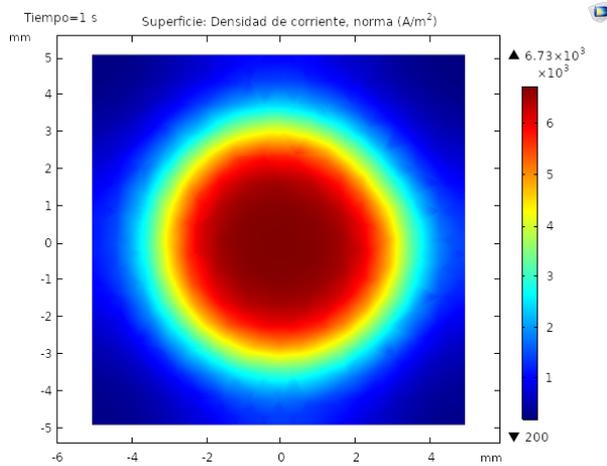


Figura 4.36: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.

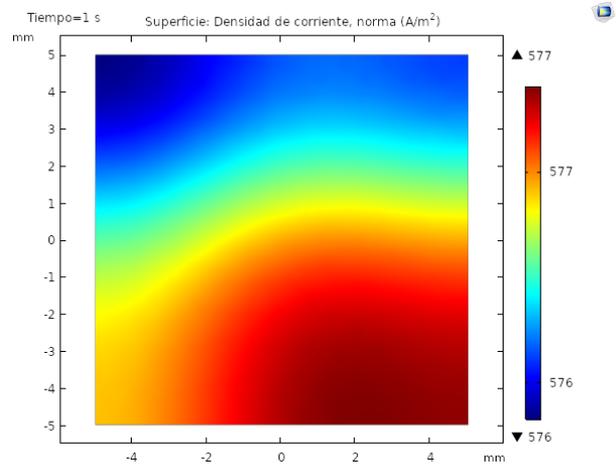


Figura 4.37: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 7 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.

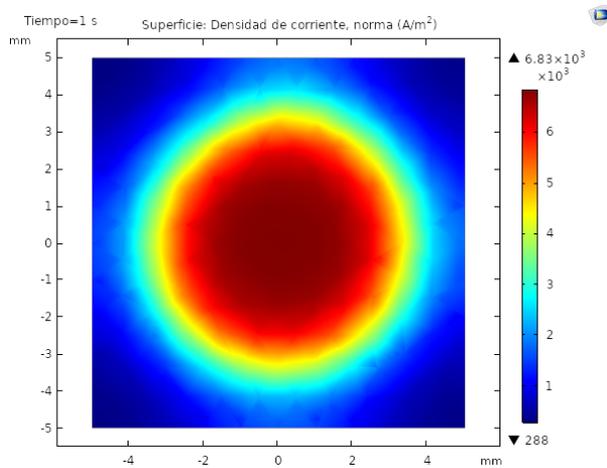


Figura 4.38: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.

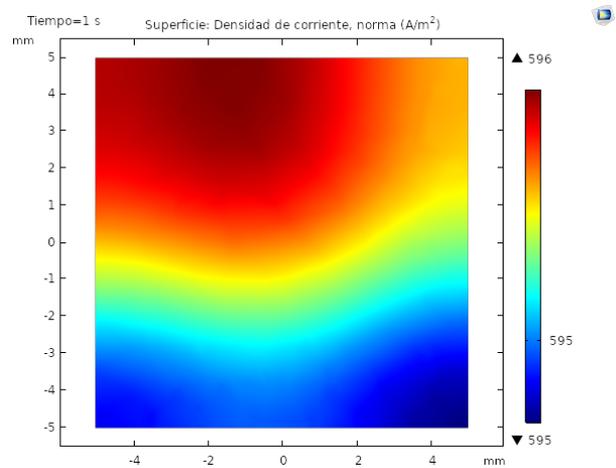


Figura 4.39: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 10 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.

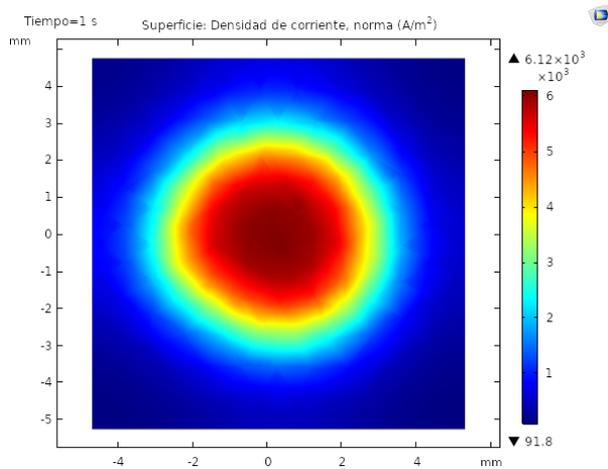


Figura 4.40: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una una espiral de 3 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.

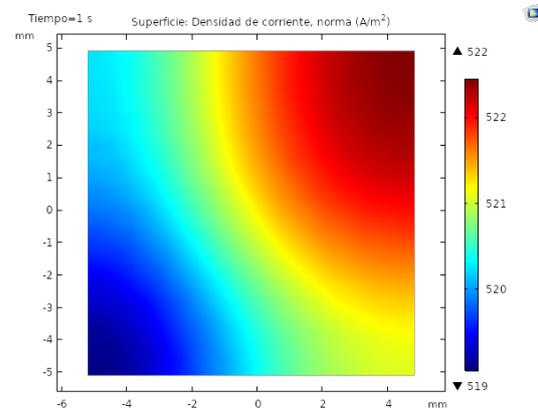


Figura 4.41: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una espiral de 3 revoluciones y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.

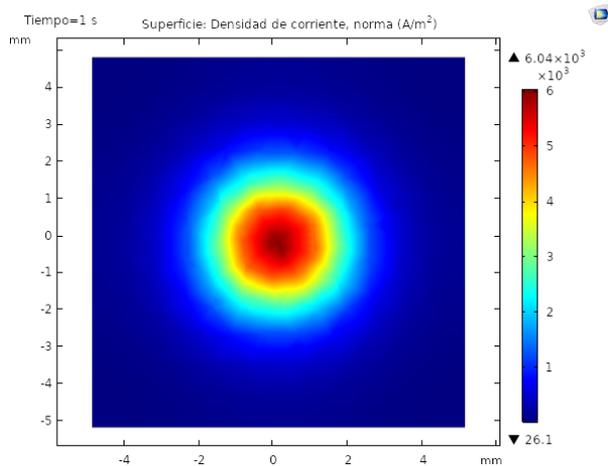


Figura 4.42: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.

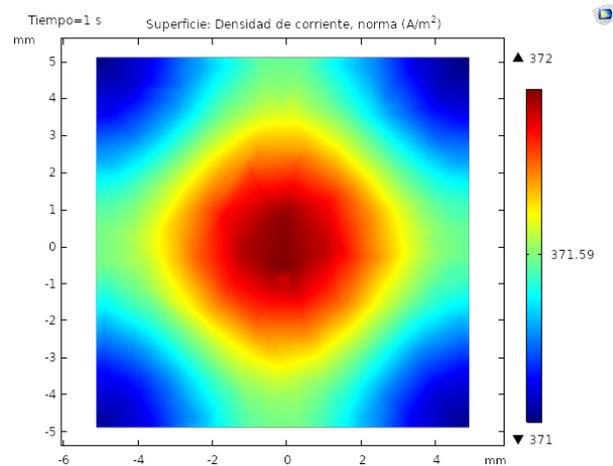


Figura 4.43: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cuadrada y con las cavidades cuadradas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.

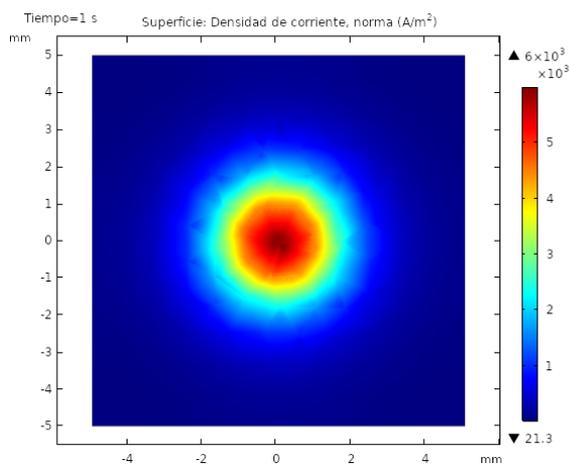


Figura 4.44: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.

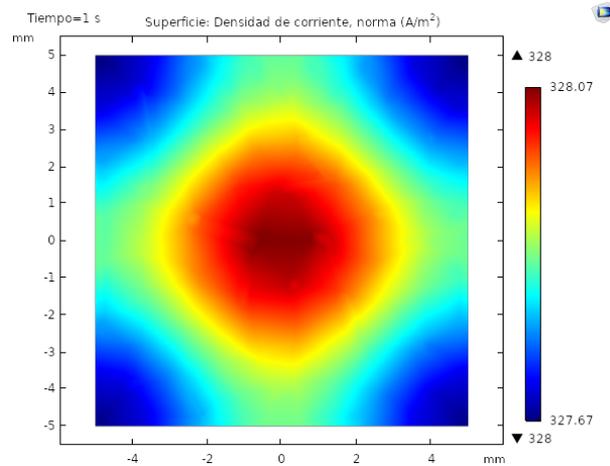


Figura 4.45: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.

