



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Informe Técnico

Diseño e implementación de sensores de campo eléctrico coplanarios sobre sustratos dieléctricos

Proyecto PAPIME PE110916

Instrumentación virtual para la enseñanza de sistemas de medición de bajo ruido basado en sensores de campo eléctrico

**Asur Guadarrama Santana, Alejandro Esparza García,
Jorge A. Uc Martín.**

28 de noviembre del 2016

Desarrollo tecnológico

Institución Patrocinadora DGAPA-UNAM

Financiamiento externo

Diseño e implementación de sensores de campo eléctrico coplanarios sobre sustratos dieléctricos

Asur Guadarrama Santana, Alejandro Esparza García, Jorge A. Uc Martin

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico - UNAM

Resumen

Este trabajo describe la metodología para el diseño geométrico e implementación de sensores coplanarios depositados sobre sustratos de vidrio. Se utilizaron programas de diseño digital para obtener las geometrías requeridas de los sensores y transportarlas al diseño de circuitos impresos. Posteriormente se realizaron simulaciones en tres dimensiones con elemento finito para estudiar las distribuciones de potencial eléctrico, campo eléctrico y carga eléctrica en las superficies de sensado. La fabricación se realizó depositando un recubrimiento de cobre de 500 nm sobre las superficies de un sustrato de vidrio utilizando el proceso de erosión catódica (sputtering). Para el grabado geométrico de los sensores se utilizó la técnica de spin-coating con fotolitografía y exposición con luz ultravioleta. Finalmente se depositó un recubrimiento dieléctrico de óxido de silicio de 350 nm de espesor sobre la superficie de los sensores para aislarlos eléctricamente. La superficie sensitiva de los sensores tiene un diámetro máximo de 1 cm, las dimensiones propuestas del ancho de los electrodos y la separación entre estos es de 100 μm . Los sensores se diseñaron sobre un sustrato de vidrio con las dimensiones estándar de cubreobjetos para microscopio, 7.5 cm x 2.5 cm x 0.1 cm, los cuales se implementarán modularmente en una etapa de acondicionamiento electrónico que formará parte de un sistema de medición capacitivo de bajo ruido.

Índice

Introducción

1. Diseño geométrico de los Sensores Coplanarios con Electrodo en Espiral (SCEE).....	4
1.1. Programas de diseño y simulación utilizados	4
1.2 Diseño geométrico de los electrodos.....	4
2. Simulaciones gráficas en 3D con elemento finito.....	7
3. Diseño de máscara de impresión del SCEE.....	9
4. Diseño de máscara como circuito impreso (PCB).....	11
5. Proceso de erosión catódica (sputtering) para depósito de película conductora.....	18
5.1 Fundamentos básicos de la erosión catódica.....	18
5.2 Depósito de película conductora.....	19
6 Proceso de Fotolitografía con spin-coating para el grabado de la geometría del sensor sobre el sustrato dieléctrico.....	20
Resultados.....	25
Conclusiones.....	26
Agradecimientos.....	26
Referencias Bibliográficas.....	27

Introducción

Los sensores capacitivos tienen una amplia gama de aplicaciones en los sistemas de medición así como sus geometrías y rangos de operación. Entre estos se encuentran los llamados sensores coplanarios tipo peine los cuales tienen la ventaja de poder extender su superficie sensitiva aumentando el número de sus electrodos. La superficie de estos se encuentra directamente en contacto con la superficie algún material de interés a caracterizar eléctricamente por medio de perturbaciones del campo eléctrico presente entre sus electrodos.

Gracias al avance tecnológico de programas de simulación con métodos de elemento finito (MEF) y diseño gráfico (CAD) es posible estudiar distintas geometrías y arreglos de electrodos que forman un sensor capacitivo, XiaohuiHu y Wuqiang (2010). En este trabajo se describe principalmente la metodología de fabricación utilizada para implementar sensores capacitivos formados con geometrías en espiral de electrodos coplanarios sobre un sustrato dieléctrico, WeixuanJing *et al.* (2013), Tianming y Nicola (2013). El método descrito involucra la utilización de diferentes programas de dibujo, diseño mecánico, diseño de circuitos impresos (PCB) y de simulación en tres dimensiones (3D) con MEF. Además, se utilizaron los procesos por erosión catódica (sputtering) para el depósito de películas conductoras y dieléctricas sobre sustratos de vidrio. También se utilizaron los procesos de spin-coating y fotolitografía con luz ultravioleta (UV) para el grabado de las geometrías de electrodos que forman los sensores capacitivos propuestos, Ribeiro y Fruett (2015). Las dimensiones propuestas de los electrodos que forman el sensor se encuentran en la escala de los cientos de micrómetros y una superficie sensitiva total de los sensores alrededor de 1 cm^2 . Las geometrías de los electrodos que se diseñaron para estos sensores son del tipo coplanarios entre-puestos en espiral. Uno de los objetivos fue estudiar y analizar la distribución del campo eléctrico, distribución de potencial eléctrico y distribución de carga superficial entre electrodos realizando simulaciones en 3D con elemento finito con la geometría propuesta. Las dimensiones finales de los sensores se basaron en los estudios hechos con las simulaciones. La fabricación se realizó por medio del proceso de erosión catódica depositando un recubrimiento de cobre de aproximadamente 3000 nm de espesor sobre las superficies de un sustrato de vidrio. Con el método de micro fabricación por litografía se hizo el grabado de la geometría de los electrodos sobre el recubrimiento conductor depositado en el sustrato dieléctrico. La superficie sensitiva de los sensores está contemplada dentro de una superficie máxima de 1 cm^2 , el ancho de los electrodos y la separación entre estos se propuso en el orden de $100\text{ }\mu\text{m}$. El sustrato de vidrio tiene las dimensiones estándar de un cubreobjetos para microscopio, $7.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$. Finalmente se depositó un recubrimiento dieléctrico de óxido de silicio de 300 nm de espesor sobre la superficie de los sensores con el fin de aislarlos eléctricamente. Los Sensores Coplanarios con Electrodos en Espiral (SCEE) fabricados, serán parte de un sistema de medición capacitivo de bajo ruido para la caracterización de materiales, procesos físico-químicos y biológicos.

1 Diseño geométrico del Sensor Coplanario con Electrodo en Espiral (SCEE)

El diseño de los sensores comienza con el dimensionamiento de las geometrías propuestas del arreglo de electrodos que forman el sensor coplanario. Se propuso un arreglo de electrodos con geometría en espiral entrepuestos 180° y con una superficie sensitiva alrededor de 1 cm^2 . El ancho y separación entre electrodos fueron de $100\text{ }\mu\text{m}$ y $200\text{ }\mu\text{m}$. La geometría propuesta consistió básicamente en la construcción y unión dos semicírculos de diferentes diámetros para cada electrodo, hasta cubrir el área antes mencionada utilizando herramientas digitales de diseño CAD.

1.1 Programas de diseño y simulación utilizados

En este trabajo en particular, se utilizaron las siguientes herramientas digitales de diseño y simulación para el diseño de las geometrías propuestas del SCEE, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Programas utilizados para el diseño de las geometrías de sensores

SOLIDWORKS 2016	Programa para modelado mecánico en 3D. Permite modelar piezas complejas, y ensamblarlos. El procedimiento de exportación y guardado en diversas extensiones (ficheros de intercambio) se realiza de manera bastante automatizada. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto.
AUTOCAD 2017	Utilizado para dibujo en 2D. Reconocido por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo de patrones complejos; es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otros.
ALTIUM DESIGNER 2016	Programa de automatización de diseño electrónico para PCB (placa de circuito impreso), simulación y montaje.
COMSOL5.2	Es un Programa de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multi-físicos.

1.2 Diseño geométrico de los electrodos

Para formar la geometría del SCEE se empieza por piezas individuales, es decir, se dibujan los electrodos de manera individual, para que posteriormente puedan ser ensamblados o unidos, lo que facilita la realización de la geometría propuesta. En este caso solamente se describe el diseño del SCEE con electrodos de $100\text{ }\mu\text{m}$.

En un primer documento de trabajo, de manera preliminar, se genera un cuadrado con 1 cm^2 de superficie. En la vista plano alzado se remarcan las dimensiones del área que abarca el sensor sobre el sustrato en que será depositado, esto con el fin de obtener la mejor exactitud posible. Después, se crea una circunferencia en el centro del área cuadrada de 1 cm^2 , con un diámetro de 1 cm de acuerdo a las dimensiones del electrodo requerido, conforme a la tabla 2, y el cual nos proporciona la separación entre electrodos con su respectivo ancho.

Tabla 2. Parámetros de diseño para cada separación entre electrodos.

Separación de 100µm	Separación de 200µm
Paso de rosca: 0.384mm	Paso de rosca: 0.736mm
Revoluciones: 12.5	Revoluciones: 6.25
Angulo Inicial: 0°	Angulo Inicial: 0°
Sentido de las agujas del reloj: On	Sentido de las agujas del reloj: On
Diámetro círculo: 0.2 mm	Diámetro círculo: 0.4 mm

Se utiliza la herramienta *Helix* y *Spiral*, para seleccionar cualquier punto del perímetro de la circunferencia, perpendicular a los ejes coordenados. En este punto, se puede ver como se generan los semicírculos de uno de los electrodos. La siguiente selección se realiza en alguna de las caras del cuadrado, con el fin de cubrir el área antes mencionada. Observando la espiral recién creada, se modifican sus parámetros de diseño de acuerdo con la tabla 2, la cual nos proporciona las dimensiones de la espiral final configurando el número de vueltas para un electrodo.

