

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

Fabricación de una antena array de 16x16 ranuras a 420 GHz con red de alimentación basada en tecnología Groove Gap Waveguide



Autora: Marta Melero Frago

Director: Jorge Teniente Vallinas

Fecha y lugar de la defensa: Pamplona, 7/6/2019

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría dar las gracias a Jorge, por toda su ayuda, ánimo y ganas de hacerme crecer y enseñarme cada día. Su apoyo ha sido fundamental y sin él habría sido imposible llevar a cabo este trabajo. Gracias por confiar siempre en mí, poder aprender de ti es todo un honor.

También me gustaría agradecer a mi familia, en especial a mi madre, mi abuela Rosamari y mi hermano, su apoyo incondicional y su cariño. Gracias por creer en mí, ¡Esto va por vosotros!

Gracias también a mis amigos y compañeros por compartir el proceso y hacerlo más ameno. También a Sergio, por apoyarme siempre y recordarme que soy capaz de conseguir todo lo que me proponga.

Por último, me gustaría dar las gracias a Miguel Ferrando, de la Universidad Politécnica de Valencia, por facilitarnos el diseño de la antena y por su ayuda para la simulación de la misma.

Resumen

Las técnicas clásicas utilizadas para la fabricación de componentes de alta frecuencia empiezan a fallar para el rango de frecuencias milimétricas y de THz, debido a la precisión necesaria para tamaños tan pequeños. Aparece por tanto la necesidad de indagar sobre nuevos métodos.

Este proyecto se centra en el estudio de técnicas de fabricación para circuitos de alta frecuencia en la sala limpia ISO7 de la Universidad Pública de Navarra. En concreto, el objetivo es construir una antena array de ranuras (SWA, Slotted Waveguide Antenna) alimentada mediante una estructura GGW (Groove Gap Waveguide) que opera a 420 GHz, mediante técnicas de fotolitografía y micromecanizado en silicio. Se pretende conseguir que la antena fabricada tenga una directividad de unos 30 dB y una adaptación (S_{11}) menor que -10 dB en torno a la frecuencia de operación.

Se pondrá especial interés en el método de fabricación, donde se mostrará detalladamente en qué consiste el proceso de fotolitografía y el micromecanizado en silicio. Ambas técnicas son complejas y delicadas, pero permiten la fabricación de microestructuras de muy alta precisión. El objetivo principal de este proyecto es pulir el procedimiento para obtener los mejores resultados posibles.

Lista de palabras clave

- Fotolitografía
- Micromecanizado en silicio
- Groove Gap Waveguide (GGW)
- Antena de ranuras (Slotted Waveguide Antenna, SWA)
- Dry etching
- Antenas a frecuencias de THz
- Deposición por vaporización con electron-beam

Abstract

The classical techniques used to manufacture high frequency components start to fail for THz and mm-wave frequency ranges, due to the precision needed for such small sizes. The necessity of looking for new methods appears.

This project focuses on the study of the manufacturing techniques for high frequency components in the clean room ISO7 of the Public University of Navarre. In particular, the aim is to fabricate a slotted waveguide antenna array (SWA) fed by a Groove Gap Waveguide (GGW) at the frequency of 420GHz, by means of photolithography techniques and silicon micromachining. It is expected to achieve a directivity of 30 dB and a matching (S_{11}) fewer than -10 dB around the operation frequency in the manufactured antenna.

Special interest will be shown on the manufacture method, where the process of photolithography and micro-machining in silicon will be explained in detail. Both techniques are complex and delicate, but they allow for the manufacturing of very high precision microstructures. The main aim of this project is to improve the procedure in order to obtain the best possible results.

Key Words

- Photolithography
- Silicon micromachining
- Groove Gap Waveguide (GGW)
- Slotted Waveguide Antenna (SWA)
- Dry etching
- THz antennas
- Electron-beam deposition

Tabla de contenidos

Agradecimientos	2
Resumen	3
Lista de palabras clave	3
Abstract	4
Key Words.....	4
Capítulo 1: Conceptos previos sobre antenas.....	8
1.1. Conceptos básicos sobre propagación de ondas	8
1.2. Conceptos básicos sobre antenas	8
a. Definición de antena y clasificación	8
b. Parámetros principales de una antena	10
c. Mecanismo de radiación básico	13
1.3. Antenas de array de ranuras, SWA (Slotted Waveguide Antenna).....	15
Capítulo 2: Tecnología Gap Waveguide.....	17
2.1. Introducción a las Gap Waveguides	17
2.2. Tipos de Gap Waveguides	20
Capítulo 3: La técnica de fotolitografía	22
3.1. Obleas.....	22
3.2. Proceso de fotolitografía.....	23
a. Composición y propiedades de la foto-resina.....	23
b. Preparación del sustrato	24
c. Revestimiento: <i>Spin-coating</i>	24
d. Primer proceso de cocción: <i>Softbake</i>	26
e. Exposición.....	26
f. Segundo paso de cocción: <i>Post-exposure bake</i>	27
g. Revelado	28
h. <i>Hardbake</i>	28

i. Creación de la <i>hard mask</i> (Deposición)	29
j. <i>Stripper</i>	29
k. Grabado: <i>Dry-etching</i>	30
Capítulo 4: Análisis de la estructura a fabricar	33
4.1. Red de alimentación GGW	33
4.2. Antena array de ranuras (SWA) para polarización lineal	35
4.4. Pieza de sujeción	37
4.5. Resultados de la simulación en Ansys HFSS	38
a. Directividad	38
b. Polarización cruzada.....	38
c. Adaptación.....	39
d. Diagrama de radiación en campo lejano.....	40
Capítulo 5: Diseño y fabricación de las máscaras.....	43
5.1. Cortes transversales de la pieza.....	43
5.2. Constitución de la máscara completa en AutoCAD.....	44
5.3. Creación de la máscara final con LinkCAD	47
Capítulo 6: Fabricación de la antena SWA.....	48
6.1. Estrategia de fabricación.....	48
6.2. Elección de los parámetros de fabricación	49
6.3. Etapa de deposición (estructuración)	52
a. Primera capa de la SWA	52
b. Segunda capa de la SWA	54
c. Tercera capa de la SWA	56
6.4. Excavado en el DRIE	59
a. Prueba de excavado por etapas	59
b. Pruebas de linealidad del proceso de excavado	61

Capítulo 7: Problemas surgidos durante la fabricación	68
7.1. Problemas relativos al método de fabricación.....	68
a. Incorrecta refrigeración durante el proceso DRIE.....	68
b. Incertidumbre en la selectividad del DRIE	68
c. Partición de las obleas	68
d. Error en la adhesión de SiO ₂ en el E-beam.....	69
Capítulo 8: Conclusiones y futuro del proyecto	70
Referencias	72
Lista de imágenes	73
Anexo 1: Máquinas utilizadas en la sala limpia ISO7	76
Mask-aligner (MJB4 Suss MicroTec).....	76
E-beam (Nexdep Angstrom Engineering).....	76
Spinner (Spin-coater Labspin Suss MicroTec)	77
DRIE (PlasmaPro 80 ICP Oxford Instruments)	77
Hot plate (Apogee Bake Plate Cost Effective Equipment)	77
Anexo 2: Máscaras completas	78

Capítulo 1: Conceptos previos sobre antenas

1.1. Conceptos básicos sobre propagación de ondas

Una onda electromagnética surge como resultado de las vibraciones entre un campo eléctrico y un campo magnético, y se propaga mediante la oscilación de dichos campos.

Toda onda se caracteriza por su frecuencia (f) y su longitud de onda (λ), ambas relacionadas por la velocidad de propagación en el medio, que habitualmente en antenas tiene las propiedades del vacío ($c=3\cdot 10^8$ m/s). [2] La frecuencia es una medida de la velocidad de oscilación del campo electromagnético.

Las ondas electromagnéticas se crean por la vibración de una carga o corriente eléctrica, y las ecuaciones de Maxwell son el medio para relacionar los campos eléctricos y magnéticos con las corrientes y cargas que los crean. La solución a estas ecuaciones es en forma de ondas, que pueden ir ligadas a una estructura, como en el caso de las guías de onda o líneas de transmisión, o bien libres en el espacio, como ocurre en las producidas por las antenas. [1]

1.2. Conceptos básicos sobre antenas

a. Definición de antena y clasificación

Una antena es un dispositivo utilizado para radiar y recibir ondas de radio. En otras palabras, la antena actúa como transición entre una zona donde existe una onda electromagnética guiada y una onda en el espacio libre (onda radiada). Una guía o línea de transmisión puede ser desde un cable coaxial hasta una tubería hueca (conocida como **guía de onda** o *waveguide*, en inglés), y su función es transportar energía electromagnética desde la fuente transmisora hasta la antena, o desde la antena al receptor. [2]

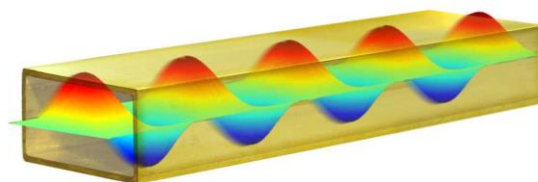


Ilustración 1: Propagación de una onda en el interior de una guía de onda

La misión principal de una antena es radiar la potencia que se le suministra asignándole unas características de direccionalidad adecuadas para cada aplicación. Por ejemplo, para aplicaciones de radiodifusión queremos que la radiación sobre la zona de cobertura sea omnidireccional; mientras que para radiocomunicaciones fijas, las antenas deben ser direccionales. Para cada aplicación se deben ajustar la direccionalidad, niveles de potencia a soportar o la frecuencia de trabajo a las condiciones particulares que se requieran. [2]

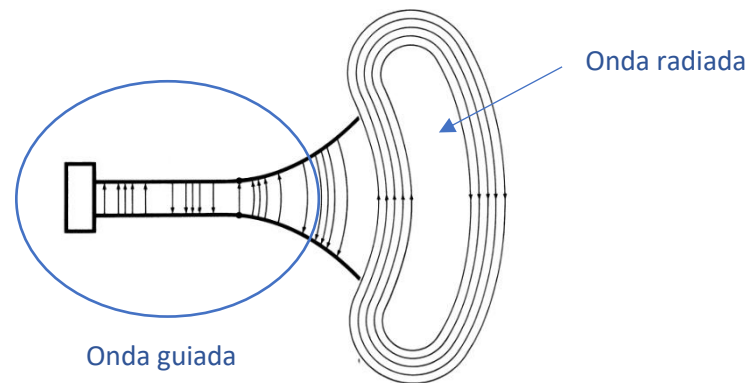


Ilustración 2: Esquema de una antena

Toda antena tiene unas características de impedancia y radiación que dependen directamente de la frecuencia. Para analizar dichas características hay que recurrir a las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, haciendo uso de las expresiones de los campos en forma compleja o fasorial. [2]

De forma amplia y muy resumida, los principales tipos de antenas pueden agruparse en los siguientes bloques:

- Antenas de hilo: Están constituidas por hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados.
- Antenas de apertura: En este tipo de antenas, la generación de la onda radiada se consigue a partir de una distribución de campos soportada por la antena. Algunos tipos englobados en este grupo son las bocinas, los reflectores y las antenas parche. [1]
- Agrupaciones de antenas: En algunas aplicaciones se pueden requerir características de radiación imposibles de lograr con un solo elemento, pero sí con la combinación de varios de ellos. Estas agrupaciones pueden estar formadas por combinaciones de cualquier tipo de antenas. [1] [2].

b. Parámetros principales de una antena

Las antenas normalmente forman parte de un sistema de comunicaciones mucho más amplio, donde también hay amplificadores, mezcladores y osciladores, entre otros. Es muy importante poder caracterizar la antena para poder prever su comportamiento y analizar su influencia en resto de componentes del sistema. Para ello, definiremos algunos parámetros importantes:

- Impedancia de entrada

La antena actúa como una impedancia de carga para el generador. Podemos definir la impedancia de entrada a la antena como la relación entre tensión y corriente a su entrada:

$$Z_{in} = \frac{V_a}{I_a}$$

Además, la impedancia de entrada depende de la frecuencia de la forma:

$$Z_{in}(f) = R_{in}(f) + jX_{in}(f)$$

Podemos definir también la potencia entregada como:

$$P_{entregada} = P_{radiada} + P_{pérdidas}$$

La impedancia de entrada es un parámetro de gran importancia, ya que condiciona las tensiones de los generadores necesarios para obtener unos valores de corriente concretos en la antena y, en definitiva, una potencia radiada determinada. Si la parte reactiva es grande, la tensión a aplicar para obtener corrientes apreciables es elevada; si la resistencia de radiación es baja, se necesitan corrientes elevadas para conseguir una potencia radiada importante. [2]

- Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es la representación matemática o gráfica de las propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas espaciales angulares (θ , ϕ).

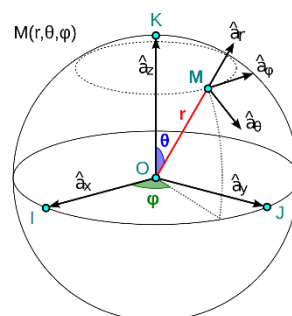


Ilustración 3: Sistema de coordenadas angulares

A partir del diagrama de radiación podemos obtener los cortes **plano E** y **plano H**. El plano E está definido por el vector de campo eléctrico y la dirección de máxima radiación, mientras que el plano H contiene el vector de campo magnético y la dirección de máxima radiación.

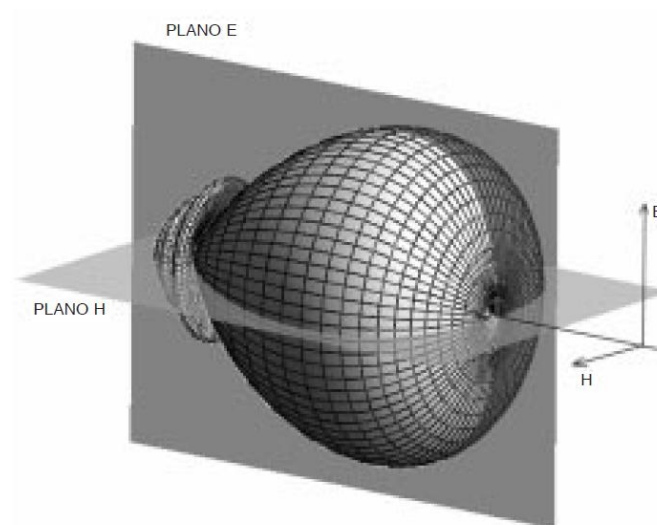


Ilustración 4: Cortes plano E y plano H

- Directividad

La directividad de una antena puede entenderse como la medida de la direccionalidad de su diagrama de radiación. Teóricamente, se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección del espacio a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia. [2]. Su expresión teórica puede escribirse como:

$$D(\theta, \phi) = \frac{q(\theta, \phi)}{P_{radiada} / (4\pi r^2)}$$

- Ganancia

Otro parámetro importante y que está fuertemente relacionado con la directividad es la ganancia. Su definición es similar a la de directividad, pero utilizando en este caso la potencia entregada en vez de la radiada. Gracias a eso se pueden tener en cuenta las posibles pérdidas de la antena, considerando que en este caso toda la potencia radiada no sería entregada al espacio. [2]. Para relacionar ambos parámetros, directividad y ganancia, hacemos uso de la eficiencia de la antena:

$$G(\theta, \phi) = \eta_i \cdot D(\theta, \phi)$$

- Polarización

La polarización describe la orientación del vector campo eléctrico o magnético, en un punto fijo del espacio al transcurrir el tiempo. [2] La polarización de una antena corresponde con la polarización de la onda radiada por dicha antena en la dirección de máxima ganancia. [1]

La polarización puede ser clasificada como **lineal**, **elíptica** o **circular**. Si el vector que describe el campo eléctrico en un punto del espacio siempre está orientado siguiendo una línea para cualquier instante temporal, decimos que la antena está linealmente polarizada. Si el campo eléctrico describe una elipse, estará elípticamente polarizada. La polarización circular es un caso especial de polarización elíptica donde el vector de campo eléctrico describe un círculo perfecto a lo largo del tiempo. [1]

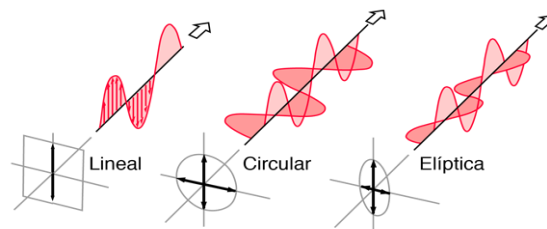


Ilustración 5: Tipos de polarizaciones

- Ancho de banda

El intervalo de frecuencias donde una antena opera satisfactoriamente se denomina ancho de banda. Este parámetro se debe a la geometría finita de las antenas, lo que hace que sea imposible operar correctamente en todas las frecuencias. Dependiendo de la aplicación, la banda de frecuencias utilizada será distinta y por ello la antena estará especialmente diseñada para cumplir unos requerimientos específicos a esas frecuencias. [2]

- Área y longitud efectiva

La antena extrae la potencia del frente de onda incidente, por lo que presenta una cierta área de captación, denominada **área efectiva** (A_{ef}). Este parámetro es una representación física de la parte del frente de onda que la antena es capaz de interceptar y transmitir hacia la carga.

El área efectiva se relaciona con la directividad de la siguiente forma:

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot A_{ef}$$

c. Mecanismo de radiación básico

En este apartado se hará una breve aproximación al mecanismo de radiación de una antena. Para calcular los campos radiados por un conjunto de fuentes (de volumen V) en cualquier punto del espacio debemos resolver las ecuaciones de Maxwell. Las soluciones generales a las ecuaciones de onda serán la integral de las contribuciones de cada diferencial de carga o corriente del conjunto.

El vector de radiación se define como:

$$\vec{N} = \int_V \vec{j}(\vec{r}') \cdot e^{jk\hat{r}\vec{r}'} \cdot dV'$$

En región de campo lejano, podemos definir el potencial vector (\vec{A}) en función del vector de radiación:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot \vec{N}$$

Los campos eléctrico y magnético pueden ser expresados en función del vector de radiación que acabamos de definir:

$$E_\phi = -j\omega\mu \cdot \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot N_\phi$$

$$E_\theta = -j\omega\mu \cdot \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot N_\theta$$

$$H_\theta = j\omega\mu \cdot \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot N_\phi$$

$$H_\phi = j\omega\mu \cdot \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \cdot N_\theta$$

A partir de estos vectores se define la intensidad de radiación como:

$$K(\theta, \phi) = \frac{\eta}{4\lambda^2} [|N_\theta|^2 + |N_\phi|^2]$$

Por último, podemos definir el diagrama de radiación en campo lejano de una antena en base a la intensidad de radiación normalizada con el máximo:

$$t(\theta, \phi) = \frac{K(\theta, \phi)}{K_{max}}$$

Particularizando para el caso básico de un dipolo (un hilo conductor idealmente infinito) orientado según el eje z, debido a sus propiedades podemos considerar que los campos radiados están linealmente polarizados con θ y que el diagrama de radiación tiene simetría de revolución, por lo que es independiente de ϕ .

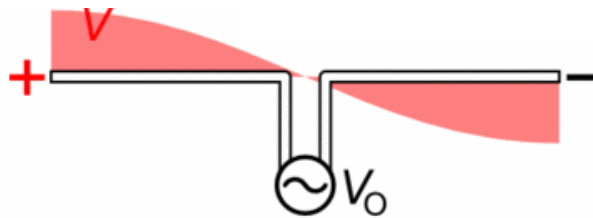


Ilustración 6: Dipolo elemental

El diagrama de radiación resultante es el siguiente:

$$t(\theta, \phi) = (\sin \theta)^2$$

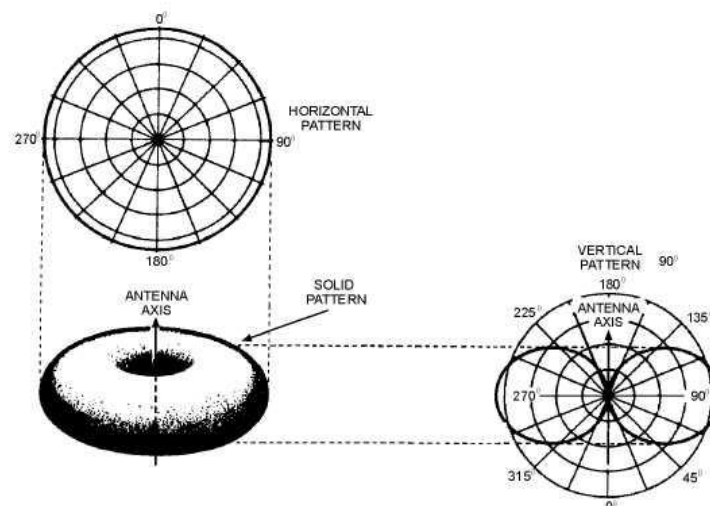


Ilustración 7: Diagrama de radiación de un dipolo

Este caso resulta de especial interés ya que posteriormente lo extrapolaremos a las antenas de ranura. Como podemos observar en la imagen superior, el diagrama de radiación del dipolo tiene forma de toroide, situándose el dipolo en su eje central. Tiene simetría de revolución en uno de sus planos (horizontal), lo que simplifica su comprensión y es por ello que su estudio se considera básico para entender los fundamentos de radiación básicos.

1.3. Antenas de array de ranuras, SWA (Slotted Waveguide Antenna)

Las antenas SWA (*Slotted Waveguide Antenna*) consisten en arrays de ranuras hechos sobre una superficie metálica. Su principio de radiación se basa en que el comportamiento de una ranura en un plano infinito es similar al de un dipolo en el espacio libre, de modo que la forma del diagrama de radiación es la misma.