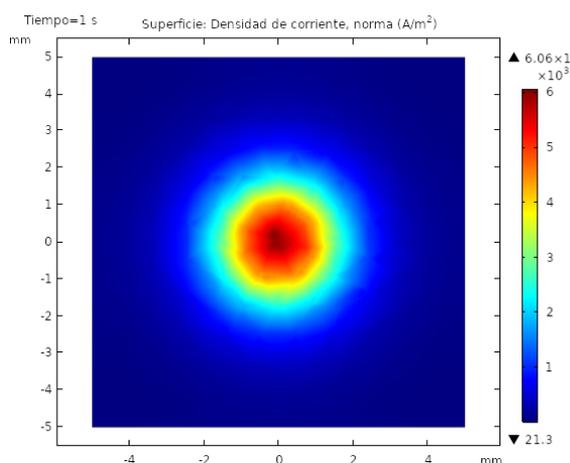


Figura 4.46: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 1.5mm.

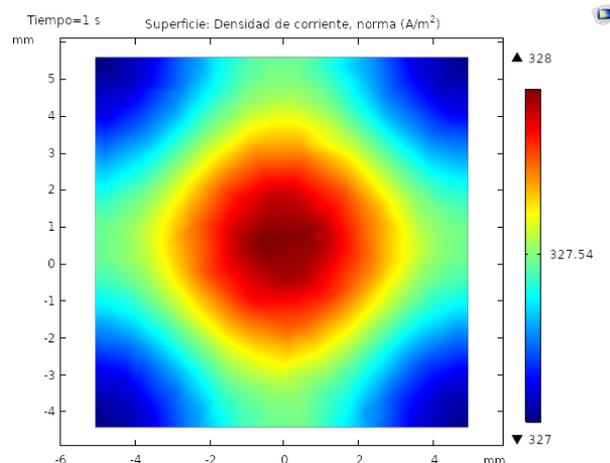


Figura 4.47: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas y la distancia entre dicho cátodo y la oblea es de 15mm.

Del mismo modo, a continuación, se estudian los gráficos lineales. Estos corroboran lo expuesto anteriormente ya que en la figura 4.48 se muestran los resultados obtenidos referentes a la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en cada electrodo cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 15mm, se aprecia como en todos los casos, exceptuando la espiral de 3 revoluciones, se obtiene una recta prácticamente horizontal, es decir, el valor de la densidad de corriente es el mismo a lo largo de toda la superficie de la oblea. Por tanto, se consigue un ataque con un mayor grado de homogeneidad pero con densidades de corriente inferiores a casos anteriores.

Cabe destacar que aunque se consigan obtener distribuciones de densidad de corriente relativamente uniformes a lo largo de toda la superficie de la oblea de silicio, todavía se puede observar la existencia de un ligero máximo en la zona central. Del mismo modo que ocurría en supuestos anteriores este surge en la parte inferior de la posición del cátodo.

Respecto a la variación mayor que ocurre en el caso del electrodo en forma de espiral de 3 revoluciones tampoco es muy relevante. Teniendo en cuenta que el eje y representa la densidad de corriente en la superficie de la oblea en un rango de valores entre 0 y 1, puesto que el valor se encuentra normalizado respecto al máximo, dicha variación es de aproximadamente 0.006. Por tanto, aunque en la gráfica parezca que existe una gran fluctuación en el caso de este electrodo tampoco da resultados deficientes. Probablemente esto se deba a que al tratarse de una espiral de solo 3 revoluciones y un paso de rosca relativamente grande, no consiga ser un electrodo suficientemente compacto y denso. Esto conlleva un menor grado de homogeneidad en el ataque de la oblea de silicio. Un resultado similar también se ha obtenido en la subsección 4.3.1 debido al mismo motivo.

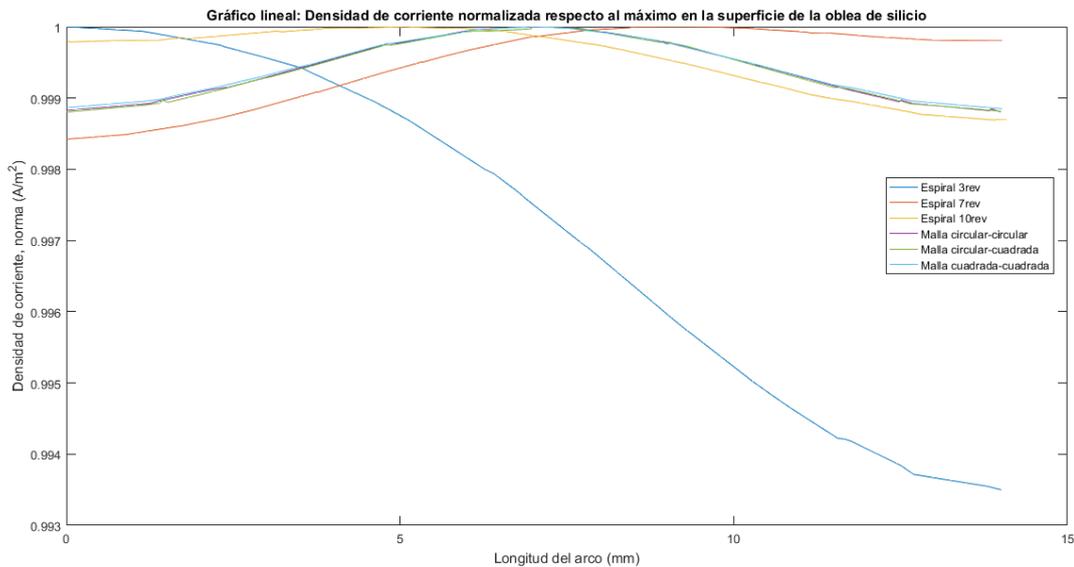


Figura 4.48: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 15mm.

Por otro lado, en la figura 4.49 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones en las que la distancia entre estos dos componentes es de 1.5mm. Tal y como se ha mencionado anteriormente se observa un máximo en el centro central correspondiente a la zona justamente inferior de la posición del electrodo y cómo los valores de la densidad de corriente disminuyen bruscamente conforme se alejan de esta zona central.

Además, en esta gráfica se aprecia como los cátodos en forma de espiral no presentan un máximo tan pronunciado como en el caso de las mallas. Esto se puede corresponder a que estos muestran una distribución más cuadrada que la distribución en el caso de las mallas que es puramente esférica. Por tanto, aunque en estos supuestos no se obtendrían ataques homogéneos sí que la

variación entre estas dos clases de geometrías de electrodos, en el caso de las espirales es menos brusca.

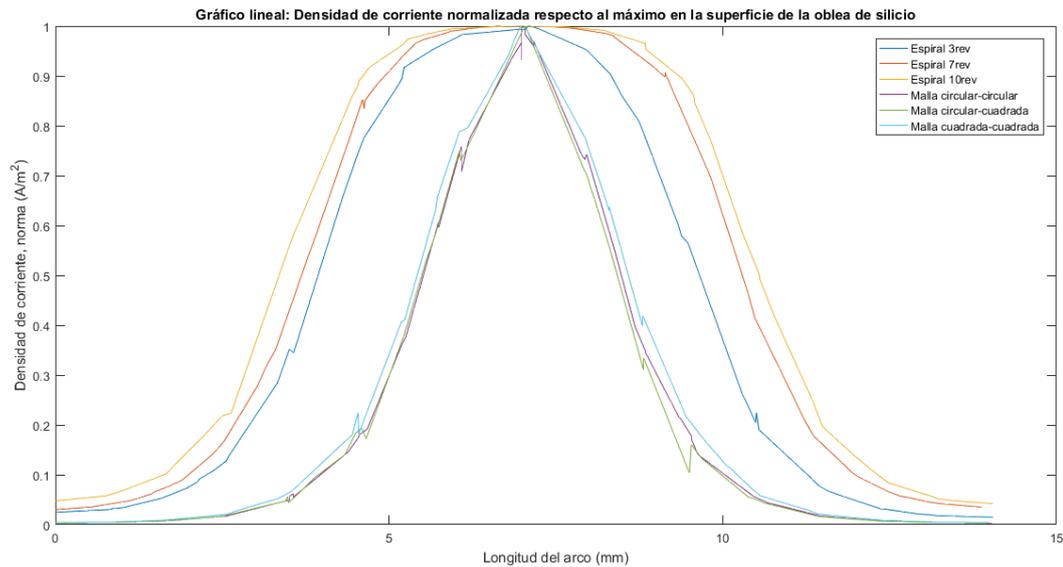


Figura 4.49: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente normalizada respecto al máximo en la superficie de la oblea de los distintos electrodos cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es de 1,5mm.

Del modo en el que se aprecia en la tabla 4.6 la homogeneidad del ataque electroquímico sobre la superficie de la oblea de silicio aumenta conforme se aumenta la distancia entre el electrodo y dicha oblea.