Se presenta la vista lateral de la espiral generada en 2D y se aplica la función *Extrude*, cuya función es darle un volumen geométrico para obtener la forma final en 3D. Se crea un plano perpendicular en el punto donde finaliza la espiral (perímetro del cuadro), lo cual nos permitirá dibujar cualquier forma geométrica a la espiral. Se dibuja un rectángulo sobre este plano perpendicular considerando que uno de los vértices se posiciona sobre el punto final de la espiral, como se ve en la figura 1. El espesor para ambos electrodos es de 1 µm.

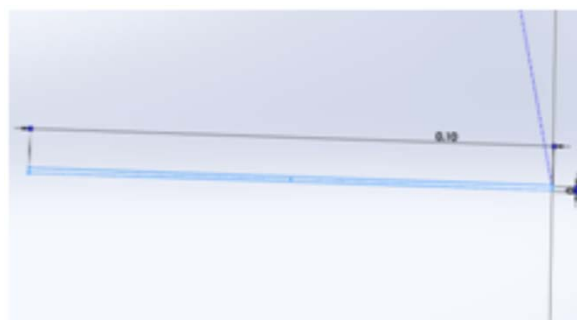


Figura 1. Vista lateral en 2D de la espiral generada.

Para finalizar con este primer electrodo, se utiliza la función *Saliente/Base-Barrido*, la cual nos genera el volumen geométrico para toda la trayectoria de la espiral. Para esto, se selecciona el centro del cuadrado previamente creado, tocando la espiral (vista lateral) se observa cómo se genera el volumen geométrico final de la espiral, como se muestra en la figura 2. En este punto, se recomienda ocultar el círculo central y cuadrado de referencia, con el fin de que al momento de exportar la geometría a otra plataforma de diseño solo se tenga la espiral generada. Se salva el proyecto con la extensión nativa de Solidworks, *.SLDPRT.

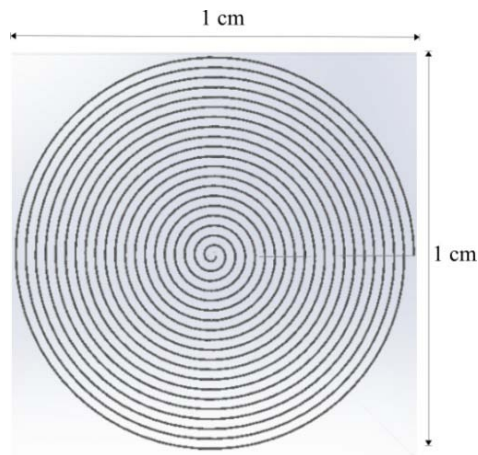


Fig. 2. Espiral generada en 3D.

En un segundo documento de trabajo, se dibuja la geometría en espiral del electrodo opuesto siguiendo el procedimiento anterior con los mismos parámetros de la tabla 1, al electrodo con el que se está trabajando. Solamente se realiza una pequeña modificación al ángulo inicial, establecido en 180° para obtener una geometría en espiral opuesta. Se salva el proyecto en un archivo con la extensión *.SLDPRT.

En un tercer documento de trabajo se realiza el ensamble, que es la unión o disposición de piezas en 3D de los electrodos previamente generados. Se seleccionan los electrodos con un mismo plano de referencia y se observa como encajan entrepuestos para obtener la forma final del sensor, como se muestra en la figura 3.

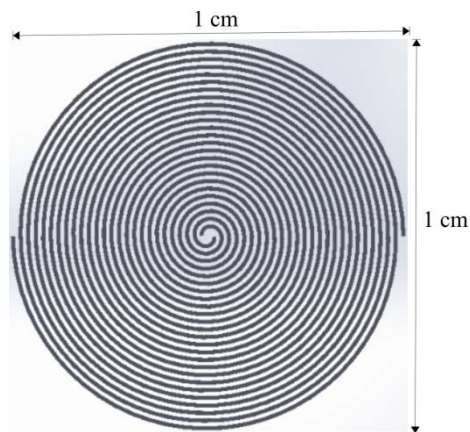


Fig. 3. Geometría final generada en espiral del sensor.

El documento se guarda con la extensión *.SLDPRT, nativa del software, y de esta manera ya puede ser reconocible para su importación con los programas Autocad y posteriormente con Altium.

De la misma forma, se guarda en extensión *.STEP AP214. Este archivo generado no permitirá transportar la geometría a Comsol Multiphysics, para el proceso de simulación con elemento finito.

2 Simulaciones gráficas en 3D con elemento finito

Dentro del ambiente de Comsol, se obtienen simulaciones gráficas en 3D y numéricas de la geometría del SCEE propuesta a estudiar, los cuales ayudan a visualizar el comportamiento de sus propiedades físicas, en este caso eléctricas, y la interacción con algún material o sustancia en estudio con el medio en que se encuentre inmerso. Este estudio nos permite mejorar el diseño de la geometría para obtener el máximo desempeño posible del sensor. Para el caso del sensor con geometría en espiral, nos interesa visualizar la distribución de las líneas de campo eléctrico, la distribución del potencial eléctrico, distribución superficial de carga eléctrica y cálculo de capacitancia.

Primeramente se importa desde la plataforma de Comsol la geometría contenida en el archivo *.STEP, previamente obtenida. Se genera un cuerpo en 3D con dimensiones de 10 mm x 10 mm x 1 mm, para representar un sustrato dieléctrico colocado por debajo de la geometría del sensor importado. Seguidamente se genera un espacio volumétrico con dimensiones propuestas de 20 mm x 20 mm x 10 mm, que representa el medio en el que se encuentran inmersas las geometrías generadas anteriormente, como se ve en la figura 4.

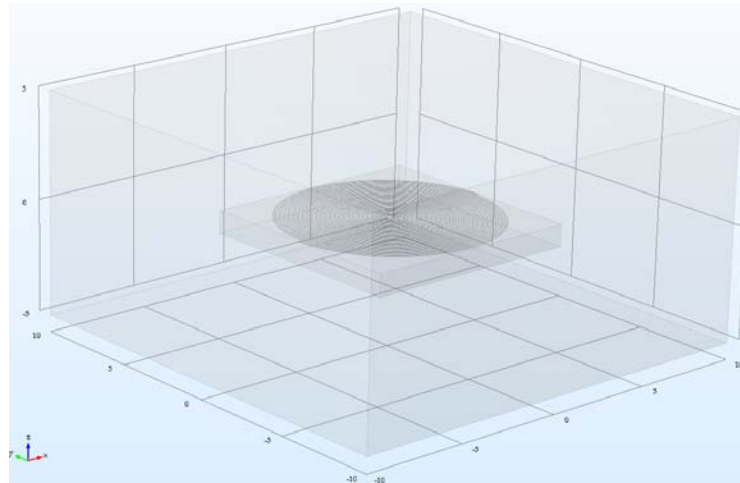


Fig. 4. Representación del sensor sobre un sustrato dieléctrico inmerso en un medio.

Posteriormente se definen los materiales para cada una de las geometrías. En la tabla 3, se presentan los valores de algunas propiedades físicas para diferentes materiales.

Tabla 3. Propiedades físicas de algunos materiales.

	PERMITIVIDAD RELATIVA (ϵ)	PERMEABILIDAD RELATIVA (μ)	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (σ)	DENSIDAD (ρ)
VIDRIO	4.2	1	1e-14 [S/m]	2210 [kg/m ³]
AIRE	1	1	0 [S/m]	1.24 [kg/m ³]
COBRE	1	1	5.998e7 [S/m]	8700 [kg/m ³]

Se utiliza la interfaz física de Electroestática de Comsol para calcular el campo eléctrico y las distribuciones de potencial en dieléctricos bajo condiciones en las que la distribución superficial de carga eléctrica es explícitamente prescrita. La interfaz física resuelve la Ley de Gauss para el campo eléctrico utilizando el potencial eléctrico escalar como variable dependiente.

El conjunto de ecuaciones utilizadas en la simulación para resolver electrostáticamente las superficies de los electrodos que forman el sensor son:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho, \text{ Ley de Gauss en forma diferencial con dieléctricos.}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V, \text{ gradiente de potencial eléctrico.}$$

$$C = Q / V, \text{ capacitancia eléctrica.}$$

Donde $\vec{E}$ es el vector de campo eléctrico, $-\vec{\nabla}V$ es el gradiente de potencial eléctrico, $\vec{D}$ es el vector de desplazamiento eléctrico, ρ es la distribución de carga eléctrica por unidad de volumen, Q carga eléctrica total y C capacitancia eléctrica.

En general, se definen las condiciones inicial y de frontera con una diferencia de potencial de un voltio entre electrodos. Igualmente se define la cara inferior de la geometría que representa el sustrato dieléctrico con un potencial de cero voltios, con el fin de estudiar la distribución de las líneas de campo eléctrico y la distribución de potencial eléctrico en toda la geometría del sensor.