En un dipolo teórico, o hilo infinito, el campo se genera por una corriente eléctrica que sigue la dirección del dipolo. En el caso de la antena de ranuras, el campo se genera por una corriente magnética aplicada en el centro.

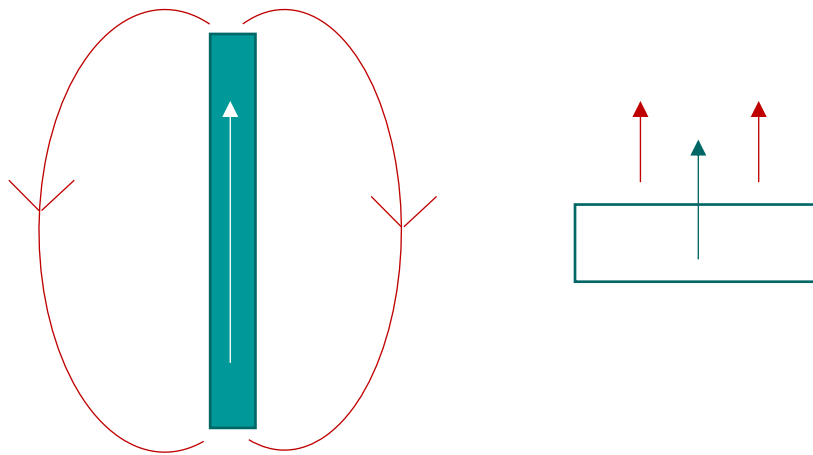


Ilustración 8: Comportamiento dual dipolo-ranura

Ya que la directividad de cada elemento individual (en este caso de cada ranura) no es muy alta, para diseños que requieren valores altos de directividad la técnica utilizada es la formación de arrays. De este modo podemos mejorar el comportamiento de un elemento individual al multiplicar el número de elementos radiantes.

Mediante un array de dos dimensiones de ranuras podemos obtener antenas muy directivas, evitando así aumentar el tamaño de cada ranura. Normalmente, para antenas omnidireccionales, es deseable que las antenas radien en el plano azimutal. Para conseguir esto debemos alimentar las ranuras en fase.

El diagrama de radiación estará inclinado hacia arriba o hacia abajo según cambiemos la fase de la alimentación. Las ranuras deben estar alimentadas en fase separando eléctricamente sus centros intervalos de media longitud de onda a lo largo de la guía de onda.

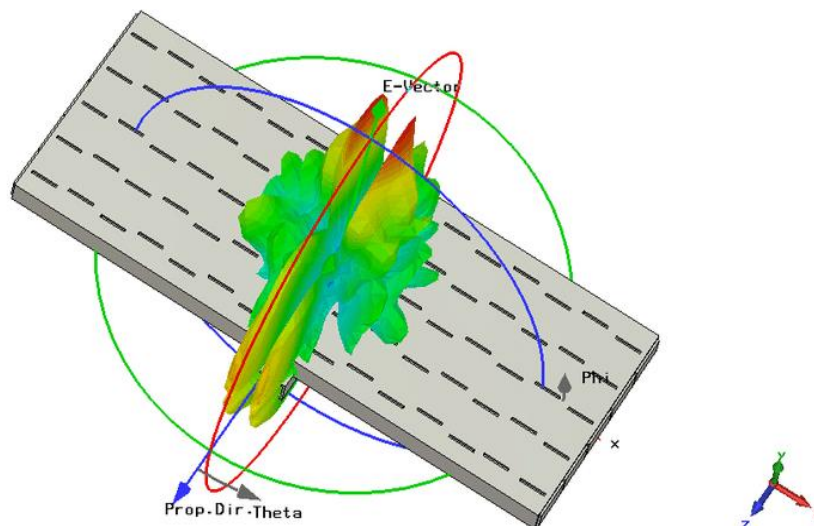


Ilustración 9: Antena de array de ranuras

La longitud de onda en una guía de onda es mayor que en el espacio libre, podemos calcularla como:

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2}}$$

Siendo λ_o la longitud de onda en el espacio libre, λ_c la longitud de onda en corte.

Este tipo de antenas tienen como ventajas un **nivel de lóbulos laterales bajo** y **gran eficiencia de apertura**. Sin embargo, su fabricación requiere tolerancias de error muy bajas y es por ello que a lo largo de este trabajo se estudiará en profundidad el método de fabricación.

Capítulo 2: Tecnología Gap Waveguide

2.1. Introducción a las Gap Waveguides

Las *Gap Waveguides* (GWs), o guías de onda de hueco, fueron introducidas por el profesor P.S. Kildal, quien patentó el concepto. [4] Este tipo de guías de onda planas están basadas en metamateriales y están formadas por dos placas paralelas. Sus características la hacen perfecta para rangos de frecuencia milimétricos y submilimétricos. [7] Las GWs han recibido mucha atención durante la última década debido a sus grandes ventajas frente a otros tipos de guías de onda.

El principio básico de las GWs es que el campo se desplaza por el hueco de aire entre sus dos placas metálicas paralelas. Alguna de sus ventajas, en comparación con las líneas de transmisión de microstrip u otros tipos convencionales, es que su estructura puede mantener un **perfil plano** además de presentar bajas pérdidas, ya que no necesita un dieléctrico. Además, esta tecnología puede realizarse sin necesidad de buen contacto metálico entre las dos placas metálicas paralelas, lo que hace que el **proceso de fabricación sea más fácil y económico**. Por estas razones, la GW es una alternativa prometedora a las guías de onda huecas y líneas de microstrip para aplicaciones de alta frecuencia. [6]

El principio que está detrás del concepto de GW es la posibilidad de crear **condición de alta impedancia** forzando al corte todos los modos paralelos a las placas dentro de un cierto ancho de banda. Idealmente, la superficie de alta impedancia es un conductor magnético perfecto (**PMC**) el cual desgraciadamente no existe en la naturaleza. Debido a esto, el PMC es sustituido por un conductor magnético artificial (**AMC**), que emula el comportamiento de un PMC dentro de una banda de frecuencias dada. [8]

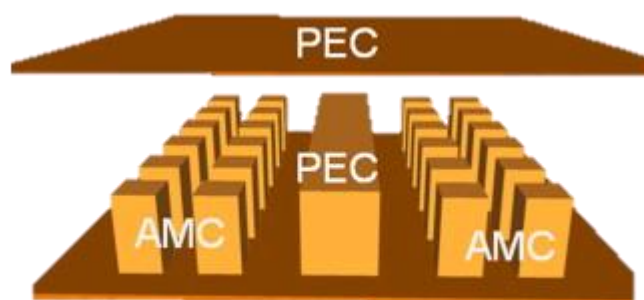


Ilustración 10: GW formada por PECs y AMCs

Por tanto, idealmente consideramos que una de las dos placas paralelas es un AMC (que sustituye al PMC ideal) y que la otra es un **PEC** (Perfect Electric Conductor). [6]

La GW se crea en el hueco entre las dos superficies metálicas paralelas. La superficie AMC consiste en una textura metamaterial basada en una estructura periódica hecha de pines metálicos. Si el hueco de aire entre las placas paralelas es inferior a un cuarto de longitud de onda, el AMC establece una condición de contorno de alta impedancia y todos los modos no deseados de la cavidad o de las placas paralelas son eliminados (dentro de una cierta banda de frecuencias denominada *stopband*). [7]

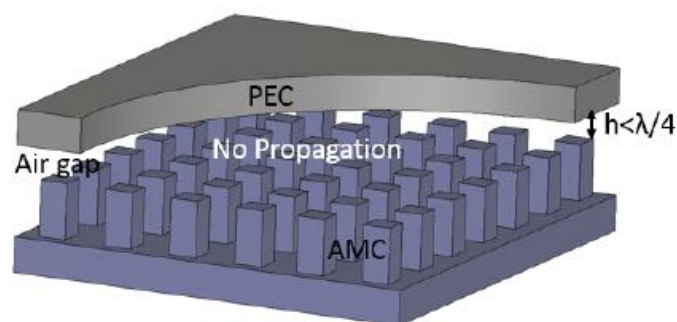


Ilustración 11: GW con separación de placas inferior a $\lambda/4$

El concepto de superficies blandas y duras ha sido aplicado para conseguir artificialmente la condición de Conductor Magnético Perfecto (PMC), con la finalidad de ser empleado en el diseño de antenas de bocina y reflectores. [7] Las superficies denominadas como blandas (*soft*) y duras (*hard*) son metamateriales que generan artificialmente condiciones de conductividad magnética. Generalmente, una **superficie blanda** detiene la propagación de las ondas, mientras que una **superficie dura** la favorece. [6]

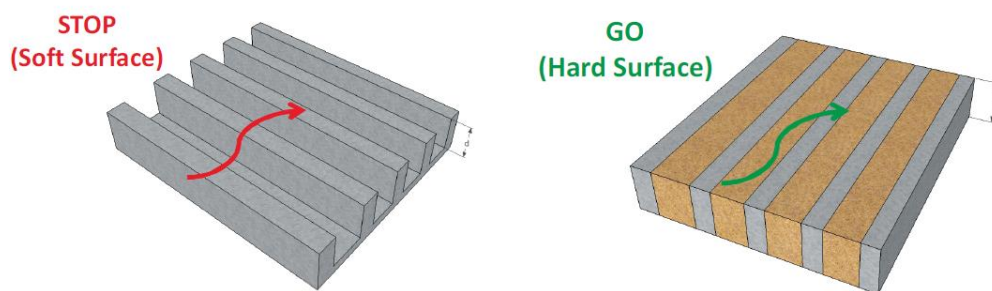


Ilustración 12: Superficies duras y blandas

Una **superficie blanda** típica es la realizada con corrugaciones transversales. Cuando la longitud d de la corrugación es un cuarto de longitud de onda, la impedancia de la superficie será infinita a lo largo de la dirección de propagación, deteniendo así la propagación de cualquier onda. Por otro lado, la **superficie dura** puede obtenerse llenando con material dieléctrico las corrugaciones longitudinales. Estas superficies se usan cuando se necesita una radiación muy fuerte. [6]

Una estructura **EBG** (*Electromagnetic band-gap*) crea una banda de rechazo para bloquear ondas a cierta frecuencia mediante una estructura con un patrón periódico formado por pequeños parches metálicos sobre sustratos dieléctricos. La forma más común de EBGs en GWs es una superficie texturizada hecha con pines metálicos periódicos, conocida como “cama de pinchos”, aunque hay otras clases como los EBG de tipo mushroom. Las superficies EBG de tipo mushroom se realizan mediante tecnología de placa de circuito impreso y parches metálicos en la parte superior de un sustrato conectado al suelo por orificios. Por esta razón, este último tipo de estructuras se pueden compactar mucho, lo que las hace perfectas para aplicaciones de baja frecuencia. [6]