La diferencia de factor que existe entre la distancia de 1.5mm y 5mm es mucho más notoria que la que se obtiene cuando de una distancia de 5mm se aumenta a una de 15mm. Esto supone que el efecto de aumentar la distancia en alturas menores influye más en cómo de homogéneo va a resultar el ataque que en el caso de distancias mayores donde ligeras variaciones no son tan notorias.

Tabla 4.6: Factor de relación de homogeneidad de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se varía la distancia entre el electrodo y dicha oblea.

Electrodo	$\frac{J_{max}}{J_{min}}$		
	1.5mm	5mm	15mm
Espiral 3 revoluciones	66.292	1.654	1.006
Espiral 7 revoluciones	32.452	1.446	1.002
Espiral 10 revoluciones	24.657	1.390	1.002
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	237.242	1.843	1.003
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	309.249	1.885	1.003
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	295.708	1.879	1.001

Por otra parte, la alteración en el valor máximo de la densidad de corriente en cada caso se muestra en la tabla 4.7. Como era esperable los valores más elevados se ocurren cuando la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es menor ya que son inversamente proporcionales.

Tabla 4.7: Valor máximo de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando se varía la distancia entre el electrodo y dicha oblea.

Electrodo	$J_{max}(A/m^2)$		
	1.5mm	5mm	15mm
Espiral 3 revoluciones	6.12×10^3	1.37×10^3	522
Espiral 7 revoluciones	6.72×10^3	1.62×10^3	577
Espiral 10 revoluciones	6.92×10^3	1.71×10^3	596
Malla cuadrada con aberturas cuadradas	6.04×10^3	833	272
Malla cilíndrica con aberturas cuadradas	6.00×10^3	699	328
Malla cilíndrica con aberturas cilíndricas	6.06×10^3	733	328

En conjunto si se analiza la tabla 4.6 y la tabla 4.7 el cátodo que mejores resultados ofrece en las distintas alturas es la espiral de 10 revoluciones.

Por otra parte, se ha apreciado como la ligera diferencia de tamaño entre los distintos electrodos, principalmente entre las espirales y las mallas de hilo de platino, afecta al resultado de la manera en la que se distribuye la densidad de corriente en la superficie de la oblea. Debido a esto, es interesante estudiar cómo se ve afectada la homogeneidad del ataque cuando el electrodo no se posiciona en la zona central sino que se desplaza ligeramente a un lateral como ocurre en el apartado 4.4.

Los resultados obtenidos para los distintos electrodos siguen el mismo esquema. Por ejemplo, si se toman como referencia los gráficos de la distribución empleando el electrodo de malla de hilo de platino que es cilíndrico con cavidades cilíndricas se observa en la figura 4.44 como cuando la distancia es de 1.5mm se aprecia perfectamente la posición del electrodo (lateral izquierdo). Del mismo modo que ocurre en los casos expuestos anteriormente, existe una zona central con una elevada densidad de corriente que decrece rápidamente conforme se aumenta la distancia. En la mayoría de la superficie de la oblea el valor de la densidad de corriente es casi nulo.

De esto modo, se puede determinar que a distancias pequeñas los efectos de cualquier cambio en los parámetros afecta en una mayor proporción a la distribución de la densidad de corriente que si se producen los mismos cambios a distancias superiores.

En contraposición, en el caso de cuando la distancia es de 15mm el valor de densidad de corriente es similar a lo largo de la superficie de la oblea (figura 4.45). Sin embargo, aunque el ataque que se consigue lograr es bastante homogéneo no lo es tanto como en el caso de cuando el electrodo se encuentra posicionado en la zona central. Esto se debe a que cuando el cátodo se encuentra en el centro, en general, las zonas más alejadas son equidistantes y les llegará la misma densidad de corriente. En cambio, cuando el cátodo se posiciona en un lateral, el otro lateral se encuentra más alejado del electrodo que en el caso de cuando está posicionado en la zona central. Por tanto, la densidad de corriente que le llega presenta un valor menor y el ataque no es tan uniforme.

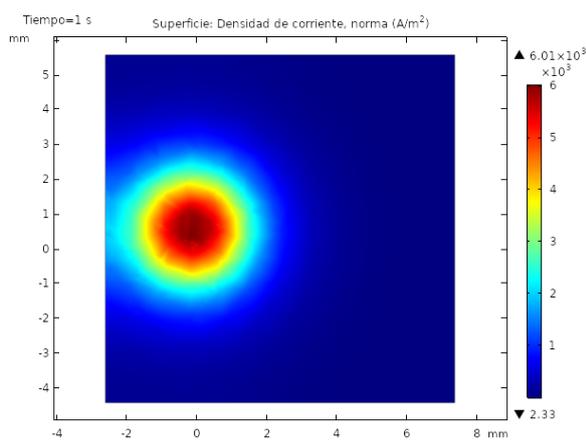


Figura 4.50: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cuadrada a una distancia entre el cátodo y la oblea de 1.5mm y cuya posición esta desplazada ligermanete a un lateral.

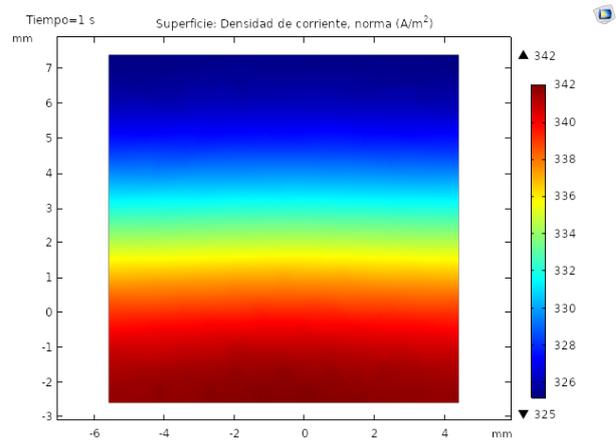


Figura 4.51: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando el electrodo es una malla de hilo de platino de forma cilíndrica y con las cavidades cilíndricas a una distancia entre el cátodo y la oblea de 15mm y cuya posición esta desplazada ligermanete a un lateral.

4.6 Resistividad que presenta la oblea de silicio

En los apartados anteriores se ha estudiado cómo influye en la distribución de la densidad de corriente si se varían aspectos relacionados con el propio electrodo o la distancia entre este y la oblea de silicio.

La resistividad que presente la oblea influye en la formación de los poros que se obtienen en el proceso de fabricación del silicio poroso. No obstante, en este apartado se va a estudiar si esta influye en la distribución de la densidad de corriente que afecta en el ataque a la oblea.

Con la intención de estudiar esta posible influencia se seleccionan tres valores de resistividad distintos:

- $1 \text{ m}\Omega \times \text{cm}$.
- $10 \text{ m}\Omega \times \text{cm}$.
- $10 \Omega \times \text{cm}$.

En el apartado de materiales del software COMSOL Multiphysics, se selecciona el material cuya resistividad se quiere modificar. Esta es una propiedad que no se encontraba predefinida en el material así que se ha tenido que definir al principio de los estudios.

Para las otras simulaciones realizadas se ha tenido en cuenta una resistividad de $10 \Omega \times \text{cm}$. Por ello, se estudia si disminuyendo la resistividad de la oblea la distribución de la densidad de corriente en esta se ve afectada. En principio, cabría esperar que esta fuese mayor ya que la oblea no opone una resistencia tan elevada como en los supuestos analizados.

Una vez realizados los distintos estudios para cada resistividad se obtiene que la distribución de la densidad de corriente y el valor de esta son los mismos que en los casos anteriores. Es decir,

según estos la resistividad que presente la oblea no influye en como de homogéneo y uniforme va a ser el ataque en la superficie de la oblea empleada.

De forma ilustrativa, se muestran los resultados obtenidos, por ejemplo, cuando se ha empleado un cátodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas. Como se aprecia en las figuras 4.52, 4.53 y 4.54 tanto la distribución como los valores de la densidad de corriente son los mismos independientemente del valor de resistividad que presente la oblea de silicio.

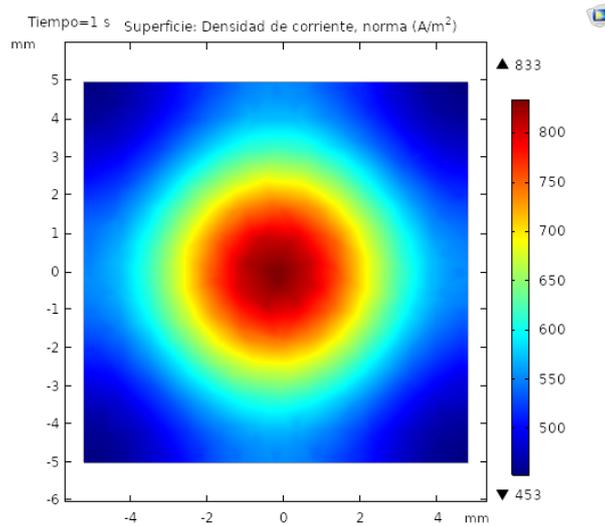


Figura 4.52: Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuya resistividad es de $1 \text{ m}\Omega \times \text{cm}$ y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.