Se define el tipo de estudio como *Estacionario*, estableciendo que las variables del campo eléctrico no cambian con el tiempo, esto se utiliza para calcular variables eléctricas de forma electrostática. Una vez definidos estos parámetros se lleva a cabo la simulación.

El resultado gráfico de la simulación en 3D se muestra en la figura 5. En este gráfico se pueden observar las distribuciones de las líneas de campo eléctrico y de potencial eléctrico en toda la geometría del sensor. El cálculo de la capacitancia para esta geometría tiene un valor de 1.1558E-11 faradios.

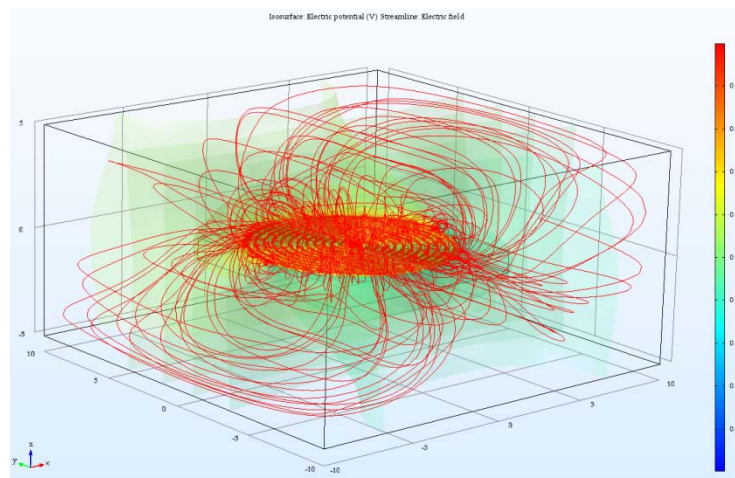


Fig. 5. Simulación en 3D con elemento finito del un sensor capacitivo propuesto.

3 Diseño de máscara de impresión del SCEE

El proceso de fabricación de la máscara de impresión se trabaja bajo la plataforma de Autocad, importando en una hoja de dibujo nueva el archivo *.SLDASM, generado previamente en la plataforma de Solidworks. Este archivo permite visualizar la geometría en espiral completa del sensor en una vista de 2D, como se muestra en la figura 6. Al desplegarse la ventana de importación y comenzar el proceso se presenta un retardo de unos cuantos segundos.

En la plataforma de Autocad, es muy importante tener en cuenta el sistema coordenado, puesto que si no existe un posicionamiento correcto, se pueden presentar problemas al exportar el archivo generado. Al momento de importar las geometrías de los electrodos que conforman el sensor, estos serán reconocidos como un solo objeto único (primitivo), el cual, se recomienda posicionar en el centro de la hoja de dibujo en las coordenadas (x, y, z) como (0,0,0), como se ve en la figura 6. Se puede omitir el valor de la coordenada z por estar en un espacio de dos dimensiones.

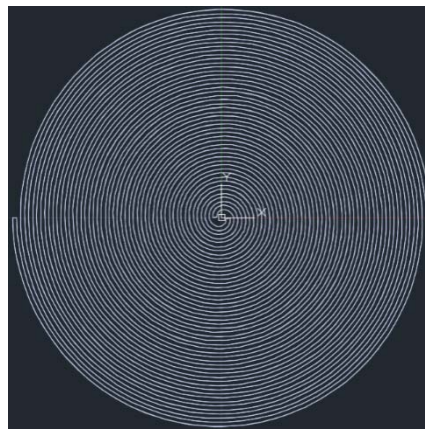


Figura 6. Geometría completa de los electrodos que forman el sensor propuesto en la plataforma de Autocad.

Es necesario utilizar la función *Explode* para realizar la división o separación de las líneas de contorno del primitivo, lo cual nos facilita la selección de cualquier cara y así poder modificar sus propiedades por separado. Dentro de los objetos que se pueden separar, se incluyen bloques, poli-líneas y regiones, entre otros.

Una vez separado el primitivo se puede observar que la geometría del sensor queda dividida en dos electrodos, por lo que se dibuja una nueva espiral partiendo del punto medio de las caras de los extremos de cada electrodo, como se muestra en la figura. 7.

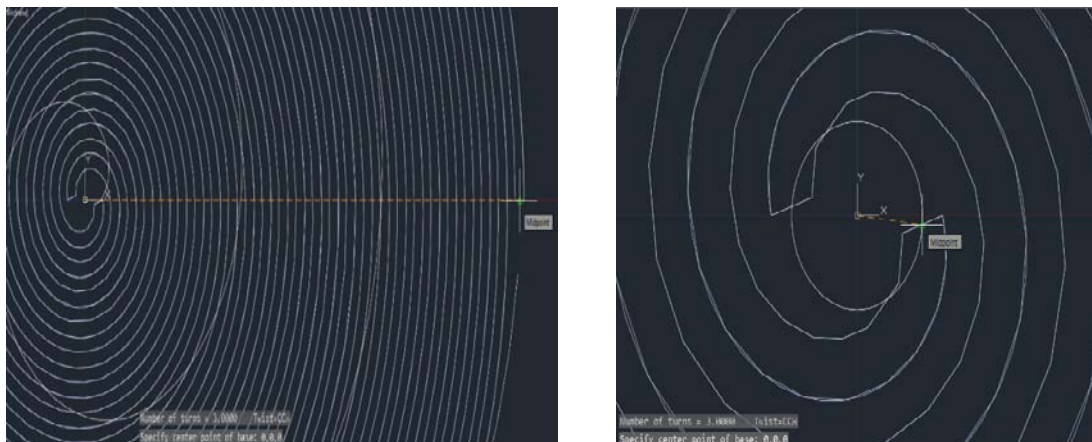


Figura 7. Separación de dos electrodos en espiral.

Al igual que Solidworks, Autocad cuenta con una herramienta que realiza una trayectoria en espiral, esta se denomina *Helix*. Primero se selecciona el punto medio de la cara del centro de cada electrodo en 2D y después se extiende hacia el punto medio de la cara del extremo final para cada electrodo. Esto se realiza para generar una espiral en una dimensión (1D) a lo largo de cada electrodo. Siguiendo esta metodología se pueden diseñar electrodos con diferentes dimensiones.

Una vez creadas las espirales en 1D, se modifican las propiedades de la espiral de acuerdo a las dimensiones requeridas del sensor propuesto, como se muestra en la tabla 4. Con estas propiedades se obtiene una espiral definida en 1D a lo largo del centro de cada electrodo en 2D. Se realiza un procedimiento similar para el electrodo opuesto.

Tabla 4. Parámetros de diseño para cada separación entre electrodos.

Separación de 100 μm	Separación de 200 μm
Height: 4.95	Height: 4.9
Turns: 12.5	Turns: 6.25
Base Radius: 0.15	Base Radius: 0.3
Top Radius: 4.95	Top Radius: 4.9
Twist: CW	Twist: CW

Se generan las espirales en 1D y se aplica la función *Explode* una vez a las nuevas espirales para asegurar que se encuentren como líneas en 1D. Se revisan los bordes de cada una para asegurar que no tengan extensiones de línea fuera de la espiral recién generada. En caso de tener extensiones, se realiza a un recorte para corregir los bordes con la opción *Trim*. En la figura 8 se muestra como quedan definidas las nuevas espirales.

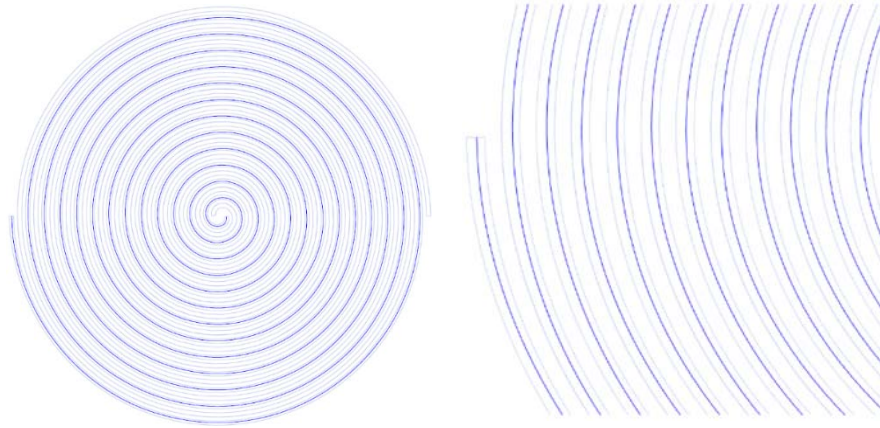


Figura 8. Espirales generadas con Autocad.

Se eliminan los contornos de los electrodos importados desde Solidwors, con el fin de que solo permanescan las líneas centrales recién dibujadas en 1D, como se muestra en la figura 9.