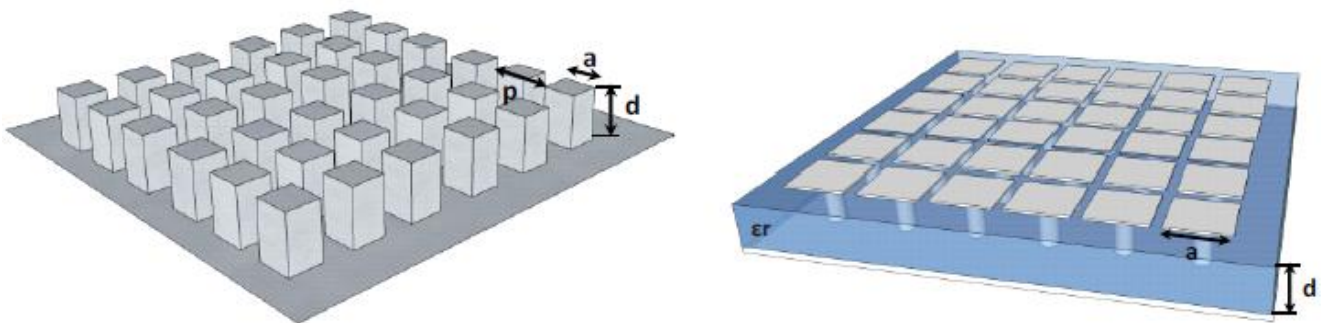


Ilustración 13: EBGs de tipo pines (izquierda) o mushroom (derecha)

Aunque las pérdidas en las guías de onda rectangulares son las más bajas, las de las GW se mantienen muy cerca de ellas. Por lo tanto, esta nueva tecnología demuestra tener **menos pérdidas que las líneas de microstrip** o incluso las guías de onda integradas de sustrato. Finalmente, la técnica de fabricación conocida como unión por difusión también ha demostrado ser una tecnología efectiva para ensamblar antenas multicapa de alta ganancia completamente metálicas en la banda de ondas mm. [4]

2.2. Tipos de Gap Waveguides

En las GWs, la propagación deseada de la onda solo está permitida a lo largo de crestas metálicas (Ridge Gap Waveguide) o cavidades (Groove Gap Waveguide). [7]

- Ridge Gap Waveguide (RGW)

En su primera implementación, se propuso y verificó experimentalmente una guía de onda de hueco de tipo cresta (**Ridge Gap Waveguide, RGW**). En las RGWs, las ondas siguen crestas de metal en la superficie texturizada. Cualquier propagación de ondas en otras direcciones está prohibida (en corte) al generar una condición de alta impedancia (idealmente un PMC) en la superficie texturizada en ambos lados de todas las crestas. [3]

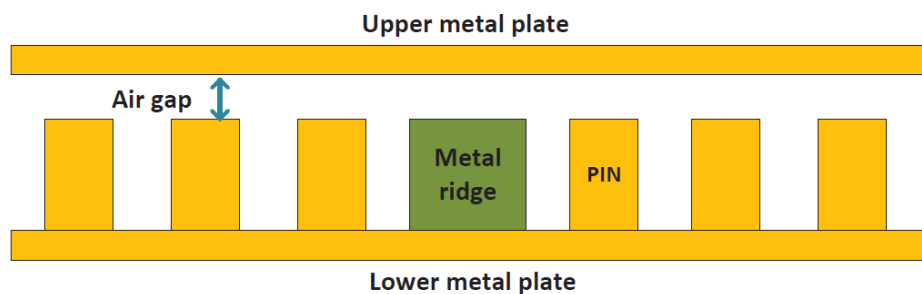


Ilustración 14: RGW vista de perfil

- Grove Gap Waveguide (GGW)

En el caso de la guía de onda de hueco de tipo ranura (**Groove Gap Waveguide, GGW**), el campo se propaga en el interior de una ranura creada en la superficie texturizada, en lugar de a lo largo de la parte superior de una cresta (como las RGW). Las condiciones de contorno para el campo en la ranura son las dadas por cuatro paredes metálicas, pero con el equivalente de una tira conductora magnética en cada una de las esquinas entre la placa horizontal superior y las dos paredes verticales de metal. En consecuencia, es esperable que la ranura permita la propagación de modos de una manera similar a la de las guías de onda rectangulares huecas, es decir, con una frecuencia de corte dada por las dimensiones de la ranura. Debido a estas similitudes, este tipo de guías de onda se puede usar potencialmente para diseñar antenas. El uso de una “cama de pinchos” metálicos como estructura periódica para crear la condición de alta impedancia tiene muchas ventajas, como su banda ancha y que se fabrica solo con metal. [3]

En una GGW, la cresta típica de las RGW es sustituida por una cavidad incrustada entre pines. La diferencia entre una RGW y una GGW es que esta última permite la propagación de modos TE/TM, comportándose de modo similar a las guías de onda rectangulares con el beneficio adicional de tener planos metálicos sin necesidad de contacto. Además, la Groove Gap Waveguide presenta menos pérdidas que las Ridge Gap Waveguides ya que hay más volumen para la densidad de corriente debido a la eliminación de la cresta.

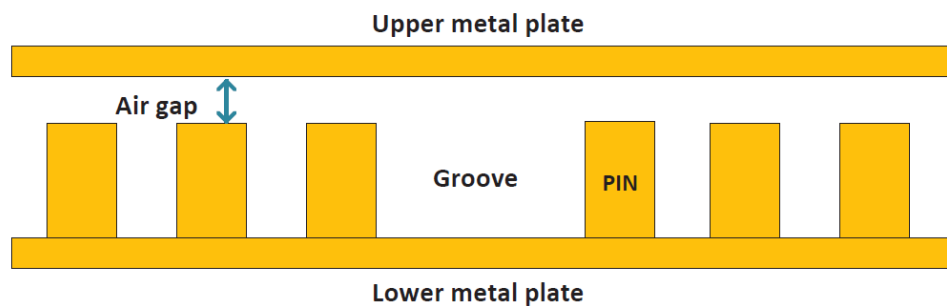


Ilustración 15: GGW vista de perfil

Todos los modos paralelos a las placas tienen prohibida la propagación dentro de la *stopband*. Se permite la propagación de la onda deseada a lo largo de la estructura que actúa como guía: una brecha metálica (RGW), una cavidad (GGW) o una pista, que soporta o TE_{01} o Q-TEM mode dependiendo del tipo de estructura utilizada como guía. [8]

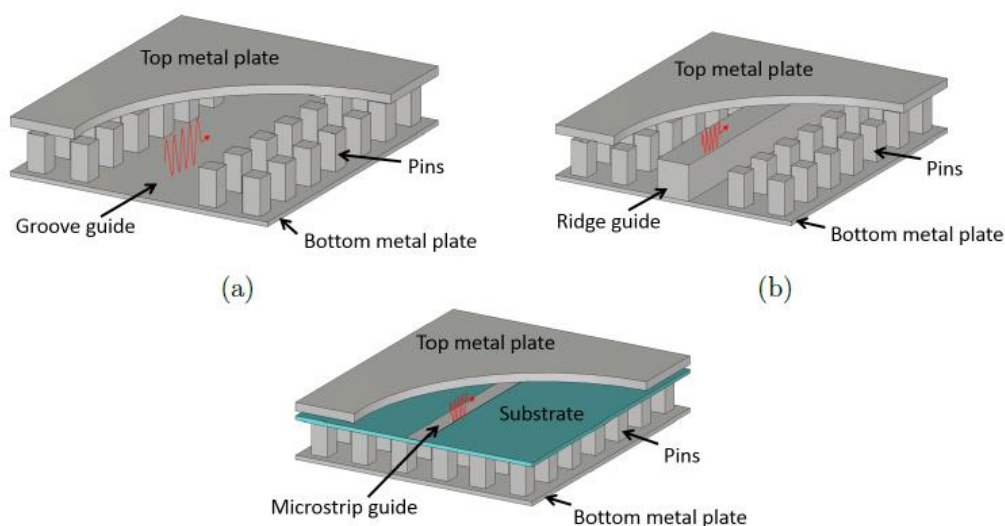


Ilustración 16: Representación de los tipos de GW

En este proyecto la alimentación de la antena estará basada en GGWs, como explicaremos en capítulos posteriores.

Capítulo 3: La técnica de fotolitografía

La fotolitografía es un proceso de microfabricación que utiliza la luz para transferir un patrón geométrico de una máscara a un fotoprotector químico sensible situado sobre un sustrato. En microelectrónica, se utilizan sustratos planos hechos de silicio, cuarzo o cristal para este propósito. En este proyecto, utilizaremos la fotolitografía como técnica de fabricación.

En el anexo 1 se describe en profundidad el funcionamiento de cada máquina de la sala limpia ISO7 utilizadas a lo largo del proyecto.

3.1. Obleas

El silicio ha sido utilizado como material semiconductor para circuitos microelectrónicos durante décadas. Una gran ventaja del silicio, comparado con otros materiales semiconductores como el germanio, es la posibilidad de generar un aislante químicamente estable con gran fuerza de campo de descomposición del sustrato mediante la oxidación térmica selectiva a SiO_2 . [9]

La concentración de impurezas en el silicio en crudo es demasiado alta para usarse como semiconductor en microelectrónica. Para conseguir las propiedades eléctricas requeridas, el silicio debe ser refinado para convertirse en silicio hiper-puro. [9] Una característica destacable de las obleas es su orientación, que expresa el plano cristalográfico paralelo a la superficie de la oblea (Ej.: 100, 110, 111). Esto tiene gran relevancia pues las características del cristal no son las mismas para todas las orientaciones y se debe tener en cuenta.