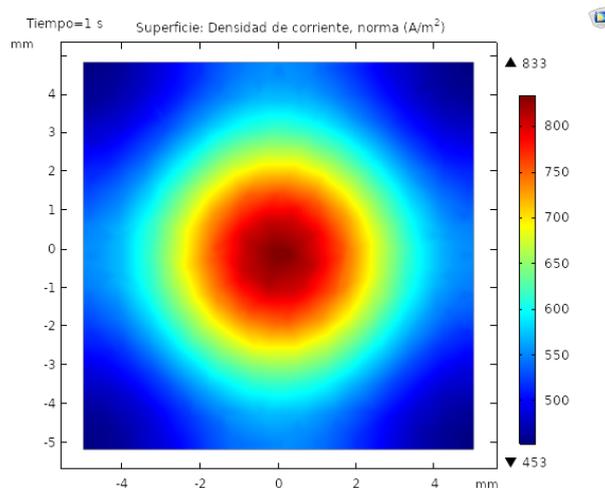


Figura 4.53: Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuya resistividad es de $10 \text{ m}\Omega \times \text{cm}$ y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.

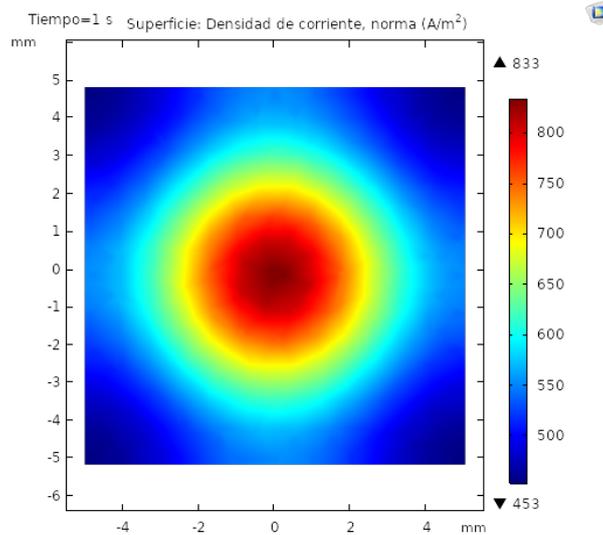


Figura 4.54: Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuya resistividad es de $10 \Omega \cdot \text{cm}$ y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.

Cabe mencionar que estos resultados, referentes a que la resistividad de la oblea de silicio no influye en la distribución de la densidad de corriente en la superficie de esta, pueden deberse al hecho de que en el modelo que se está empleando solo se ha tenido en cuenta la superficie de la oblea y no todo un bloque que la represente. Por tanto, si se considerara la oblea de silicio como un bloque de un determinado espesor probablemente sí que se obtendrían resultados favorables a que la resistividad, en efecto, contribuye a la homogeneidad del ataque tal y como se ha comentado en el Capítulo 2.

4.7 Tipo de oblea de silicio

Del mismo modo que en el apartado 4.6 se modifica un aspecto relacionado con la oblea de silicio que es atacada. En este caso se varía el material de la oblea dependiendo si esta está dopada positivamente (tipo p) o negativamente (tipo n). En los distintos estudios realizados hasta el momento se ha empleado una oblea de p-Silicio pero ahora se va a comprobar si se obtiene la misma distribución de la densidad de corriente si se emplea una oblea de n-Silicio.

Las especificaciones de ambos materiales vienen predefinidas en el programa pero se pueden añadir más propiedades del material si estas no vienen definidas en la librería propia del software. Se puede dar el caso de que no vengan predefinidas algunas propiedades que se tengan que tener en cuenta en los estudios pero se pueden añadir manualmente como se ha realizado con la resistividad. Esto se debe a que los materiales se pueden haber definido para una física en concreto y que para otras no se disponga de todas las propiedades para otra física (en este supuesto la física de corrientes eléctricas).

Contenido de material					
Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad	
Densidad	rho	2330[kg/...	kg/m ³	Basic	
Permitividad relativa	epsilon_r...	4.5	1	Basic	
Conductividad eléctrica	sigma_i...	sigma0(n...	S/m	Basic	
Resistividad	res_iso ;...	0.001	Ω·m	Basic	
Matriz de elasticidad	{D11, D...	{166[GPa]...	Pa	Anisotrópico	
Factor de pérdida de matriz de elas...	eta_D_is...	0	1	Anisotrópico	
Matriz de elasticidad, notación de V...	{DVo11,...	{166[GPa]...	Pa	Anisotrópico, notación de Voi...	
Factor de pérdida de matriz de elas...	eta_DVo...	0	1	Anisotrópico, notación de Voi...	
Matriz de acoplamiento piezoresisti...	{Pii11, P...	{-102.2e-1...	m ⁴ /(s·A ²)	Forma Piezo-resistiva	
Matriz de acoplamiento elastoresist...	{ml11,...	{-101.4/si...	Ω·m	Elastoresistance form	

Figura 4.55: Propiedades del material n-Silicon (single-crystal, lightly doped).

Contenido de material					
Propiedad	Variable	Valor	Unidad	Grupo de propiedad	
Densidad	rho	2330[kg/m...	kg/m ³	Basic	
Permitividad relativa	epsilon_r...	4.5	1	Basic	
Conductividad eléctrica	sigma_is...	sigma0(nd[...	S/m	Basic	
Resistividad	res_iso ; r...	0.01	Ω·m	Basic	
Matriz de elasticidad	{D11, D1...	{166[GPa]...	Pa	Anisotrópico	
Factor de pérdida de matriz de elastici...	eta_D_iso...	0	1	Anisotrópico	
Matriz de elasticidad, notación de Voigt	{DVo11,...	{166[GPa]...	Pa	Anisotrópico, notación de Voigt	
Factor de pérdida de matriz de elastici...	eta_DVo_...	0	1	Anisotrópico, notación de Voigt	
Matriz de acoplamiento piezoresistivo	{Pii11, Pii...	{6.6e-11[1/...	m ⁴ /(s·A ²)	Forma Piezo-resistiva	
Matriz de acoplamiento elastoresistivo	{ml11, m...	{9.6/sigma0...	Ω·m	Elastoresistance form	

Figura 4.56: Propiedades del material p-Silicon (single-crystal, lightly doped).

Tras realizar las distintas simulaciones con la oblea de n-Silicio teniendo en cuenta los diferentes electrodos, tamaño, posición de estos y la distancia entre este y la oblea de silicio, se ha comprobado que los resultados obtenidos son los mismos que cuando se han realizado atacando una oblea de p-Silicio.

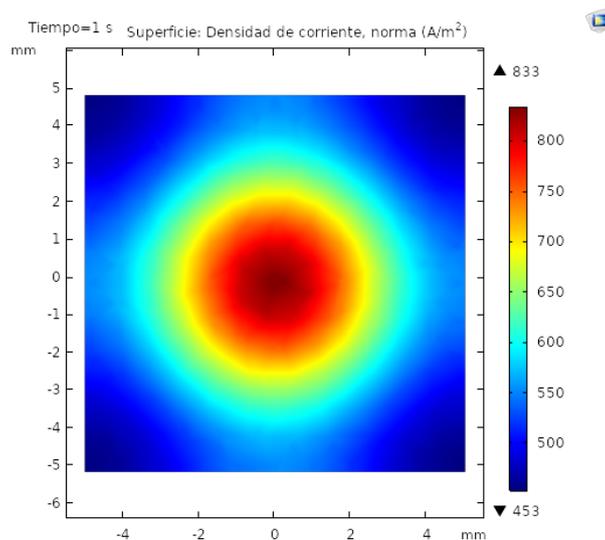


Figura 4.57: Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de n-silicio y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.

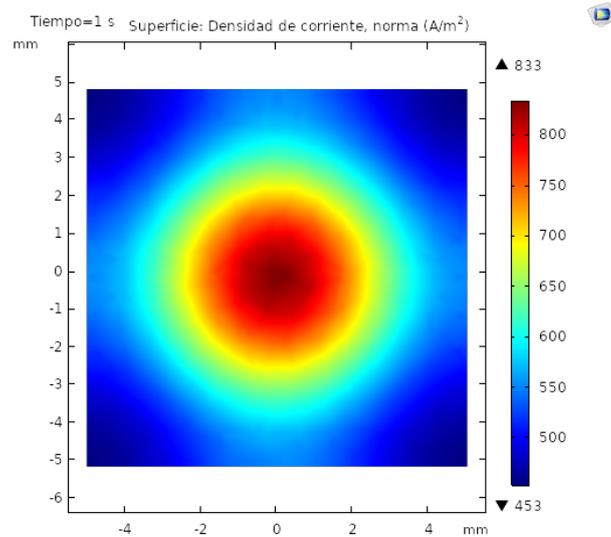


Figura 4.58: Gráfico 2D de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de p-silicio y se emplea un electrodo de malla de hilo de platino cuadrada con cavidades cuadradas.

En consecuencia, teniendo presentes los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas con este modelo no se puede corroborar que el tipo de oblea, ya sea dopada positivamente (p-Silicio) o negativamente (n-Silicio), influya en la distribución de la densidad de corriente en la superficie de esta.