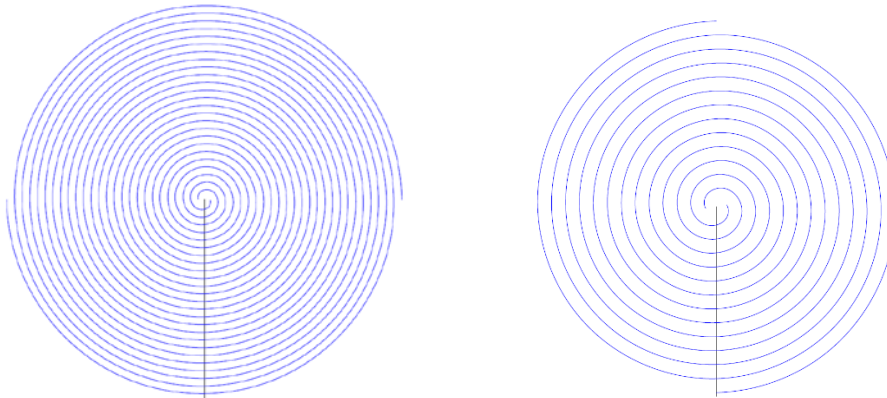


Figura 9. Espirales generadas en una dimensión con separación entre electrodos de 100 μm (izquierda) y 200 μm (derecha).

Es recomendable dibujar una línea con origen en el centro de los electrodos hacia cualquier punto del extremo, esto ayudara a seleccionar fácilmente el centro del sensor cuando se tenga que desplazarlo dentro de otro ambiente coordenado como es el caso del programa Altium. Se guarda el dibujo en un archivo *.dwg, que es el formato nativo.

El diseño geométrico con Autocad es muy importante debido a que es el vínculo entre Solidworks y Altium, dado que este último no puede importar archivos generados desde Solidworks. En cambio, los archivos generados en 2D desde Autocad los importa de manera rápida y sencilla.

4 Diseño de máscara como circuito impreso (PCB)

Para diseñar la máscara como circuito impreso (PCB) se utilizó el programa Altium Designer, Altium solo reconoce líneas (1D) al momento de importar alguna geometría proveniente de otro ambiente de diseño.

Dentro del ambiente de trabajo de Altium, primeramente se da de alta un nuevo Proyecto, en el cual se almacenarán todos los diagramas, esquemáticos y exportaciones que se generen en esta etapa.

Seguidamente se añadirá un nuevo diseño de circuito impreso (PCB) a dicho proyecto. Es muy importante en este punto definir bien las unidades con las que se va a trabajar, puesto que de ellas depende en gran medida la exactitud de las dimensiones de nuestro sensor en la etapa de fabricación. Se recomienda configurar en unidades imperiales, ya que la gran mayoría de los componentes de circuitos impresos se encuentran en estas unidades. Con la selección de unidades imperiales, se define la división en cuadrícula de la hoja de trabajo en alguna escala de mil (mil divisiones de pulgada). En este caso, se definió en 50 mil, la cual tiene una equivalencia de 1.27 mm aproximadamente, por cada división. Este criterio depende de las dimensiones del diseño.

Al momento de importar el archivo con extensión *.dwg que contiene la geometría del sensor y de acuerdo con el diseño que se está trabajando, se define el grosor de línea en el cuadro de diálogo. En la figura 10 se puede observar el menú desplegado:

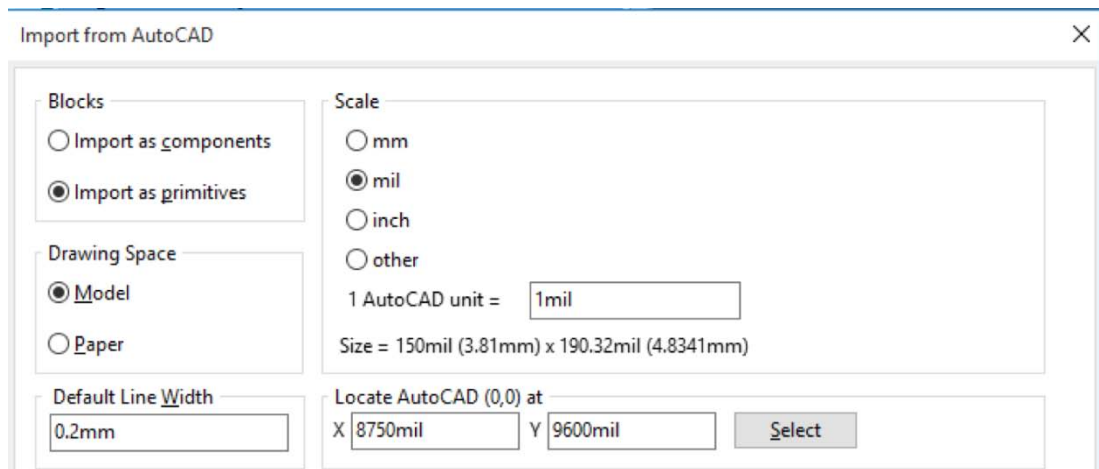


Figura 10. Menú con opciones para determinar el grosor de línea.

Se define el espesor de la línea en la opción *Default Line Width* con los valores de 0.1 mm o 0.2 mm, recordar que estos valores dependen de la geometría del sensor a importar. De igual manera, se define la escala en milímetros, esto con el fin de mantener las unidades y por lo tanto las dimensiones de las geometrías con las que se trabajó en Autocad. Un cambio de unidades en este paso puede conllevar al cambio en las medidas de nuestro sensor. También se definen las coordenadas en donde queremos que este posicionado el electrodo. Las demás opciones pueden dejarse con los valores de “default”.

En la figura 11 se puede observar la geometría importada en 1D de los electrodos tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente. Se recomienda dejar la línea que parte del centro del sensor hacia uno de sus contornos, hasta que se encuentre en su posición final. Esto con el fin de que se pueda seleccionar y posicionar adecuadamente con mayor facilidad.

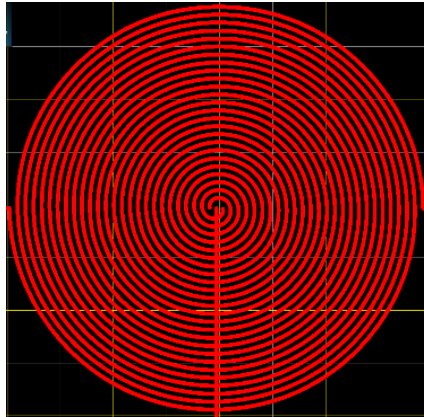


Figura 11. Geometría en espiral en 1D importada a la plataforma de Altium.

Se realiza una pequeña modificación al valor del punto inicial de los electrodos, en el centro de la espiral, cambiando el valor hasta conseguir una curvatura interna menos pronunciada, con el fin de obtener la mayor área de cobertura en el centro de las espirales, como se muestra en la figura. 12.

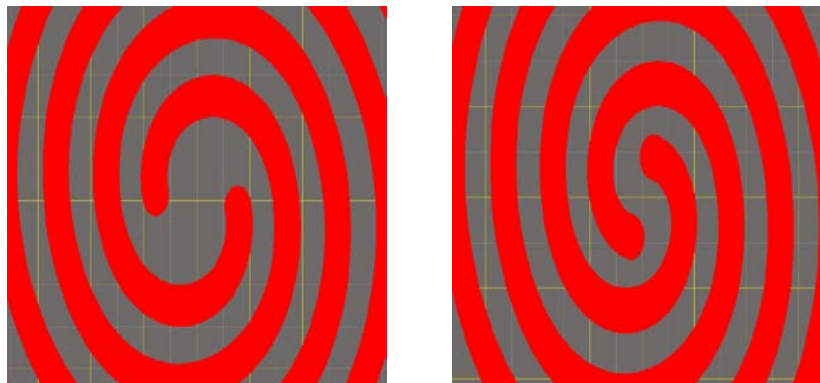


Figura 12. Espirales sin corrección (izquierda) y con corrección (derecha).

Se dibuja un rectángulo, con las medidas de la superficie de un porta objetos para microscopio, en este caso son de 7.5 cm x 2.5 cm, en el cual serán depositados los electrodos que forman el sensor propuesto. Una vez definida esta área, se reduce la hoja de trabajo al mismo tamaño del rectángulo recién creado con la opción *Define from selected objects*. Con esto se define el área de trabajo requerida.

Se colocan dos sensores iguales dentro de la superficie definida y se extienden pistas en los extremos de cada electrodo evitando ángulos de 90° grados. Estas serán las pistas por las que circule la señal eléctrica proveniente de los sensores hacia los bornes de la etapa de acondicionamiento electrónico. La distribución de los sensores presentan una separación horizontal de 1000 mil entre sus contornos y el centro de cada uno se encuentra a 500 mil de altura, verticalmente. Las pistas que finalizan en los extremos se hicieron de mayor grosor con el fin de obtener mayor área de contacto de conexión con los bornes de la etapa de acondicionamiento electrónico. En la figura 13 se muestra el diseño final de los sensores coplanarios con electrodos en espiral entrecruzados (SCEE).