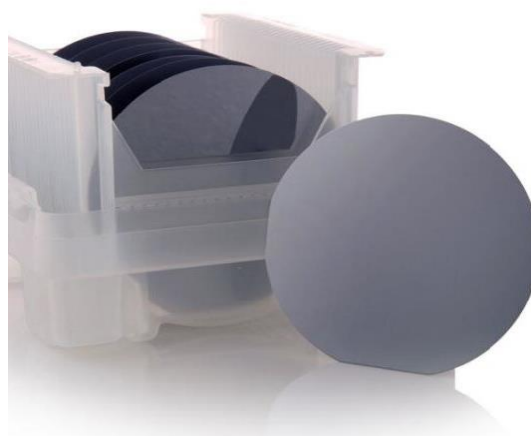


Ilustración 17: Obleas de silicio

3.2. Proceso de fotolitografía

a. Composición y propiedades de la foto-resina

La resina forma la matriz de las estructuras que están destinadas a proteger el substrato subyacente como una máscara resistiva ante los ataques químicos o físicos de procesos litográficos posteriores. Las zonas expuestas y las no-expuestas tendrán ratios de disolución diferentes en la solución del disolvente, permitiendo así la realización de una máscara fotoprotectora estructurada. [9]

Las foto-resinas son materiales poliméricos sensibles a la luz. La solubilidad de estas sustancias se ve afectada cuando son expuestas a una radiación con la longitud de onda para la que están diseñadas. Podemos clasificarlas en función de cómo les afecta dicha radiación, dividiéndose así en positivas y negativas. Una **foto-resina positiva** es aquella que se convierte en soluble en un determinado revelador cuando es expuesta a la luz. Por el contrario, una **foto-resina negativa** es aquella que de por sí es soluble en un revelador y pasa a ser insoluble en dicho revelador cuando es expuesta a la luz. [10]

En este caso, las foto-resinas que vamos a utilizar en este proyecto son negativas. La exposición de las resistencias negativas hace que se forme un ácido carboxílico que reticula la resina (proceso de *cross-linking*) haciéndola así insoluble en el revelador, mientras que las zonas no expuestas permanecen solubles en el revelador. Este tipo de estructuras reticuladas muestran comportamientos termoplásticos y por ello no presentan reflujo incluso a altas temperaturas. Además, en estas resinas, la reticulación evita un reblandecimiento térmico del perfil de resistencia. [9]

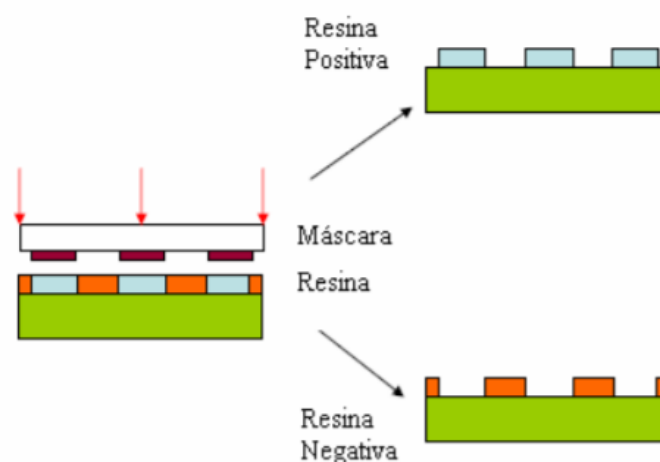


Ilustración 18: Foto-resinas positivas y negativas

b. Preparación del sustrato

La limpieza de las impurezas químicas y partículas, el calentamiento para la desorción del agua, y un tratamiento con un promotor de adhesión son parte de la preparación del sustrato para su revestimiento.

El primer paso es limpiar el sustrato. Para eliminar las partículas se recomienda encarecidamente el uso en isopropanol. Para sustratos contaminados con impurezas orgánicas, se utiliza acetona para eliminar dichas impurezas, y a continuación se limpia con isopropanol (que limpia los restos de acetona). Este proceso de limpieza previa eliminará restos de polvo, partículas abrasivas, pequeños hilos o cualquier tipo de solvente residual.

Otro modo de efectuar una limpieza profunda del sustrato es a través de un proceso de limpieza por plasma (*O₂ cleaning*). Para ello, la pieza es introducida en una cámara de plasma (en nuestro caso en una máquina llamada DRIE) donde se realiza una limpieza a nivel de átomos, asegurando así la eliminación de cualquier partícula externa.

Para conseguir una optimización del proceso, en algunos casos es recomendable usar un *Prime*, que es un promotor de adhesión que puede modificar la superficie del sustrato para mejorar las condiciones de agarre. [9]

c. Revestimiento: *Spin-coating*

El siguiente paso es revestir el sustrato, ahora ya limpio, con la foto-resina de una manera homogénea. Por ello, el revestimiento mediante centrifugación (*spin-coating*) es con mucha diferencia el método más utilizado para el recubrimiento del sustrato con la foto-resina. En esta técnica, unos pocos ml de la resina son colocados en un sustrato que es típicamente llevado a una velocidad de rotación de varios miles de rpm mediante una máquina llamada *spinner*. [9]

El proceso consiste en depositar una pequeña cantidad de resina en el centro de una oblea que, o bien está quieta (deposición estática), o bien está girando a baja velocidad (deposición dinámica), para después aumentar su velocidad de giro.

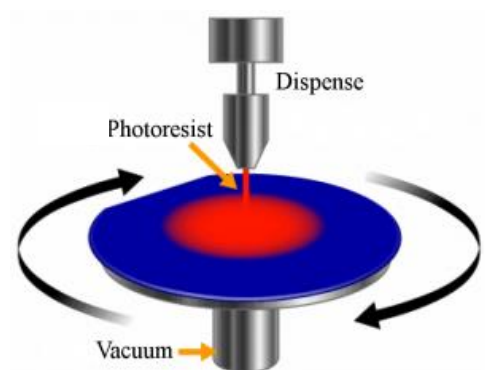


Ilustración 19: Proceso de spin coating

La aceleración centrífuga hace que la resina se extienda y obtengamos una capa muy fina de foto-resina sobre la oblea. La una velocidad a la que se acelera la oblea tras haber depositado la resina (que suele ser relativamente alta) depende del espesor deseado que queramos obtener. La aceleración juega un papel importante ya que la resina comienza a secarse durante la primera parte del ciclo de giro.

Algunos factores a tener en cuenta son que el grosor de la película resistible alcanzable decrece aproximadamente con la raíz cuadrada de la velocidad del *spinner*, y que cuanto más viscosa es la foto-resina y más lento gire el *spinner*, más larga deberá ser la ventana temporal del proceso. [9]

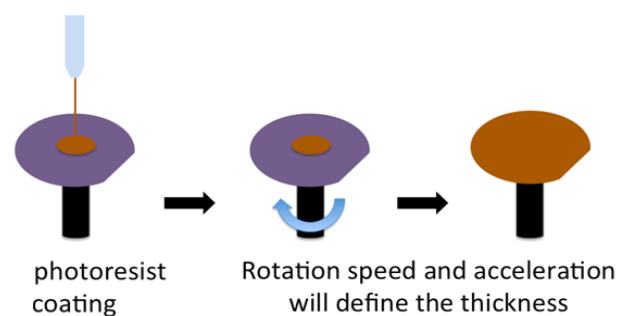


Ilustración 20: Recubrimiento de la oblea por la resina

El espesor de la película depende fundamentalmente de la fuerza aplicada para llevar la resina hasta los bordes del sustrato y la velocidad de secado, ambos factores dependientes a su vez de la viscosidad de la resina. A continuación, podemos ver una imagen que refleja el comportamiento de la foto-resina sobre la oblea en función de la velocidad de giro:

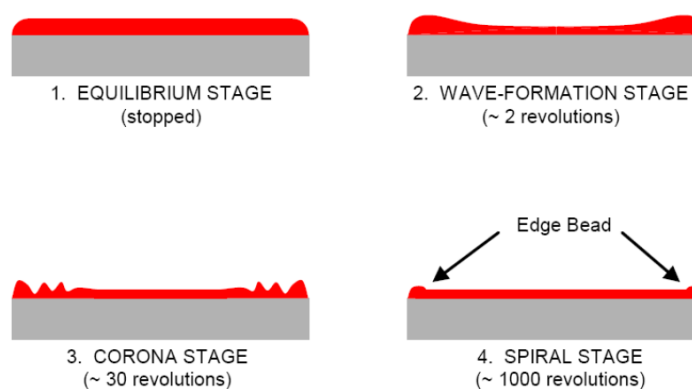


Ilustración 21: Estado de la foto-resina en función de la velocidad de giro del spinner

d. Primer proceso de cocción: *Softbake*

Los substratos cubiertos a partir de resinas líquidas poseen un alto contenido de solventes y para procesamientos posteriores deben estar suficientemente secos, esto se logra a través de un proceso de cocción previo a la exposición, denominado *prebake* o *softbake*.

Depende del grosor de la película de resina, pero normalmente dicha capa suele tener una concentración de solventes residuales de entre un 10 y 35%. El propósito principal del *softbake* es reducir dichos residuos para evitar la contaminación de la foto-máscara y mejorar la posterior adhesión al substrato. Un contenido de concentración de solventes excesivamente alto puede hacer que en estructuras resistivas negativas se inhabilite el proceso de reticulación de la resina (*cross-linking*), causando una erosión no deseada de las zonas expuestas durante el posterior proceso de revelado. [9]

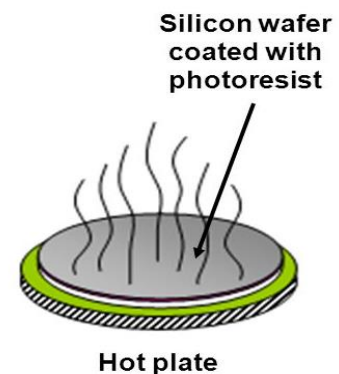


Ilustración 22: *Softbake*

Durante este paso, se densifica la resina, haciendo que normalmente su espesor disminuya un 25% tras el transcurso de este proceso.

e. Exposición

La fase clave es la exposición de la foto-resina. Este proceso químico produce un aumento (en resinas positivas) o un decremento (resinas negativas) de la solubilidad de la foto-resina en el revelador (*developer*), donde se crea una máscara estructurada. [9]

A lo largo de todo el proyecto, la técnica de exposición utilizada se realizará mediante una máquina denominada *Mask-aligner*.

Una máscara normalmente consiste en una plancha de cristal o cuarzo con un delgado revestimiento de cromo hecho con litografía para formar un patrón no transparente. Durante este proceso, una luz paralela pasa a través de las áreas transparentes de la máscara de cristal, llegando hasta la película de resina depositada en la oblea.

Para este proyecto se diseñarán hasta 7 máscaras diferentes. El diseño y fabricación de estas máscaras será explicado detenidamente en capítulos posteriores.

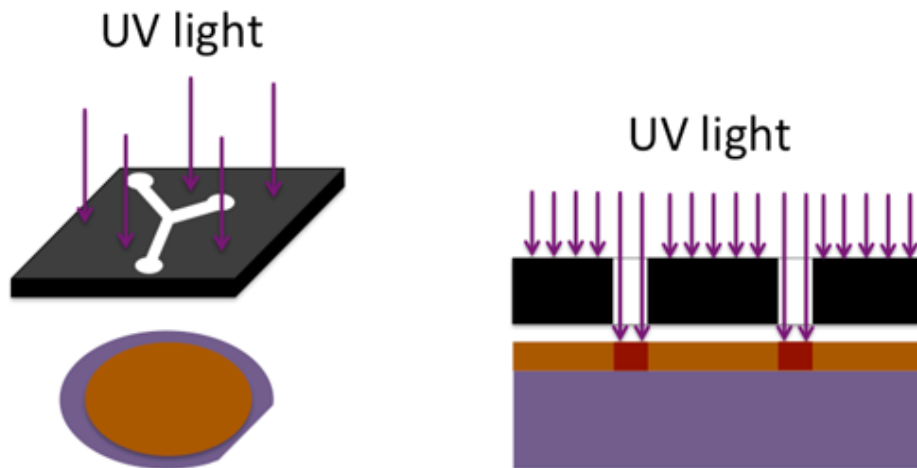


Ilustración 23: Proceso de exposición de la oblea

En el proceso de foto-resinas negativas, la exposición activa una melamina que causa la reticulación de unidades cortas de resina fenólica en cadenas más largas. En este caso, el grado de reticulación (también llamado proceso de *cross-linking*) de la resina y por tanto de la insolubilidad de la estructura resistiva en el revelador se incrementa con la dosis de luz. Sin embargo, debemos tener en cuenta que una dosis de luz excesiva puede suponer la exposición de las áreas adyacentes no deseadas. [9]

Debemos tener en cuenta que la descarga retardada del calor o de los gases formados durante la exposición pueden conducir a daños térmicos o mecánicos en la estructura resistiva.

f. Segundo paso de cocción: *Post-exposure bake*

Con el *post-exposure bake* (PEB) nos referimos al paso de cocción que tiene lugar justo después de la exposición. Mediante este proceso se completa la foto-reacción iniciada durante la exposición, culminando así la reticulación de la resina negativa. Los valores normales de temperatura suelen estar entre los 100º-110º C y suele durar unos pocos minutos.