Propuesta de estudio

5.1 Introducción

En el Capítulo 4 se han analizado algunos de los distintos factores que influyen en el proceso de fabricación del silicio poroso. Sin embargo, estos han sido estudiados de forma independiente los unos de los otros. Es por ello, que es interesante que con la información obtenida en dicho capítulo se sugiera y se analice una propuesta de estudio que combine los factores expuestos anteriormente.

Los parámetros y consideraciones que se tienen en cuenta son los siguientes:

- Geometría del electrodo. En general, en el conjunto de los estudios realizados el cátodo que mejores resultados ha obtenido es la espiral de 10 revoluciones. En consecuencia, es esta geometría la que se va a emplear en la propuesta.
- Tamaño del electrodo. Se ha comprobado en la sección 4.3 que los electrodos que presentan un tamaño mayor y similar al que ocupa la superficie superior de la zona electrolítica dan un resultado más homogéneo. Hay que tener en cuenta que si se pretende realizar un estudio realista que después se pueda llevar a cabo experimentalmente en un laboratorio, el tamaño del electrodo no puede ser más grande que la superficie superior de la zona electrolítica ya que no cabría en el recipiente de la celda electroquímica.
- Posición del electrodo. En la sección 4.4 se ha demostrado como conforme se aleja la posición del electrodo de la zona central, la homogeneidad del ataque disminuye. Es por ello, que el electrodo estará posicionado en el centro de la superficie superior del baño electrolítico.
- Distancia entre el electrodo y la oblea de silicio. Tras analizar los gráficos obtenidos en la sección 4.5 los resultados más acordes con el objetivo de homogeneizar el proceso de fabricación del silicio poroso son aquellos en que la distancia entre el electrodo y la oblea de silicio es mayor. En todo momento se tendrá en consideración que esta tampoco puede ser muy elevada ya que sino no llegará suficiente densidad de corriente a la superficie para realizar el ataque.

5.2 Estudio

5.2.1 Especificaciones

Una vez se han especificado en la sección 5.1 las consideraciones que se van a tener presentes en la sugerencia de estudio tras analizar los resultados obtenidos en el Capítulo 4 se procede a determinar aquellos parámetros que se han demostrado que no influyen de una manera tan notoria en la distribución pero que son esenciales en el proceso y se procederá a explicar con más detenimiento algunos de los expuestos en dicho apartado anterior.

En primer lugar, si se analizan los estudios, las dos geometrías que en general han dado ataques con una distribución de la densidad de corriente más uniforme son la espiral de radio de 0.2 mm, 10 revoluciones y un paso de rosca de 0.3mm y la malla de hilo de platino de forma global y patrón cuadrados. Por tanto, ya que ambos electrodos han dado resultados óptimos se selecciona el electrodo en forma de espiral puesto que en los experimentos llevados a cabo en el NTC se suele emplear este tipo de geometría tal y como se ha especificado en la sección 5.1.

En segundo lugar, los aspectos relacionados con la oblea de silicio, tales como la resistividad o el tipo de dopado de la oblea, resultaron no determinantes en la homogeneidad del proceso de fabricación. En consecuencia, los valores que se van a emplear en el presente estudio son los mismos que se han empleado en la mayoría de simulaciones recreadas en el Capítulo 4.

Tabla 5.1: Elección de parámetros para el estudio propuesto.

	Factor	Selección
	Geometría del electrodo:	Espiral de 10 rev.
	Tamaño del electrodo:	[1, 1.25] x original
	Posición del electrodo:	Zona central
	Distancia entre el electrodo y la oblea:	[7, 13]mm
	Resistividad de la oblea:	10 Ω x cm
	Tipo de oblea según su dopado:	p-Silicio

En la tabla 5.1 ni el tamaño del electrodo ni la distancia entre este y la oblea se encuentran definidos con precisión. Esto se debe a que dependiendo de cómo se varíe cada uno de ellos el otro deberá aumentar o disminuir. Es decir, según lo analizado hasta el momento cuando el tamaño o la distancia crece, también lo hace la homogeneidad del ataque.

Es por ello, por ejemplo, que cabe esperar que si para un electrodo de tamaño regular se necesitaban 15mm de distancia entre este y la oblea, si se aumenta el tamaño del electrodo esta distancia necesaria es previsible que disminuya. Hay que encontrar el balance óptimo entre los distintos factores.

5.2.2 Resultados

Tras realizar distintos estudios se determina que, en efecto, cuando se modifica el tamaño del electrodo se puede compensar la posible pérdida de homogeneidad en el ataque con la distancia entre este y la oblea de silicio.

Respecto a los otros factores, se ha corroborado que las suposiciones realizadas en la subsección 5.2.1 son las óptimas como, por ejemplo, que la decisión de que la posición del electrodo en la zona central es con la que se obtienen mejores resultados de la distribución de la densidad de corriente es correcta. Aunque realmente un ligero desplazamiento lateral tampoco influye de forma relevante, sobre todo porque en la sección 4.4 se ha observado como dicho electrodo presenta tolerancia ante variaciones en la posición del electrodo.

Dentro de los distintos estudios realizados, se ha determinado que para una distancia entre el electrodo y la oblea de silicio de 10mm es necesario que el tamaño del electrodo de 10 revoluciones que se está empleando se multiplique por un factor de escala de 1.5. En esta decisión se ha tenido en cuenta que tamaños superiores serían más grandes que la superficie superior del electrolito y que, por tanto, el estudio no se podría realizar.

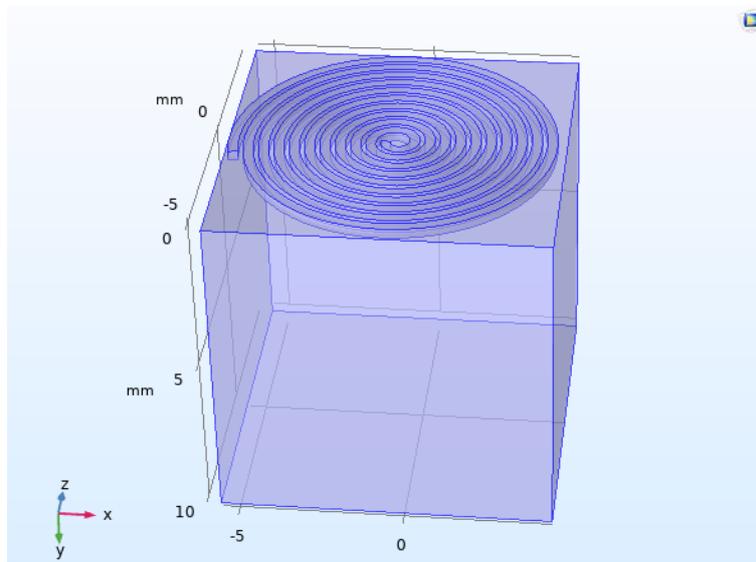


Figura 5.1: Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 10mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.5.

Si se analizan los gráficos de la distribución de la densidad de corriente (figuras 5.2 y 5.3) se muestra como el ataque que sufre la oblea es prácticamente homogéneo en toda la superficie. De hecho, en el gráfico lineal la distribución aparece como prácticamente horizontal debido a la uniformidad del ataque.

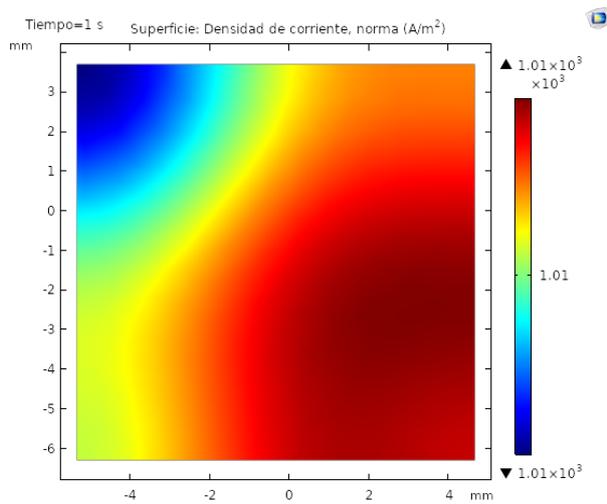


Figura 5.2: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 10mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.5.

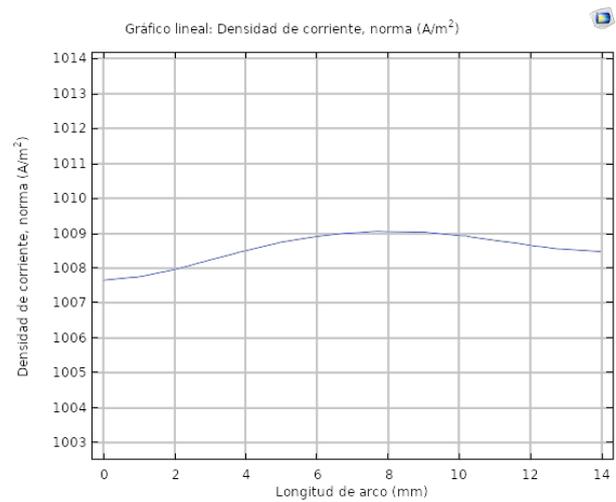


Figura 5.3: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 10mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.5.