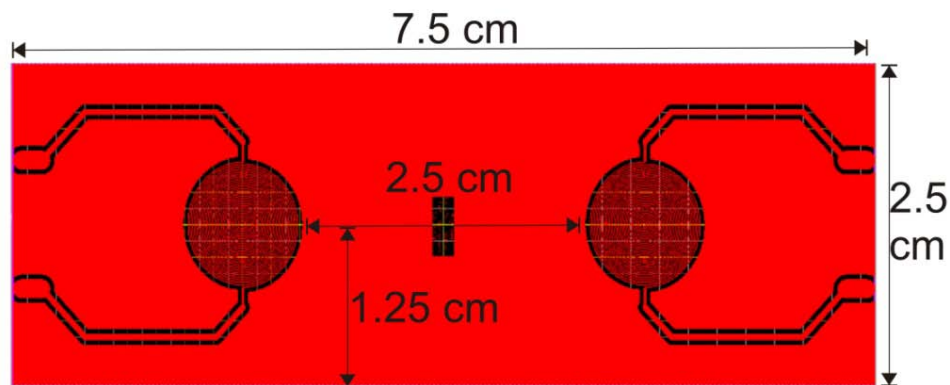


Figura 13. Diseño final de sensores coplanarios con electrodos en espiral entrecruzados.

Es muy útil tener un grabado de leyendas en el diseño, con las características más importantes, con el fin de poder identificarlos. Se recomienda que esta leyenda se realice con la opción activada de *Mirror*. Esta leyenda se queda marcada al momento de imprimir la máscara del diseño final la cual sirve como una guía al realizar el proceso de Fotolitografía ayudando a que se marque sobre el sustrato en forma correcta, es decir, hacia nosotros. Se recomienda que el tamaño de letra sea de 60 mil para una fácil distinción, aunque queda a criterio del usuario, como se muestra en la figura 14.

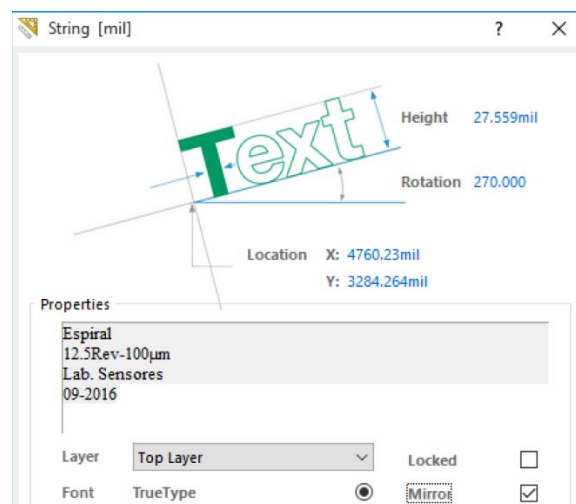


Figura 14. Leyenda de datos del diseño.

Por último, se crea un archivo PDF que contenga el diseño final generado el cual será impreso posteriormente para utilizarlo como máscara de diseño en el proceso de Fotolitografía.

Para generar el archivo PDF, se añade un archivo *Output Job File* a nuestro proyecto, en la sección *Output Containers* se selecciona en PDF para resaltarlo. Unos marcadores verdes aparecen a la derecha de las opciones mostradas en la sección de *Outputs*, las cuales vinculan la exportación al formato PDF. El marcador verde activa o desactiva la opción elegida para la generación del documento final en PDF, como se ve en la figura 15.

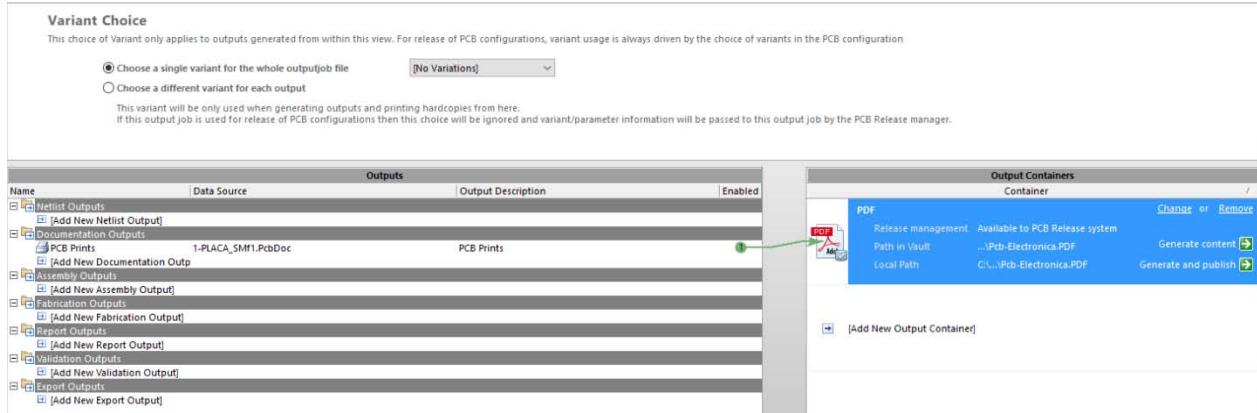


Figura 15. Menú de selección para generar archivos en PDF.

En la sección *Outputs*, se despliega el apartado *Documentation Outputs*, a continuación se selecciona el enlace *Add New Documentation Output*. En el menú emergente que aparece, se busca y selecciona el archivo PCB para exportar. En la fig.15 se muestran las opciones que el archivo de trabajo de salida debe mostrar después de la configuración realizada, como se indicó previamente.

Se recomienda una resolución máxima de 600 dpi. De la misma forma se define el tamaño de la hoja, se recomienda tamaño carta o tabloide dependiendo del número de máscaras requeridas, como se muestra en la figura 16.

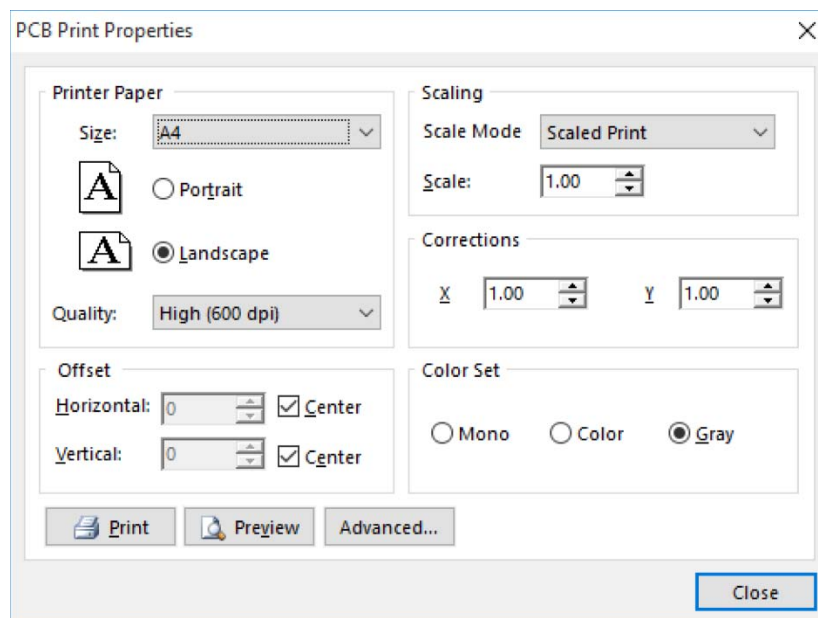


Fig. 16. Menú para configurar las características de impresión

Altium, permite exportar las diversas capas (*layers*) del diseño en cuestión. En la figura 17 se muestra el menú para seleccionar algunas opciones del diseño a exportar.

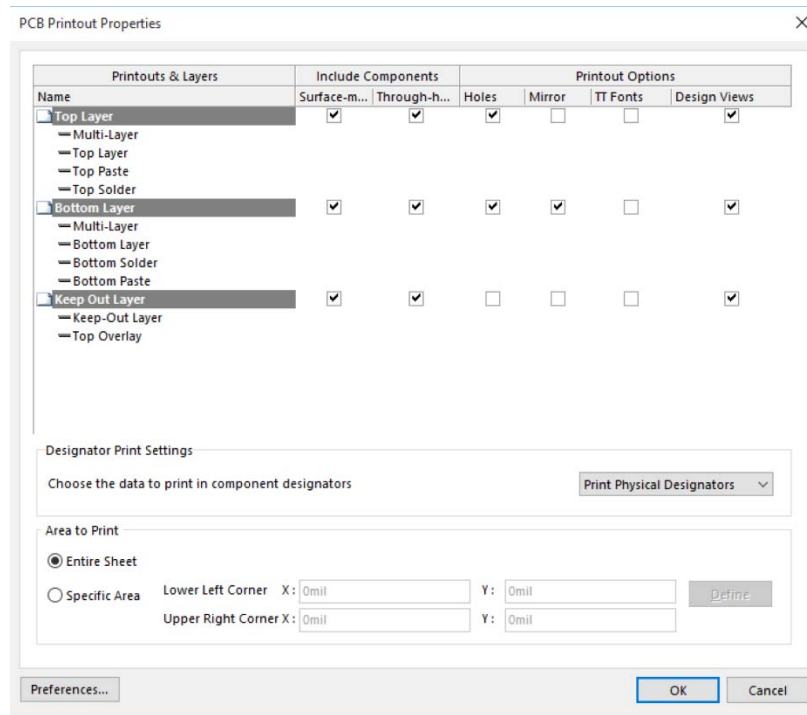


Figura 17. Menú de opciones del diseño para exportar.