Las estructuras resistivas requieren un PEB para llevar a cabo la reticulación que se ha iniciado durante el proceso de exposición, haciendo así que las estructuras expuestas sean insolubles en el *developer* posteriormente. [9]

g. Revelado

Los reveladores (*developers*) son compuestos que disuelven determinadas foto-resinas en función de si han sido expuestas a la luz o no. Después de la exposición, la futura máscara resistiva existe como una imagen latente en la superficie, donde las áreas expuestas difieren químicamente de las no expuestas. El propósito del proceso de revelado es disolver ya sea las zonas expuestas (en el caso de resinas positivas) o las zonas no expuestas (con resinas negativas, como nuestro caso). Los reveladores están basados en hidróxido de sodio diluido, en una solución de hidróxido de potasio o en una solución acuosa libre de iones metálicos (TMAH). [9]

En el caso de tratar con foto-resinas negativas, la resina no expuesta tiene una solubilidad física suficientemente alta en los reveladores, mientras que las partes expuestas y suficientemente reticuladas muestran una erosión despreciable.

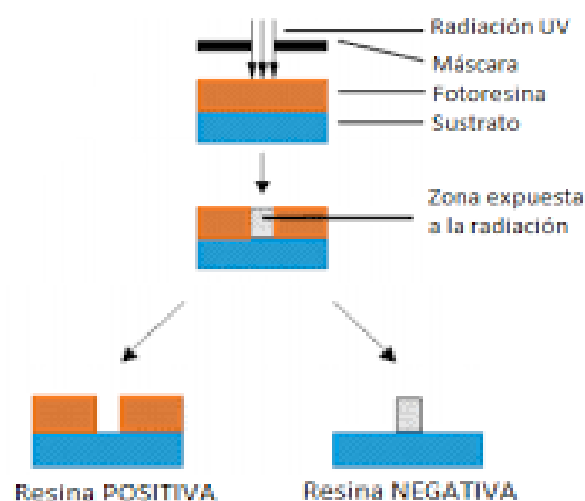


Ilustración 24: Revelado para foto-resinas positivas y negativas

h. Hardbake

El *hardbake* es un paso de cocción opcional que se lleva a cabo después del revelado de la estructura resistiva. El objetivo es hacer las estructuras más estables frente a los procesos físicos o químicos posteriores como el grabado en seco o húmedo. [9]

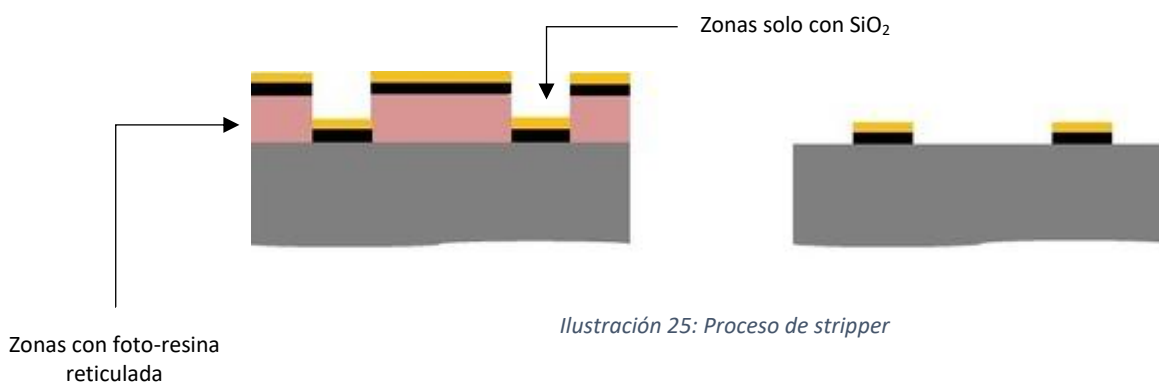
i. Creación de la *hard mask* (Deposición)

En este paso utilizaremos el evaporador *E-Beam* con el objetivo de cubrir la oblea con un material que sirva como máscara dura. En nuestro caso queremos crear una estructura de material para retrasar el posterior excavado de determinadas zonas. De este modo aseguramos que las estructuras estén protegidas. En este proyecto utilizaremos dióxido de silicio (SiO_2) como material para crear la *hard mask*. Esta máquina permite mediante presiones muy bajas la evaporación de materiales para su deposición sobre obleas. Al sacar la oblea del *E-beam* la tendremos completamente cubierta por una fina capa de SiO_2 .

j. *Stripper*

Una vez que tenemos la estructura de la *hard mask*, bajo la fina capa de SiO_2 existen partes donde directamente se encuentra la oblea y otras donde bajo el material hay foto-resina reticulada (la que ha sobrevivido al proceso de revelado al haberse endurecido por *cross-linking*).

La función del *stripper* es eliminar aquellas zonas de SiO_2 que tengan foto-resina reticulada debajo. De este modo, después de este paso únicamente habrá zonas con dióxido de silicio y zonas con el silicio puro de la oblea, ya no habrá ningún resto de foto-resina. Con el objetivo de acelerar el proceso, a veces es necesario calentar la disolución para este paso.



Como podemos observar en la imagen superior, aquellas zonas que únicamente tengan SiO_2 sobreviven al stripper mientras que este químico destruye todas las partes donde haya foto-resina reticulada.

k. Grabado: *Dry-etching*

La técnica de grabado que utilizaremos en este caso es el Grabado en Seco (*Dry Etching*). Con este método, el material no se erosiona por los compuestos disueltos en un líquido, sino por los átomos o moléculas de un gas parcialmente ionizado. El grabado en seco se lleva a cabo por la inyección de una combinación de gases en una cámara donde se ha generado plasma previamente. [11]

La erosión del material que va a ser grabado puede llevarse a cabo físicamente a través de la energía cinética de las partículas del gas o mediante reacciones químicas entre el material y el gas.

Ya que los iones del gas son normalmente acelerados por campos eléctricos perpendiculares al substrato, la eliminación del material en la dirección principal es anisotrópica.

El **Reactive Ion Etching (RIE)** es una tecnología de grabado por plasma para fabricar micro y nanoestructuras. Durante los procesos de grabado RIE, los compuestos volátiles se forman en la interacción de las superficies de la muestra y los iones / radicales de alta energía generados por el plasma a baja presión. Los compuestos volátiles se eliminan de las superficies de la muestra y se logra un perfil isotrópico o anisotrópico. El inconveniente principal del RIE es que únicamente permite realizar excavaciones pequeñas (del orden de nanómetros). Para poder excavar perfiles mayores (como micras), se necesita acudir al **Deep Reactive Ion Etching (DRIE)**. El DRIE es un proceso de grabado altamente anisotrópico utilizado para crear penetraciones profundas, agujeros, huecos y saltos generalmente con relaciones de aspecto altas. Permite realizar excavaciones mucho más profundas que el RIE y por ello será la técnica utilizada para este proyecto.

El **ICP (Inductively Coupled Plasma Etching)** es un método de generación de plasma utilizado en el DRIE para proporcionar altas tasas de grabado, alta selectividad y bajo procesamiento de daños. También proporciona un excelente control del perfil, ya que el plasma se puede mantener a bajas presiones.

Por otro lado, el uso de **HF (High Frequency)** en el DRIE y en el RIE tiene el objetivo de acelerar los iones para que ataquen la superficie. Si la superficie está polimerizada, dichos iones arrancarán los polímeros superficiales para poder excavar. Los iones son muy anisotrópicos, por lo que no excavan en las paredes laterales.

El proceso **Bosch**, también conocido como grabado por pulsos, alterna repetidamente dos modos para lograr estructuras casi verticales. En este proceso también denominado **DRIE**, el grabado es realizado por medio de pasos cortos alternando SF_6 y C_4F_8 , donde el SF_6 realiza el grabado (quien realmente excava) y el C_4F_8 proporciona pasivación lateral por medio de deposición de polímeros (para proteger las paredes verticales). [11]

Cada fase dura varios segundos. La capa de pasivación protege a todo el sustrato de futuros ataques químicos y evita que se produzcan más grabados. Sin embargo, durante la fase de grabado, los iones direccionales que bombardean el sustrato atacan la capa de pasivación en la parte inferior de la zanja (pero no a los lados). [11]

Estas etapas de grabado/deposición se repiten muchas veces. Por ejemplo, para grabar una oblea de silicio unos 0.5mm, se necesitan de 100 a 1000 pasos de grabado/deposición. El proceso de dos fases hace que las paredes laterales se ondulen.