Por otra parte, si se determina que el tamaño del electrodo debe ser el tamaño original multiplicado por un factor de escala del 1.25, se tendrá que ir variando la distancia entre este y el electrodo para seleccionar la más óptima. En dicho supuesto, tras distintas pruebas con una distancia de 13mm se obtiene un ataque homogéneo.

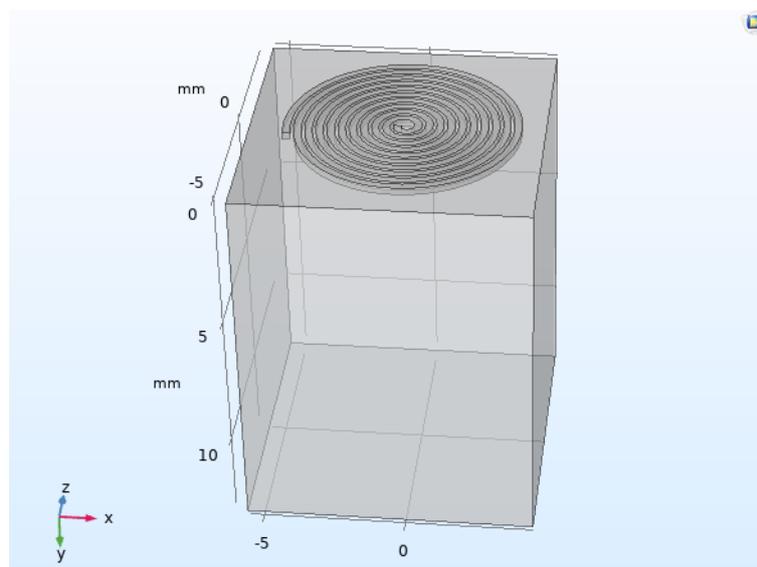


Figura 5.4: Geometría del conjunto cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 13mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.25.

Del mismo modo que en el estudio anterior si se analizan los gráficos (figuras 5.5 y 5.6) la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea es uniforme. En el caso del gráfico

lineal la gráfica representada es también prácticamente horizontal.

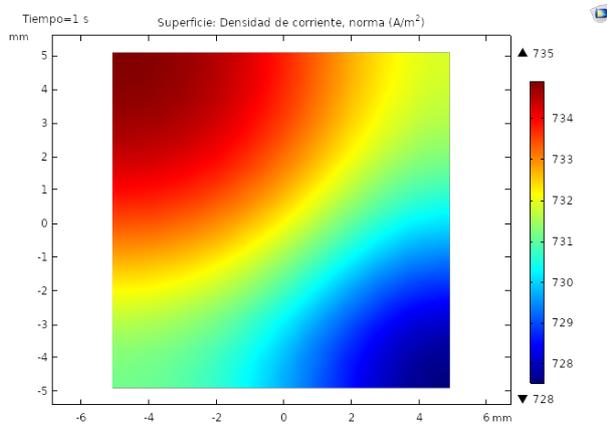


Figura 5.5: Distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 13mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.25.

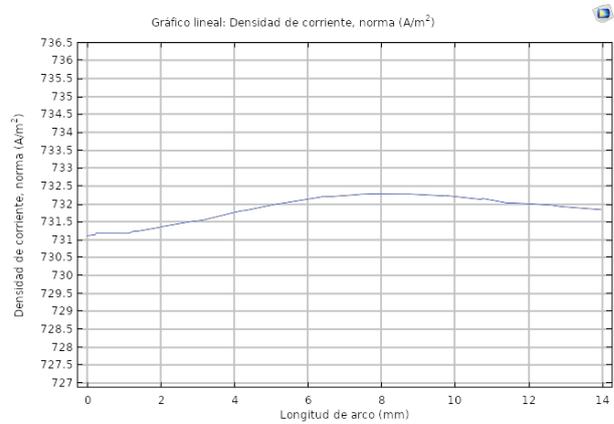


Figura 5.6: Gráfico lineal de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio cuando la distancia entre el electrodo y la oblea es de 13mm y el electrodo de espiral de 10 revoluciones está multiplicado por un factor de escala de 1.25.

Cabe destacar que si estas variaciones y combinaciones se quisieran llevar a cabo en un experimento en el laboratorio se tendrían que tener en cuenta de las facilidades que se tengan. Es decir, puede que por los materiales de que se disponga sea más sencillo modificar el tamaño del electrodo o, por el contrario, que la cubeta de teflón donde se introduce el electrolito permita un amplio rango de variaciones de la distancia.

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

A lo largo del presente trabajo de fin de grado realizado se ha diseñado y desarrollado un modelo con la intención de simular el proceso de fabricación del silicio poroso mediante ataque electroquímico. Sobre dicho modelo se han realizado una serie de estudios empleando el software COMSOL Multiphysics variando algunos de los parámetros que se han determinado más relevantes y que influyen de una manera más notoria en dicho proceso.

Se ha analizado la problemática de la fabricación del silicio poroso mediante ataque electroquímico, ya que al tratarse de un proceso que depende de muchos factores es difícil de simular aunque no sea un método complejo de llevar a cabo. Se han seleccionado aquellos parámetros que, en principio, pueden determinar en mayor medida el grado de homogeneidad que va a ofrecer el ataque.

Se ha corroborado como, en efecto, el electrodo que se emplee presenta una importante influencia en el proceso de fabricación de esta clase de sensores fotónicos. Dependiendo de la geometría, del tamaño o de la posición, entre otros factores, en la que se encuentre el cátodo el resultado de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio difiere. En consecuencia, el ataque resultará más o menos uniforme y las estructuras porosas creadas en la oblea serán distintas dependiendo de la zona de esta.

Más concretamente, los resultados más homogéneos se han obtenido cuando se han empleado electrodos de un tamaño relativamente similar al de la zona superior donde se encuentra el electrolito, situados en el centro de este y que la distancia entre el electrodo y la superficie de la oblea de silicio sea considerable pero sin ser excesivamente grande ya que sino el valor de la distribución de corriente es ínfimo y no se llegaría a realizar el ataque para obtener estructuras porosas en la oblea de silicio. Otro aspecto a tener presente es que un electrodo de un tamaño relativamente elevado sería más costoso económicamente ya que al emplear más material, en este caso platino, encarecería notoriamente el experimento. Igualmente, si el cátodo es de un tamaño superior a la superficie de la zona electrolítica no se podría realizar debido a que no

se podría introducir el electrodo en esta disolución, no produciéndose contacto entre estos y, en consecuencia, no se podrían desencadenar las reacciones necesarias para el ataque electroquímico.

El conjunto de dicha combinación de parámetros se ha comprobado en la propuesta presentada. En esta se han seleccionado aquellas variables estudiadas independientemente más favorables que se han concluido en el capítulo 4. De este modo, en efecto, se han obtenido unos resultados válidos de la distribución de la densidad de corriente en la superficie de la oblea de silicio y consiguiendo un ataque homogéneo en esta. Además, se ha analizado como, cuando se modifica el tamaño del electrodo, la posible pérdida de homogeneidad en el ataque se puede compensar aumentando o disminuyendo la distancia entre este y la oblea de silicio.

En conclusión, el presente trabajo de fin de grado ha sido un proyecto multidisciplinar abarcando desde el diseño y el desarrollo del modelo que simula de una manera simplificada el ataque electroquímico sobre la oblea de silicio, hasta estudios y metodologías de identificación de cuáles son aquellos parámetros de estudio más relevantes en el proceso de fabricación.

6.2 Trabajos futuros

A continuación se proponen diversos posibles trabajos futuros a realizar partiendo de la base tanto teórica como experimental a través del software COMSOL Multiphysics que se ha mostrado en el presente proyecto.

- Comparativa entre los resultados obtenidos mediante COMSOL Multiphysics y los que se obtienen en un experimento en el laboratorio. Para poder comprobar si tanto el modelo como los estudios realizados son relativamente fieles a lo que ocurriría en un experimento real en el laboratorio es necesario comprobar si las simulaciones realizadas mediante el software se corresponden con los resultados reales. De este modo, se conocería, por ejemplo, el error del modelo propuesto para futuras mejoras de este.
- Mejora de la geometría del modelo. Se podría emplear un modelo que tuviera en cuenta más componentes presentes en el proceso del ataque electroquímico o modificar los actuales para otorgarles más propiedades como añadir un cierto grosor a la oblea de silicio.
- Estudio de otras físicas del modelo. A parte de la física de *corrientes eléctricas (ec)* utilizada existen otras físicas en COMSOL Multiphysics que se podrían considerar para su implementación en otros estudios.
- Modificación de la geometría del recipiente de la celda electroquímica que contiene el baño electrolítico. Puesto que se ha comprobado como el uso de un electrodo de un tamaño similar o ligeramente más grande que la zona superior del electrolito da un resultado de homogeneidad del ataque más óptimo que en otros supuestos es interesante estudiar como influiría si en vez de usar un recipiente en forma de prisma rectangular se emplea uno en forma de pirámide truncada invertida o cónica truncada invertida. La superficie menor e inferior de estos se correspondería a la oblea de silicio que va a ser atacada y la superficie mayor y superior a la zona donde se introduce el cátodo. Del mismo modo se podría estudiar la manera en la que influiría emplear un recipiente cuya parte superior fuera menor en tamaño que la inferior donde se encuentra la oblea de silicio.