En la opción *Preferences*, se despliega una ventana en donde se definen los colores de las diferentes capas (*layer*). Esta opción es útil para cambiar el tono de estos colores, en especial para distinguir las perforaciones de contacto (*Holes*), como se muestra en la figura 18. De la misma forma se aplica para una impresión a color, con el fin de definir cada capa (*layer*). En este caso se requirió en seleccionar en blanco y negro los componentes del diseño.

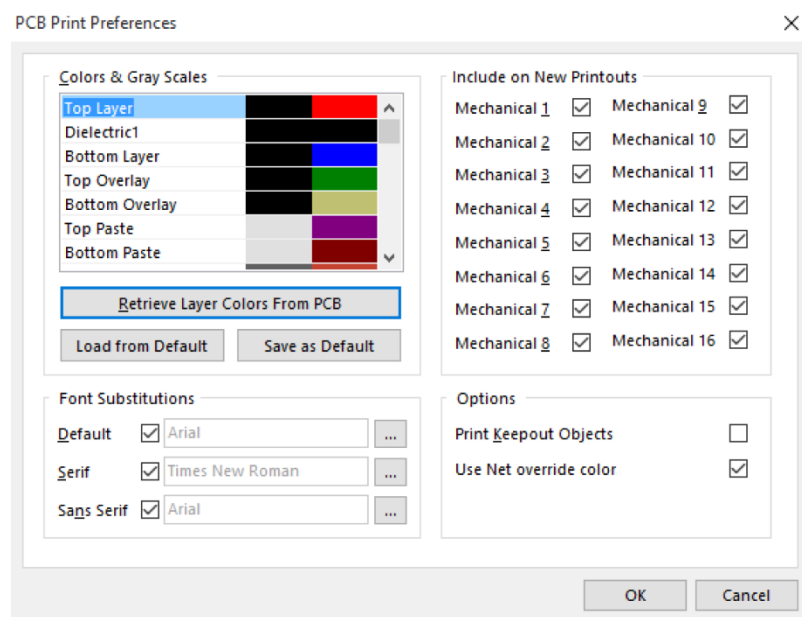


Fig. 18. Menú de opciones del PCB.

En la figura 19 se muestra el resultado final de la máscara de diseño de los sensores con las opciones y dimensiones de impresión configuradas previamente.



Figura. 19. Máscara del diseño final de los sensores propuestos.

La impresión positiva de la máscara se realiza sobre una hoja de acetato transparente necesaria en el proceso de litografía sobre un sustrato dieléctrico.

La impresión final sobre el acetato transparente muestra un incremento aproximado de $20\ \mu\text{m}$ en el ancho de los electrodos y por consiguiente presenta una medida final aproximada de $120\ \mu\text{m}$. Este incremento se resta a la separación propuesta de $100\ \mu\text{m}$ entre electrodos, quedando en alrededor de $80\ \mu\text{m}$, como se muestra en la figura 20.



*Figura 20. Medidas finales aproximadas de la impresión en acetato.
(120 μm de ancho y 80 μm de separación entre electrodos)*

Estas desviaciones del 20% con respecto de las medidas propuestas iniciales en el diseño (120 μm de ancho y 80 μm de separación entre electrodos) dependen del tipo de impresora que se utilice.

5 Proceso de erosión catódica (sputtering) para el depósito de película conductora

En este proceso se llevó a cabo la preparación del sustrato de vidrio mediante el depósito secuencial de recubrimientos de titanio, cobre y óxido de silicio, los cuales se depositaron por la técnica de erosión catódica (sputtering) en el Laboratorio de Películas Delgadas del CCADET UNAM.

5.1. Fundamentos básicos de la erosión catódica

La erosión catódica se refiere al desprendimiento de material de la superficie de un sólido (blanco), debido al intercambio de momento asociado al bombardeo superficial llevado a cabo por partículas energéticas.

El proceso de recubrimiento se realiza en una cámara de vacío, donde la fuente del material de recubrimiento (blanco), es colocado frente al sólido a recubrir (sustrato), de forma que éste último intercepte el material desprendido.

El proceso de erosión catódica se lleva a cabo mediante la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico entre el blanco y el sustrato, de magnitud suficiente, de manera que se genera una ionización del gas de trabajo (argón), previamente introducido a la cámara, como se muestra en la figura 21.

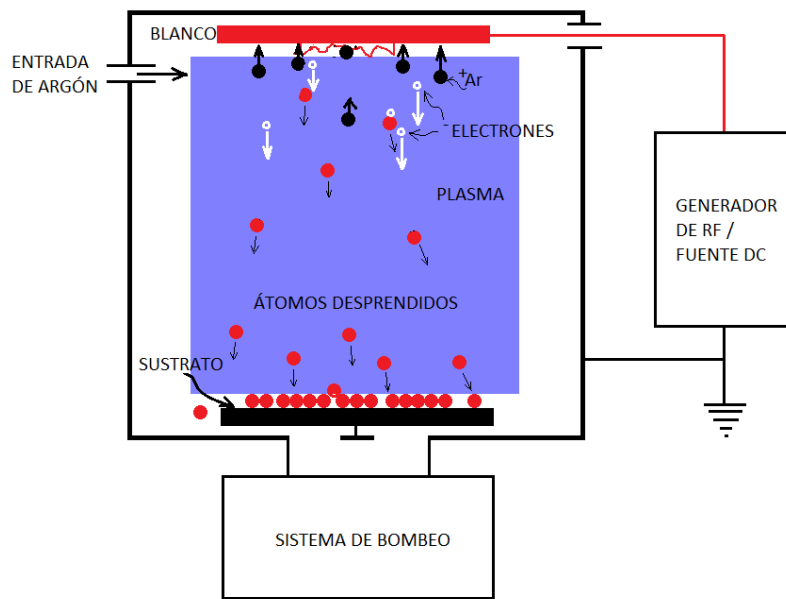


Figura 21. Diagrama de bloques del proceso por erosión catódica (sputtering).

5.2. Depósito de película conductora

Para la fabricación de los electrodos, se requirió de la deposición de tres materiales: titanio, cobre y óxido de silicio. Cabe señalar que aunque el cobre es el material activo del electrodo en cuestión, debido a su mala adherencia con el sustrato de vidrio, se deposita una capa intermedia de titanio de 20 nm de espesor. Enseguida, se deposita una película de cobre de 3000 nm de espesor y finalmente, posterior a la película de cobre se deposita una película de óxido de silicio de 300 nm de espesor con el fin de proteger al cobre de la oxidación y la corrosión, como se muestra en la figura 22. Esta última se deposita después del proceso de litografía.



Figura 22. Representación de los depósitos sobre el sustrato dieléctrico.

En la figura 23 se muestra el sustrato de vidrio con la capa de cobre depositada por medio del proceso de erosión catódica.



Figura 23. Sustrato de vidrio con recubrimiento de cobre sobre su superficie.

Finalmente, en la tabla 5 se resumen las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo los recubrimientos señalados.

Tabla 5. Parámetros físicos del proceso (sputtering).

	Titanio	Cobre	Óxido de silicio
Blanco	2" diám x 1/8" esp	2" diám x 1/16" esp	3" diám x 1/8 esp
Equipo	LEICA MED 020	LEICA MED 020	Pfeiffer-Balzers
Presión Máxima	7.2×10^{-6} mbar	1.5×10^{-5} mbar	2×10^{-5} mbar
Presión de argón	2.6×10^{-2} mbar	8.9×10^{-3} mbar	3.6×10^{-4} mbar
Corriente	9 mA	9 mA	_____
Voltaje	275 V (DC)	291 V (DC)	RF (13MHz)
Potencia	24.75 W	26.19 W	175 W
Tiempo	400 seg	5000 seg	3900 seg
Espesor	20 nm	3000 nm	300 nm

6 Proceso de Fotolitografía para el grabado de la geometría del sensor sobre el sustrato dieléctrico

El grabado del diseño geométrico final de los sensores coplanarios se realiza sobre un sustrato de vidrio previamente preparado, con dimensiones de 2.5 cm (ancho) x 7.5 cm (longitud) x 0.1 cm (espesor), cubierto con un recubrimiento de cobre de 3000 nm de espesor por las caras inferior y superior, mediante el proceso de sputtering. El proceso de grabado de los sensores consiste en depositar una capa de material sensible a la luz (fotoresina), con la técnica de spin-coating, sobre la capa conductora del sustrato preparado anteriormente. La fotoresina se expone a luz ultravioleta (UV) a través de una máscara que tiene zonas transparentes y opacas, como se ve en la figura 19. Las zonas transparentes permiten la exposición de luz UV con la fotoresina por un determinado tiempo (10 segundos). Estas se

retiran del sustrato por medio un proceso de revelado con una sustancia química, dejando intactas las regiones no expuestas al UV (superficies opacas de la máscara). Después del proceso de revelado, las superficies expuestas al UV corresponden a las superficies del recubrimiento de cobre al descubierto. Estas superficies son retiradas por medio de un proceso de remoción de cobre con cloruro férrico. Finalmente, las superficies de material fotosensible no expuestas al UV se remueven con un baño de acetona. De esta forma permanecen las geometrías de interés plasmadas en cobre sobre el sustrato de vidrio.