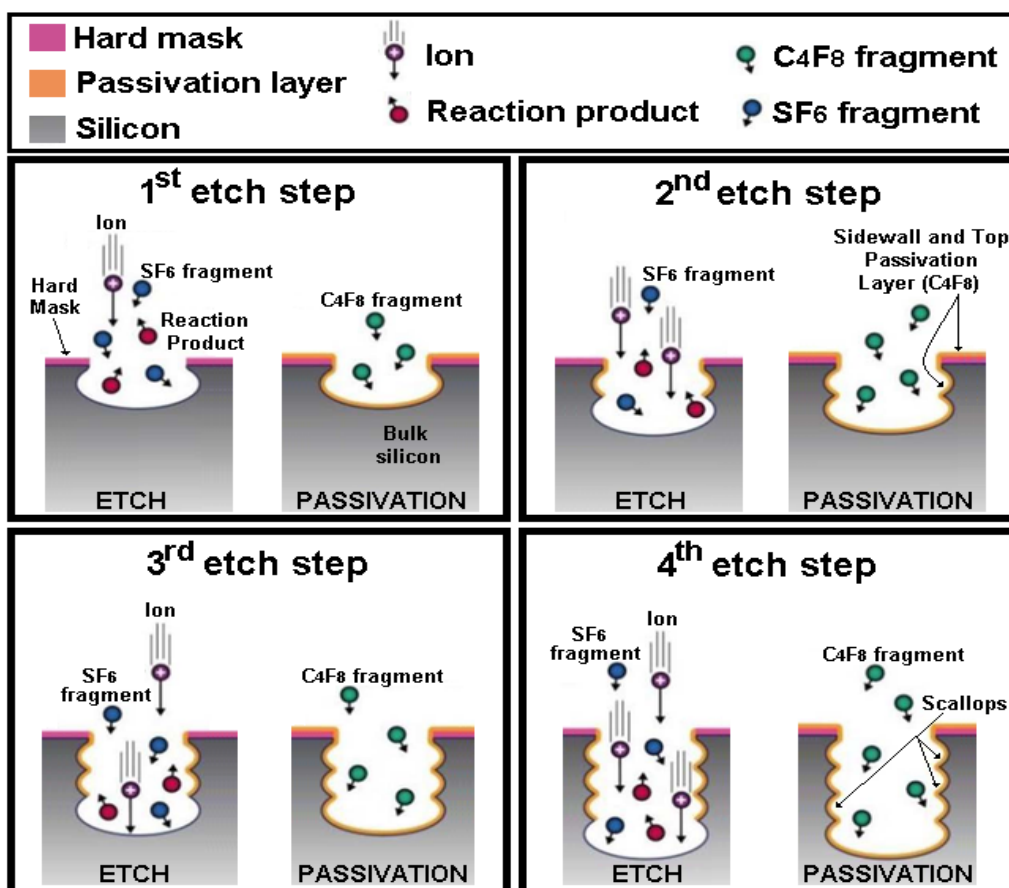


Ilustración 26: Proceso de grabado en seco [11]

Como podemos apreciar en la imagen superior, en cada uno de los pasos del proceso, primero la superficie es atacada por SF_6 y justo después el C_4F_8 polimeriza la superficie resultante. Como los iones son muy anisotrópicos sólo excavan verticalmente, de tal modo que las superficies laterales permanecen intactas y protegidas por la polimerización.

Algunos conceptos importantes relativos al *Dry Etching* son *tasa de grabado*, *selectividad*, *anisotropía* y *uniformidad*. La tasa de grabado se define a través del grosor del material a grabar por unidad de tiempo. La selectividad es el ratio entre la tasa de grabado de dos materiales que son expuestos simultáneamente al grabado, indica la capacidad de grabar solo el material deseado en relación al grabado de los otros materiales del sustrato. [11] La anisotropía describe el ratio entre tasas de grabado paralela y perpendicular a la superficie del sustrato. Por último, la uniformidad describe la homogeneidad de la tasa de grabado sobre el sustrato.

Capítulo 4: Análisis de la estructura a fabricar

En este capítulo explicaremos detenidamente la estructura. La antena está formada por varias capas: la capa correspondiente a la red de alimentación y la capa que actúa propiamente como antena. La red de alimentación está formada por una estructura que se basa en tecnología *Groove Gap Waveguide* y la antena en un array de ranuras.

Desglosaremos a continuación las características de todas las piezas.

4.1. Red de alimentación GGW

La parte correspondiente a la red de alimentación se trata de una *Groove Gap Waveguide*, formada por un hueco que hace de guía (como hemos explicado en el capítulo de GWs) y una cama de pinchos que crean la condición de alta impedancia.

En las siguientes imágenes podemos observar una vista general de la pieza en cuestión, una detallada y todas las medidas:

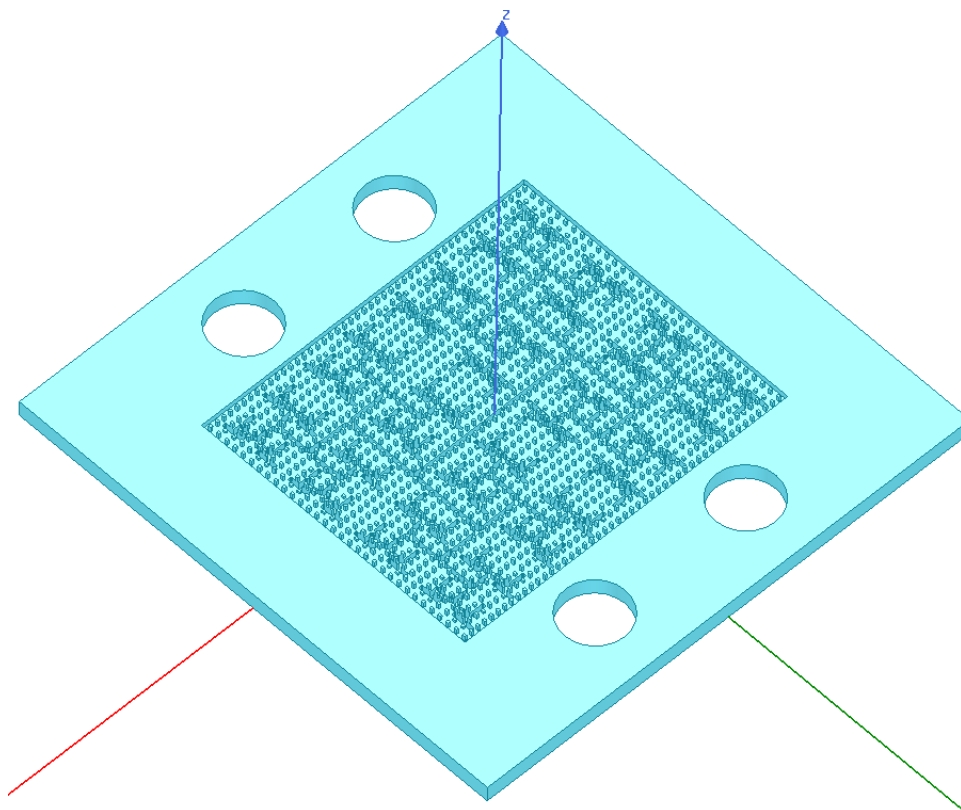


Ilustración 27: Vista en perspectiva de la estructura GGW

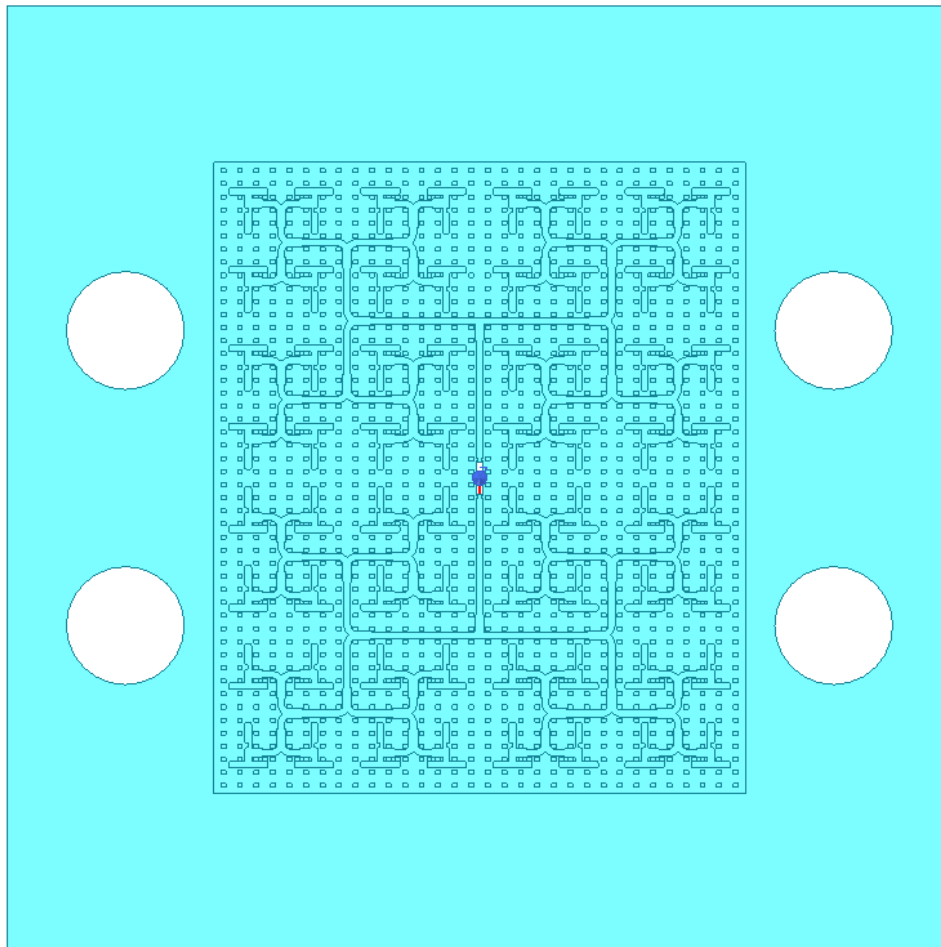


Ilustración 28: Vista en planta de la GGW

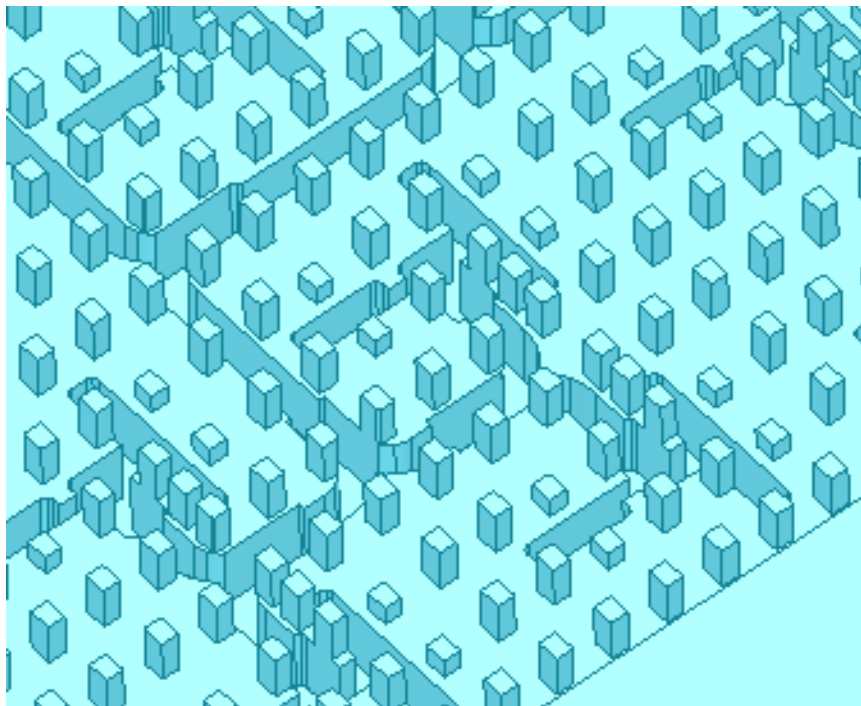


Ilustración 29: Detalle de la estructura de GGW

Tabla 1: Dimensiones de la estructura GGW

Parámetro	Dimensiones
Dimensiones pieza completa	16x16x1 mm
Dimensiones estructura GGW	9x10.5x1 mm
Altura de la base de las guías	0.58 mm
Altura superficie guías	0.83 mm
Altura pines bajos	0.907 mm
Altura pines altos	1 mm

4.2. Antena array de ranuras (SWA) para polarización lineal

Sobre la capa de alimentación de la GGW colocaremos la estructura de ranuras que actuarán como antenas, sin necesidad de polarizador. Esta estructura se denomina SWA (*Slotted Waveguide Antenna*) y en este caso consiste en un array 16x16 de ranuras con una serie de costillas a dos alturas. La función de las costillas es facilitar el proceso de fabricación, ya que el grosor de esta pieza será muy delgado y podría romperse fácilmente.