Parte II

Presupuesto

Capítulo 7

Presupuesto

7.1 Necesidad del presupuesto

El presente presupuesto forma parte del trabajo de fin de grado “Estudio de la influencia del electrodo en el proceso de fabricación de sensores fotónicos de silicio poroso”.

El objetivo del presupuesto es detallar la inversión económica necesaria para la realización de dicho Trabajo Fin de Grado puesto que su desarrollo ha conllevado el empleo de recursos, tanto personales, materiales como temporales.

7.2 Estructura

El presupuesto se ha dividido en tres capítulos teniendo en cuenta cómo se ha desarrollado. El primero se refiere a la planificación del proyecto así como a la investigación del estado del arte. El segundo capítulo corresponde con la realización de los distintos estudios y simulaciones. El tercer y último capítulo comprende la redacción y defensa del presente trabajo.

7.3 Cuadro de precios

Para el cálculo del precio por hora de la mano de obra, se ha tenido en cuenta que en el desarrollo del presente trabajo han participado una alumna del Grado en Ingeniería Biomédica y el tutor el cual es un investigador en el Instituto de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València. Por tanto, se ha tenido en cuenta el salario de dicho tutor, que aparece en la tabla 7.1 como Ingeniero Biomédico experto, y el de la alumna que aparece como Ingeniero Biomédico Junior.

Las estimaciones de tiempo se han realizado considerando una dedicación de media jornada a partir de los días dedicados a cada tarea.

Tabla 7.1: Cuadro de precios de la mano de obra.

Nº	Código	Unidades	Descripción	Precio unitario (€)
1	MO.IBE	h	Ingeniero Biomédico experto	30,00
2	MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico junior	20,00

Respecto a los materiales, se han considerado la licencia del softwares que se han empleado tales como COMSOL Multiphysics o SolidWorks, entre otros programas. Se supone que todos los elementos del trabajo se utilizan unicamente para el mismo, asumiendo el precio completo de los mismos.

Tabla 7.2: Cuadro de precios de los materiales y softwares.

Nº	Código	Unidades	Descripción	Precio (€)
1	SW.COM	u	Licencia COMSOL Multiphysics	4000,00
2	SW.SOL	u	Licencia SolidWorks Estudiante	99,00
3	SW.OFF	u	Licencia Microsoft Office 365	65,00
4	SW.W10	u	Licencia Windows 10	0,00
5	SW.LAT	u	Licencia TeXstudio (LaTeX)	0,00
6	SW.MAT	u	Licencia MATLAB Estudiante	90,00

Para la realización del conjunto de tareas de software, ha sido necesaria la utilización de un ordenador portátil. Se supone que el ordenador se dedica exclusivamente al presente trabajo, por tanto para un precio base de 700€, se obtiene el precio hora a partir de todas sus horas de uso. Además, de dicho ordenador portátil también ha sido necesario el uso de un servidor del NTC puesto que este servidor es el que tiene la licencia para poder usar el software COMSOL Multiphysics. Dicho servidor se considera que ha sido usado íntegramente para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 7.3: Cuadro de precios de la maquinaria.

Nº	Código	Unidades	Descripción	Precio unitario (€)
1	MAQ.ORD	h	Ordenador portátil	2,50
2	MAQ.SER	u	Ordenador del NTC	2000,00

A partir de los presupuestos de las unidades de obra, se considerarán un 1% de costes directos complementarios y un 2% de costes indirectos. Para la obtención del presupuesto de ejecución por contrata se ha utilizado un 13% de gastos generales y un 6% de beneficio industrial. Finalmente, se ha aplicado el IVA actual del 21%.

7.4 Cuadro de precios unitarios

En la presente sección se indican los precios de las diferentes unidades de obra que forman los capítulos.

Tabla 7.4: Capítulo 1. Planificación del proyecto e investigación del estado de arte.

Código	Unidad de obra	Precio(€)
C1.UO1	Reunión para definir el proyecto	51,50
C1.UO2	Búsqueda bibliográfica del estado del arte	1689,20

Tabla 7.5: Capítulo 2. Desarrollo del modelo y realización de simulaciones.

Código	Unidad de obra	Precio(€)
C2.UO1	Desarrollo y diseño del modelo	1144,85
C2.UO2	Simulaciones	7826,97

Tabla 7.6: Capítulo 3. Redacción y defensa del Trabajo Fin de Grado.

Código	Unidad de obra	Precio(€)
C3.UO1	Redacción de los documentos del trabajo	1390,50
C3.UO2	Revisión y corrección de errores	811,13
C3.UO3	Preparación de la defensa	347,63

7.5 Cuadro de precios descompuestos

En la presente sección se indican la descomposición de las diferentes unidades de obra.

En primer lugar, se muestran aquellos correspondientes al capítulo 1.

Tabla 7.7: C1.UO1. Reunión para definir el proyecto.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)	
MO.IBE	h	Ingeniero Biomédico experto	30,00	1,00	30,00	
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico junior	20,00	1,00	20,00	
					50,00	
					Costes directos complementarios (1 %)	0,50
					Costes indirectos (2 %)	1,00
					Total unidad de obra	51,50

Tabla 7.8: C1.UO2. Búsqueda bibliográfica del estado del arte.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico junior	20,00	70,00	1400,00
MAQ.ORD	h	Ordenador portátil	2,50	70,00	175,00
SW.OFF	u	Licencia Microsoft Office 365	65,00	1	65,00
					1640,00
Costes directos complementarios (1 %)					16,40
Costes indirectos (2 %)					32,80
Total unidad de obra					1689,20

A continuación, se presentan los cuadros de precios descompuestos correspondientes a las unidades de obra del capítulo 2.

Tabla 7.9: C2.UO1. Desarrollo y diseño del modelo.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico Junior	20,00	45,00	900,00
MAQ.ORD	h	Ordenador portátil	2,50	45,00	112,50
SW.SOL	u	Licencia de SolidWorks	99,00	1,00	99,00
					1111,50
Costes directos complementarios (1 %)					11,12
Costes indirectos (2 %)					22,23
Total unidad de obra					1144,85

Tabla 7.10: C2.UO2. Simulaciones.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico Junior	20,00	75,00	1500,00
MAQ.SER	u	Ordenador del NTC	2000,00	1,00	2000,00
SW.COM	u	Licencia de COMSOL Multiphysics	4000,00	1,00	4000,00
SW.MAT	u	Licencia MATLAB Estudiante	90,00	1,00	90,00
					7599,00
Costes directos complementarios (1 %)					75,99
Costes indirectos (2 %)					151,98
Total unidad de obra					7826,97

Finalmente, se muestra la información correspondiente al capítulo 3.

Tabla 7.11: C3.UO1. Redacción de los documentos del trabajo.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico Junior	20,00	60,00	1200,00
MAQ.ORD	h	Ordenador portátil	2,5	60,00	150,00
SW.LAT	u	Licencia TeXstudio (LaTeX)	0,00	1,00	0,00
SW.W10	u	Licencia Windows 10	0,00	1,00	0,00
					1350
Costes directos complementarios (1%)					13,50
Costes indirectos (2%)					27,00
Total unidad de obra					1390,50

Tabla 7.12: C3.UO2. Revisión y corrección de errores.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico Junior	20,00	15,00	300,00
MAQ.ORD	h	Ordenador portátil	2,5	15,00	37,50
MO.IBE	h	Ingeniero Biomédico experto	30,00	15,00	450,00
					787,50
Costes directos complementarios (1%)					7,88
Costes indirectos (2%)					15,75
Total unidad de obra					811,13

Tabla 7.13: C3.UO3. Preparación de la defensa.

Código	Unidades	Descripción	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
MO.IBJ	h	Ingeniero Biomédico Junior	20,00	15,00	300,00
MAQ.ORD	h	Ordenador portátil	2,5	15,00	37,50
					337,50
Costes directos complementarios (1%)					3,38
Costes indirectos (2%)					6,75
Total unidad de obra					347,63

7.6 Presupuesto parcial

En la presente sección se indican el presupuesto parcial de los capítulos del presupuesto.

Tabla 7.14: Presupuesto parcial del Capítulo 1.

Código	Unidad de obra	Precio(€)	Cantidad	Coste total (€)
C1.UO1	Reunión para definir el proyecto	51,5	3,00	154,50
C1.UO2	Búsqueda bibliográfica del estado del arte	1689,20	1,00	1689,20
				1843,70

Tabla 7.15: Presupuesto parcial del Capítulo 2.

Código	Unidad de obra	Precio(€)	Cantidad	Coste total (€)
C2.UO1	Desarrollo y diseño del modelo	1144,85	1,00	1144,85
C2.UO2	Simulaciones	7826,97	1,00	7826,97
				8971,82

Tabla 7.16: Presupuesto parcial del Capítulo 3.