El proceso de fotolitografía consiste básicamente en seis pasos:

- 1.- Preparación de la muestra (limpieza).
- 2.- Capa de Fotoresina.
- 3.- Leve calentamiento (Softbake).
- 4.- Exposición.
- 5.- Revelado.
- 6.- Post-exposición (Bake).

El proceso de fotolitografía se realizó con la infraestructura del Grupo de Fotónica y Microondas del CCADET UNAM, como se ve en la figura 24.



Figura 24. Equipo para el Proceso de Fotolitografía dentro de un cuarto oscuro.

El equipo utilizado consta de:

- Spin-coating (Convac spinner model 1001, Convac Technologies, Sichuan China)
- Fuente de luz UV marca Oriel, modelo 6286
- Platina de calentamiento Cole-Parmer Instrument Co.
- Microscopio Leica DME, Model 13595XXX
- Microscopio Axio Scope.A1 Carl Zeiss

Algunos de los valores y tiempos utilizados en el equipo para el proceso de Fotolitografía, se obtuvieron de una forma de optimización empírica y de acuerdo a los tipos de materiales que se utilizan. El equipo data de Julio de 1986.

A continuación, se describen los pasos realizados durante este proceso:

- 1.- Se enciende todo el sistema (fuente de UV, spin-coating), esperar brevemente un tiempo, dando la oportunidad que se estabilice el sistema. El indicador del controlador de la fuente de alimentación de la lámpara de UV se debe estabilizar a 6 Amperios.
- 2.- Se configura el regulador de tiempo de exposición de luz UV en modo manual, esto se realiza dejando todas las perillas del temporizador en cero con el fin de obtener un tiempo de encendido de lámpara de 10 segundos. En la tabla 6 se pueden observar las especificaciones técnicas de la lámpara UV.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de la lámpara UV, marca Oriel, modelo 6286.

Tipo de lámpara	Mercurio (Hg)	Intensidad horizontal	2100 cd (candelas)
Potencia de la lámpara	350 Watts	Intensidad de brillo aproximado	500 cd mm ⁻² (candelas/mm ²)
Vida útil promedio	1000 horas	Flujo aproximado	18000
Diámetro del bulbo	20 mm	Corriente de la lámpara	6 Amperios
Tamaño de arco efectivo	0.8 x 2.7 mm	Voltaje de la lámpara	60 Voltios

- 3.- Se conecta el motor del spin-coating a una fuente de voltaje para controlar sus revoluciones, las cuales se establecen en 1200 rpm. El equipo se configura a estas revoluciones debido al tipo fotoresina utilizada, como se muestra en la figura 26.
- 4.- El spin-coating se pone en funcionamiento por un minuto para estabilizar y verificar las revoluciones.
- 5.- Se coloca el sustrato sobre el spin-coating, se aplica vacío y se pone en funcionamiento. Se realiza un proceso de limpieza en el portaobjetos depositando primero acetona y seguidamente isopropanol permitiendo el funcionamiento por unos segundos antes de detener.
- 6.- Se coloca el sustrato sobre la platina para calentarlo con el fin de eliminar la humedad superficial. La platina se configura a una temperatura de 100°C. Se recomienda proteger el sustrato con papel aluminio limpio para evitar que alguna partícula se impregne en su superficie. Tiempo de espera 10 minutos.
- 7.- Inmediatamente después de calentar el sustrato se regresa al spin-coating y se aplica vacío, como se muestra en la figura 25. Se realiza el depósito de la fotoresina manualmente con una pipeta. La fotoresina utilizada es AZ-3330, que experimentalmente es la que mejores resultados ha proporcionado en el laboratorio para este tipo de procesos.

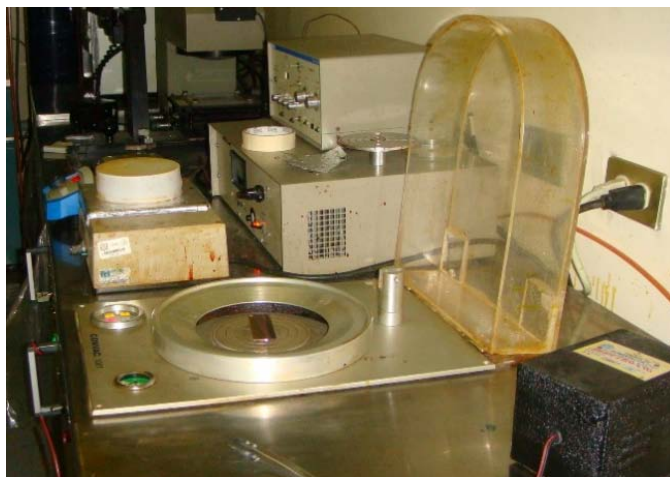


Figura 25. Substrato de vidrio en equipo de spin-coating.

De acuerdo a la hoja de datos del fabricante de la fotoresina se puede determinar que el espesor aproximado obtenido es de $4.6 \mu\text{m}$, como se muestra en la figura 26. Este espesor es conveniente para proteger el recubrimiento de cobre del cloruro férrico. Es recomendable que cuando se deposite la fotoresina sobre el substrato se evite tocar los bordes con la pipeta, ya que de esta manera evitamos que fluya y pase por debajo del substrato. Se recomienda un tiempo de giro de un minuto una vez depositada la fotoresina.

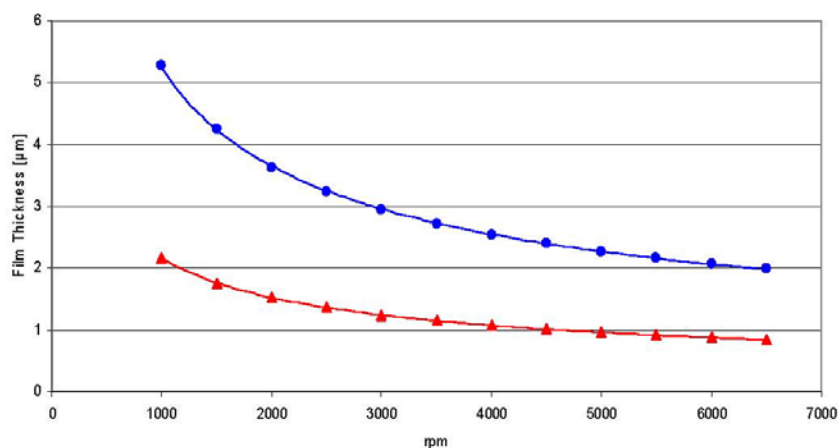


Figura 26. Relación gráfica de rpm y espesor de la fotoresina empleada con el spin-coating.

8.- Después de realizar el depósito de la fotoresina, se toma con mucho cuidado el substrato y se lleva a la platina para calentar a 100°C durante 1 minuto y de esta manera aumentar la adherencia de la fotoresina al cobre.

- 9.- Se coloca la máscara sobre el sustrato y se expone a la fuente de luz UV, para fotosensibilizar la resina. Es importante asegurarnos que la máscara se coloque en la posición adecuada. Para el tipo de resina utilizada se expone durante 10 segundos, más tiempo nos produciría grabados en negro ajenos a nuestro diseño.
- 10.- Se calienta de nuevo el sustrato durante un minuto. En esta etapa se observa como resalta el grabado geométrico de los sensores sobre la superficie expuesta al UV.
- 11.- Seguidamente se deja enfriar durante un minuto.
- 12.- Se deposita el revelador AZ 300 MIF en un contenedor de vidrio, se sumerge el sustrato hasta que se cubra completamente. Se mueve lentamente en todas las direcciones posibles, con el fin de asegurar que el revelador remueva la parte que fue expuesta a luz UV. Es muy importante esta parte, ya que un buen revelado nos evitara repetir el proceso. El tiempo de revelado es de un minuto aproximadamente.
- 13.- Se enjuaga con agua para limpiar el sustrato del revelador.
- 14.- Se seca el sustrato con nitrógeno. En esta etapa, el sustrato puede ser expuesto directamente al ambiente.
- 15.- Se verifica el acabado en el Microscopio Axio Scope.A1 Carl Zeiss, como se muestra en la figura 27.

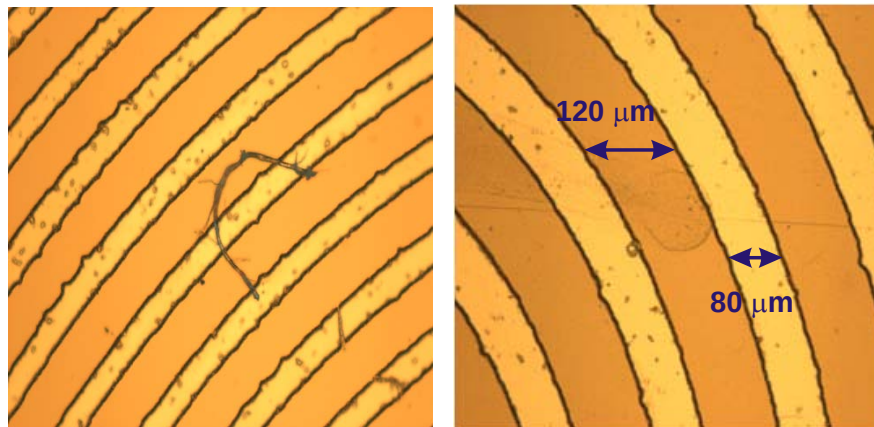


Fig. 27. Imágenes del grabado del sensor con dimensiones aproximadas de 120 μm de ancho del electrodo y 80 μm de separación entre electrodos.

- 16.- Se realiza el proceso de remoción del cobre, que permanece sin recubrimiento de fotoresina, depositando el sustrato en un contenedor de vidrio con cloruro férrico hasta cubrirlo totalmente. Se mueve lentamente en diferentes direcciones con el fin de remover las superficies de cobre no cubiertas por la fotoresina hasta que se aprecie el grabado final de los sensores.
- 17.- Se enjuaga con agua para quitar el cloruro férrico y se debe secar muy bien, de preferencia con papel óptico.
- 18.- Se deposita el sustrato en un contenedor de vidrio con acetona y se sumerge hasta que se cubra completamente. Se mueve lentamente en todas las direcciones posibles, con el fin de asegurar la remoción de la fotoresina que cubre las superficies que no fueron expuestas a luz UV.

19.- Se verifican en el microscopio los detalles en el diseño final y con un multímetro se verifica también que no exista continuidad entre los electrodos del sensor para asegurar que se encuentren perfectamente aislados con otras superficies conductoras del sustrato.

La figura 28 muestra los sensores coplanarios en espiral entrepuestos fabricados con la metodología descrita.

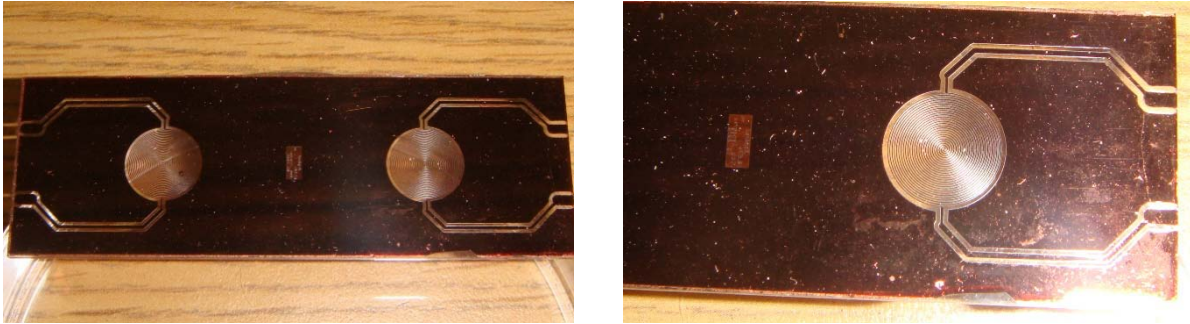


Figura 28. Sensores coplanarios en espiral entrepuestos depositados sobre un sustrato de vidrio.

Finalmente, se realiza el depósito de una película dieléctrica de óxido de silicio de aproximadamente de 300 nm de espesor con el proceso de sputtering, descrito anteriormente. La película cubre la superficie donde se encuentran los sensores con el fin de aislar eléctricamente los electrodos, como se muestra en la figura 29.

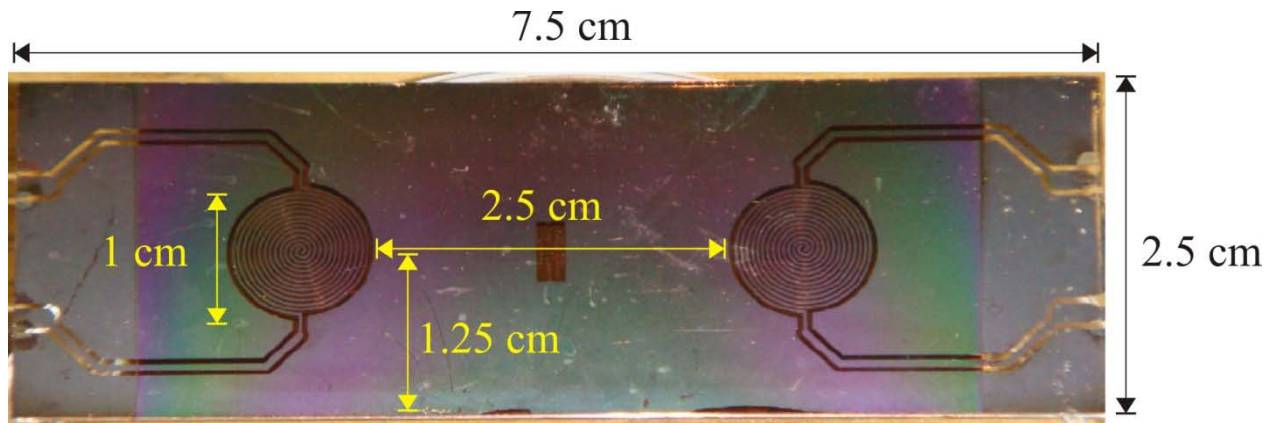


Figura 29. Sensores coplanarios aislados con película dieléctrica de óxido de silicio.

Resultados

Siguiendo la metodología descrita, se fabricaron los sensores coplanarios con la geometría y las dimensiones propuestas por medio de los programas de diseño Solidworks y Comsol. El objetivo fue generar geometrías de los arreglos de electrodos que forman los sensores para después exportarlos a la

plataforma de Comsol y realizar un estudio electrostático del comportamiento de las distribuciones de campo, potencial y carga eléctrica, por medio de simulaciones en 3D con MEF, como se muestra en la figura 5.

Una vez que se realizó este estudio, se realiza el diseño de la máscara que contiene las geometrías de los sensores propuestos, utilizando los programas de diseño Autocad y Altium, como se muestra en la figura 19.

El proceso de fabricación empezó con en el depósito de una capa de titanio de 20 nm de espesor y sobre esta una de cobre de 3000 nm de espesor, ambas sobre la superficie de un sustrato de vidrio, por medio del proceso de erosión catódica (sputtering), como se muestra en la figura 23.

El grabado de los sensores coplanarios sobre el sustrato de vidrio se realizó por medio de los procesos de spin-coating y fotolitografía con UV, como se muestra en la figura 27.

Se realizó el proceso de remoción de la fotoresina y el cobre sobrantes en el sustrato para obtener el diseño geométrico, distribución y dimensiones propuestos de los sensores coplanarios plasmados en cobre sobre el sustrato de vidrio, como se muestra en la figura 28.

Finalmente, se depositó una película dieléctrica de óxido de silicio de aproximadamente 300 nm, con el fin de aislar eléctricamente los electrodos de cada sensor, como se muestra en la figura 29.

Conclusiones

El procedimiento descrito en este trabajo para el diseño y fabricación de los SCEE propone el uso de programas de diseño y simulación para generar las geometrías y distribución de sensores coplanarios sobre sustratos dieléctricos. Los programas utilizados en este trabajo no son exclusivos para este fin, pueden ser otros semejantes. Sin embargo, es aconsejable tener conocimiento del uso de los programas utilizados.

La geometría propuesta de los sensores requirió de estas herramientas especializadas para su diseño y simulación y es posible generar otras geometrías complejas para sensores coplanarios sobre sustratos dieléctricos. Es necesario contar con infraestructura especializada para llevar a cabo los procesos de sputtering y fotolitografía con el fin de obtener buenos resultados.

Las dimensiones propuestas de los electrodos de 100 μm ancho se encuentran dentro del rango de fabricación con la infraestructura y el equipo con que se cuenta en el Laboratorio de Películas Delgadas y el Grupo de Fotónica y Microondas del CCADET.

La metodología descrita en este trabajo presenta una descripción más detallada sobre los procesos de fabricación de los sensores más que el trabajo de simulación electrostático. Sin embargo, es importante realizar este estudio con más detalle con el fin de obtener una caracterización eléctrica de los sensores coplanarios de campo eléctrico y de esta forma, optimizar al máximo las geometrías y dimensiones de sus electrodos para obtener un mejor desempeño de estos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo de Fotónica y Microondas del CCADET por el uso de la infraestructura y equipo necesario para el proceso de fabricación, al Dr. Daniel Matatagui y al M. en I. Cristian Rodríguez Reyes por la asesoría y asistencia en los procesos de fabricación de spin-coating y de litografía.

Finalmente, a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM por el financiamiento a través del proyecto PAPIIME PE-110916.

Referencias bibliográficas

1. L. E. B. Ribeiro, F. Fruett. (2015). **Analysis of the Planar Electrode Morphology for Capacitive Chemical Sensors**. Sensor devices, p.179 to 182.
2. Tianming Chen, Nicola Bowler. (2013). **Design of interdigital spiral and concentric capacitive sensors for materials evaluation**. AIP Conference Proceedings, 1511, p. 1593-600.
3. WeixuanJing, LujiaChen, Fan Zhou, Zhuangde Jiang, LinglingNiu, Bing Wang, Han Qi. (2013). **Fabrication and Characterization of Pt Archimedean-spiral Interdigitated Microelectrodes with Containing Trenches**. IEEE, p.128-130.
4. XiaohuiHu, Wuqiang Yang. (2010). **Planar capacitive sensors – designs and applications**. Sensor Review, 30(1), p. 24-39.