Código	Unidad de obra	Precio(€)	Cantidad	Coste total (€)
C3.UO1	Redacción de los documentos del trabajo	1390,50	1,00	1390,50
C3.UO2	Revisión y corrección de errores	811,13	1,00	811,13
C3.UO3	Preparación de la defensa	347,63	1,00	347,63
				2549,26

7.7 Presupuesto de ejecución, por contrata y base de licitación

En la presente sección se indican el presupuesto de ejecución material, de ejecución por contrata y base de licitación.

Tabla 7.17: Presupuesto por capítulos.

Capítulo	Precio (€)
Capítulo 1	1843,70
Capítulo 2	8971,82
Capítulo 3	2549,26
13364,78	

Tabla 7.18: Presupuesto de ejecución, por contrata y base de licitación.

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	13364,78€
Gastos generales (13 %)	1737,42
Beneficio industrial (6 %)	801,89
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	15904,09€
IVA(21 %)	3339,86
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	19243.95€

Asciende el presupuesto total de ejecución material a la siguiente cantidad:

TRECE MIL TRESCIENTOS SESENTA Y CUATRO EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS

Asciende el presupuesto total de ejecución por contrata a la siguiente cantidad:

QUINCE MIL NOVECIENTOS CUATRO EUROS CON NUEVE CÉNTIMOS

Asciende el presupuesto base de licitación a la siguiente cantidad:

DIECINUEVE MIL DOSCIENTOS CUARENTA Y TRES EUROS CON NOVENTA Y CINCO CÉNTIMOS

Bibliografía

- [1] D. Martín-Sánchez, S. Ponce-Alcántara, P. Martínez-Pérez y J. García-Rupérez, “Macropore Formation and Pore Morphology Characterization of Heavily Doped p-Type Porous Silicon,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 166, n.º 2, B9, 2019.
- [2] W. Li, Y. Li, Z. Liu, N. Kerdsakundee, M. Zhang, F. Zhang, X. Liu, T. Bauleth-Ramos, W. Lian, E. Mäkilä y col., “Hierarchical structured and programmed vehicles deliver drugs locally to inflamed sites of intestine,” *Biomaterials*, vol. 185, págs. 322-332, 2018.
- [3] C. Pacholski, “Photonic crystal sensors based on porous silicon,” *Sensors*, vol. 13, n.º 4, págs. 4694-4713, 2013.
- [4] T. Hutter, M. Horesh y S. Ruschin, “Method for increasing reliability in gas detection based on indicator gradient in a sensor array,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 152, n.º 1, págs. 29-36, 2011.
- [5] R. Caroselli, S. Ponce-Alcántara, F. P. Quilez, D. M. Sánchez, L. T. Morán, A. G. Barres, L. Bellieres, H. Bandarenka, K. Girel, V. Bondarenko y col., “Experimental study of the sensitivity of a porous silicon ring resonator sensor using continuous in-flow measurements,” *Optics Express*, vol. 25, n.º 25, págs. 31651-31659, 2017.
- [6] F. A. Harraz, “Porous silicon chemical sensors and biosensors: A review,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 202, págs. 897-912, 2014, ISSN: 09254005. DOI: 10.1016/j.snb.2014.06.048.
- [7] S. Arshavsky-Graham, N. Massad-Ivanir, E. Segal y S. Weiss, “Porous Silicon-Based Photonic Biosensors: Current Status and Emerging Applications,” *Analytical Chemistry*, vol. 91, n.º 1, págs. 441-467, 2019, ISSN: 15206882. DOI: 10.1021/acs.analchem.8b05028.
- [8] A. Uhler Jr., “Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon,” *Bell System Technical Journal*, vol. 35, n.º 2, págs. 333-347, 1956. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x>.

- [9] D. Martín Sánchez, “Desarrollo de biosensores fotónicos basados en membranas de silicio poroso,” Tesis doct., 2019.
- [10] J Jakubowicz, K Smardz y L Smardz, “Characterization of porous silicon prepared by powder technology,” *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 38, n.º 1-2, págs. 139-143, 2007.
- [11] L. T. Canham, “Bioactive silicon structure fabrication through nanoetching techniques,” *Advanced Materials*, vol. 7, n.º 12, págs. 1033-1037, 1995.
- [12] K.-P. S. Dancil, D. P. Greiner y M. J. Sailor, “A porous silicon optical biosensor: detection of reversible binding of IgG to a protein A-modified surface,” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 121, n.º 34, págs. 7925-7930, 1999.
- [13] V. S.-Y. Lin, K. Motesharei, K.-P. S. Dancil, M. J. Sailor y M. R. Ghadiri, “A porous silicon-based optical interferometric biosensor,” *Science*, vol. 278, n.º 5339, págs. 840-843, 1997.
- [14] S. Dhanekar y S. Jain, “Porous silicon biosensor: Current status,” *Biosensors and bioelectronics*, vol. 41, págs. 54-64, 2013.
- [15] L. Canham, *Handbook of porous silicon*. Springer, 2014.
- [16] J. M. Buriak, “High surface area silicon materials: fundamentals and new technology,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 364, n.º 1838, págs. 217-225, 2006.
- [17] H. Föll, M Christophersen, J Carstensen y G Hasse, “Formation and application of porous silicon,” *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 39, n.º 4, págs. 93-141, 2002.
- [18] L. Canham y R. Aston, “Will a chip every day keep the doctor away?” *Physics world*, vol. 14, n.º 7, pág. 27, 2001.
- [19] X. Zhang, “Morphology and formation mechanisms of porous silicon,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 151, n.º 1, pág. C69, 2003.
- [20] L. T. Canham, “Properties of porous silicon,” Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [21] Y. Ogata, J Sasano, J Jorne, T Tsuboi, F. Harraz y T Sakka, “Immersion plating of copper on porous silicon in various solutions,” *physica status solidi (a)*, vol. 182, n.º 1, págs. 71-77, 2000.
- [22] N. Kumar y L. S. Upadhyay, “Polymeric gels for biosensing applications,” en *Polymeric Gels*, Elsevier, 2018, págs. 487-503.

- [23] Á. Montoya Baidés, “Introducción a la micro-nanotecnología con fines bioanalíticos: biosensores.,” pág. 30, 2020.
- [24] C. Karunakaran, R. Rajkumar y K. Bhargava, “Introduction to biosensors,” en *Biosensors and bioelectronics*, Elsevier, 2015, págs. 1-68.
- [25] K. R. Rogers, “Principles of affinity-based biosensors,” *Molecular biotechnology*, vol. 14, n.º 2, págs. 109-129, 2000.
- [26] J. P. Chambers, B. P. Arulanandam, L. L. Matta, A. Weis y J. J. Valdes, “Biosensor recognition elements,” Texas Univ at San Antonio Dept of Biology, inf. téc., 2008.
- [27] D. R. Thévenot, K. Toth, R. A. Durst y G. S. Wilson, “Electrochemical biosensors: recommended definitions and classification,” *Biosensors and bioelectronics*, vol. 16, n.º 1-2, págs. 121-131, 2001.
- [28] O. Lazcka, F. J. Del Campo y F. X. Munoz, “Pathogen detection: a perspective of traditional methods and biosensors,” *Biosensors and bioelectronics*, vol. 22, n.º 7, págs. 1205-1217, 2007.
- [29] E. Luan, H. Shoman, D. M. Ratner, K. C. Cheung y L. Chrostowski, “Silicon photonic biosensors using label-free detection,” *Sensors*, vol. 18, n.º 10, pág. 3519, 2018.
- [30] A. Sereda, J. Moreau, M. Boulade, A. Olivéro, M. Canva y E. Maillart, “Compact 5-LEDs illumination system for multi-spectral surface plasmon resonance sensing,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 209, págs. 208-211, 2015.
- [31] A. Jane, R. Dronov, A. Hodges y N. H. Voelcker, “Porous silicon biosensors on the advance,” *Trends in Biotechnology*, vol. 27, n.º 4, págs. 230-239, 2009, ISSN: 01677799. DOI: 10.1016/j.tibtech.2008.12.004.
- [32] S. Ponce-Alcántara, D. Martín-Sánchez, A Pérez-Márquez, J Maudes, N Murillo y J. García-Rupérez, “Optical sensors based on polymeric nanofibers layers created by electrospinning,” *Optical Materials Express*, vol. 8, n.º 10, págs. 3163-3175, 2018.
- [33] G. Korotcenkov, *Porous silicon: from formation to application: formation and properties, Volume One*. CRC Press, 2016.
- [34] A. Ivanov, “Simulation of electrochemical etching of silicon with COMSOL,” en *Proceedings, COMSOL Conference*, 2011.
- [35] C. Multiphysics, “Introduction to COMSOL multiphysics®,” *COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed Feb*, vol. 9, pág. 2018, 1998.

- [36] E. J. Dickinson, H. Ekström y E. Fontes, “COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review,” *Electrochemistry communications*, vol. 40, págs. 71-74, 2014.
- [37] P. Bastian, *Electrotecnia*. Ediciones Akal, 2001, vol. 1.
- [38] A Ivanov y U Mescheder, “Dynamic Simulation of Electrochemical Etching of Silicon,” en *Proceedings of the COMSOL Conference*, 2012.