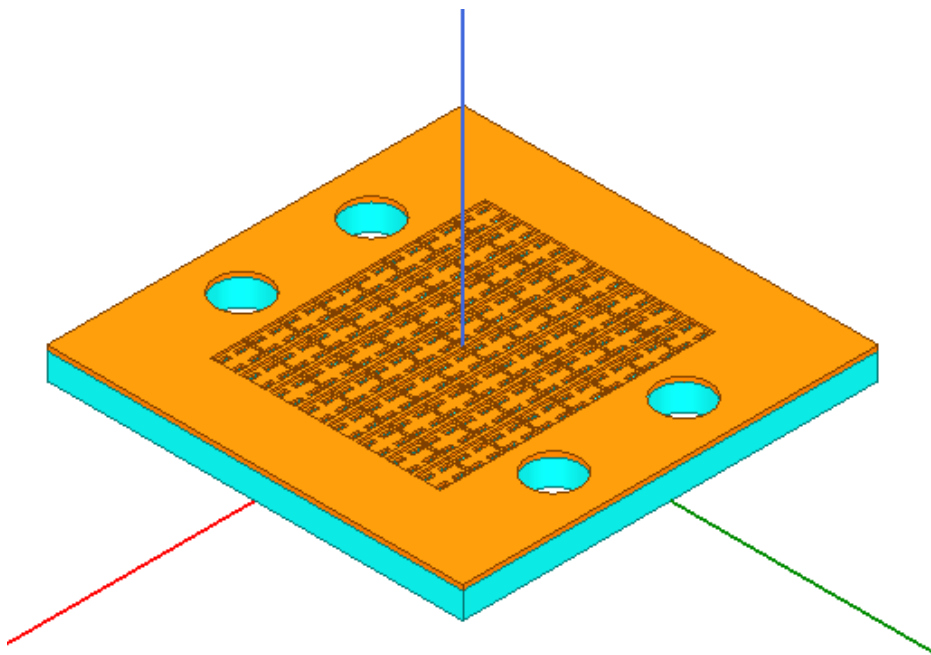


Ilustración 30: Polarizador lineal colocado sobre estructura GGW

A continuación, puede apreciarse con detalle la disposición de las costillas de la pieza:

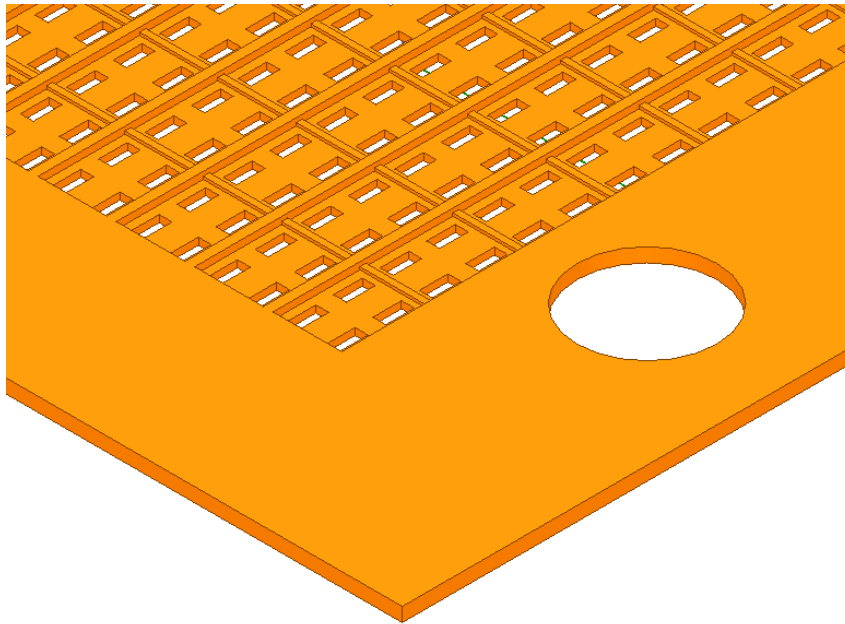


Ilustración 31: Detalle de las costillas del polarizador lineal

Las dimensiones de la SWA para polarización lineal se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2: Dimensiones del polarizador lineal

Parámetro	Dimensiones
Dimensiones de la pieza completa	16x16x0.2 mm
Dimensiones del SWA	9x10.5x0.2 mm
Profundidad de las ranuras	100 micras
Altura de las costillas bajas	140 micras
Altura de las costillas altas	200 micras

Es importante tener en cuenta que el estándar de guía de onda utilizado a lo largo de todo el proyecto es el WR-2.2, que engloba la banda de 330-500GHz.

4.4. Pieza de sujeción

Con el objetivo de proteger la antena, se ha diseñado una pieza metálica que actúe como recipiente de la estructura completa.

Consta de dos piezas, una superior y otra inferior, de tal modo que ambas encajan, albergando la pieza perfectamente protegida en su interior. Además, se han añadido tornillos para ensamblar ambas piezas.

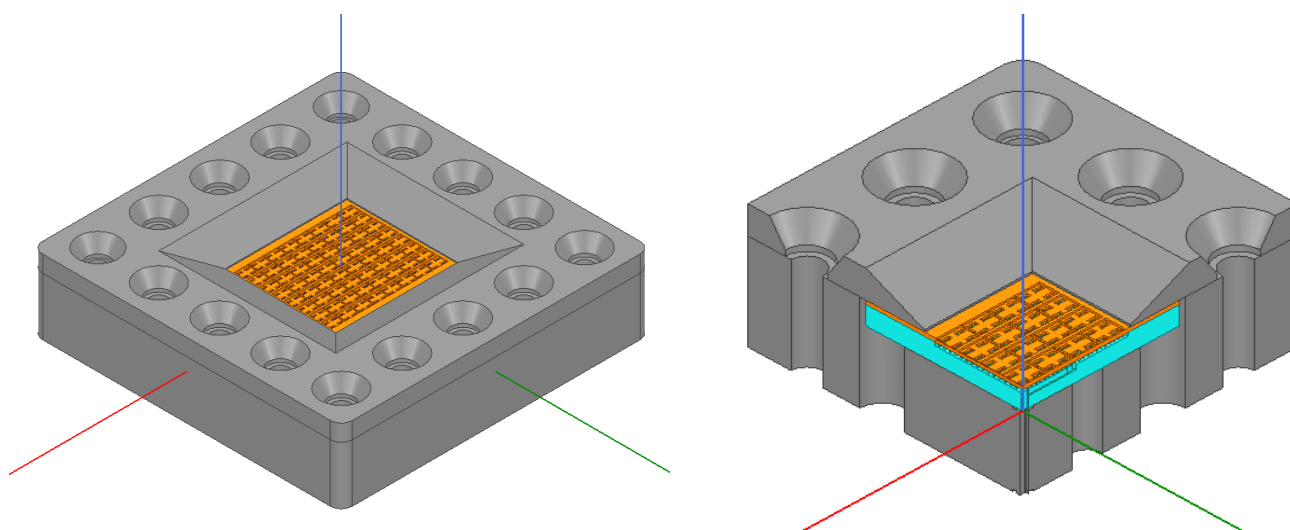


Ilustración 32: Pieza metálica para proteger la antena

Tabla 3: Dimensiones de la pieza metálica

Parámetro	Dimensiones
Dimensiones pieza completa	26x26x6.7 mm
Altura pieza superior	1.5 mm
Altura pieza inferior	5.2 mm

4.5. Resultados de la simulación en Ansys HFSS

En este apartado analizaremos los resultados teóricos obtenidos en la simulación realizada de la pieza completa con el software Ansys HFSS.

a. Directividad

Como hemos explicado en el capítulo de introducción, la directividad de una antena es la medida de la direccionalidad de su diagrama de radiación. En este caso hemos estudiado el valor de este parámetro en la banda de 400 a 440 GHz.

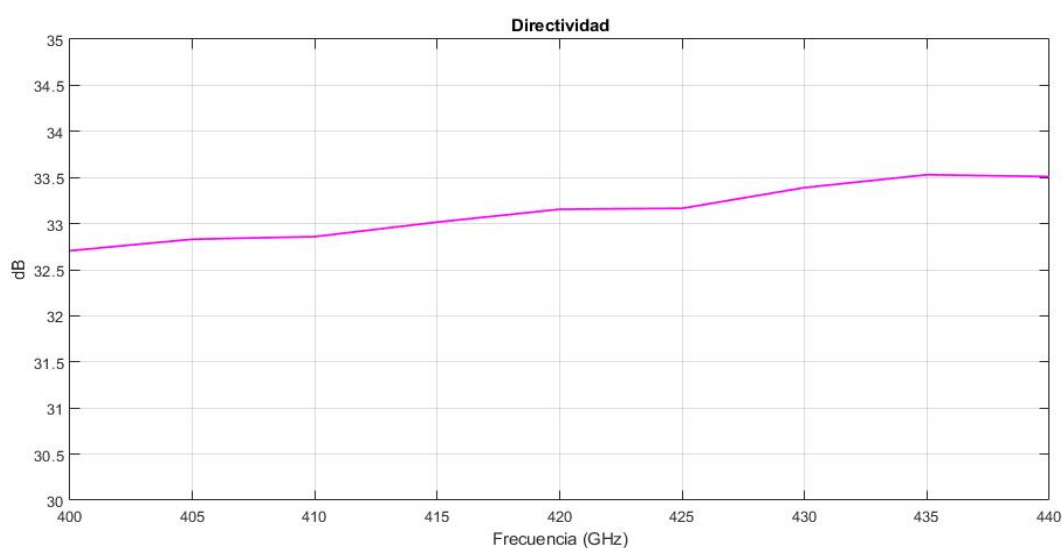


Ilustración 33: Valor de directividad obtenido en simulación

b. Polarización cruzada

Todas las polarizaciones pueden expresarse como la suma de dos polarizaciones ortogonales. Las antenas se diseñan para radiar en una de las componentes, la que se llama componente **copolar**, es la componente deseada. La radiación en la componente indeseada constituye la componente **crosspolar**.

La relación entre ambas componentes es una medida de la pureza de la polarización de una antena. El parámetro XP refleja la diferencia entre máximos de la componente copolar y la componente crosspolar.

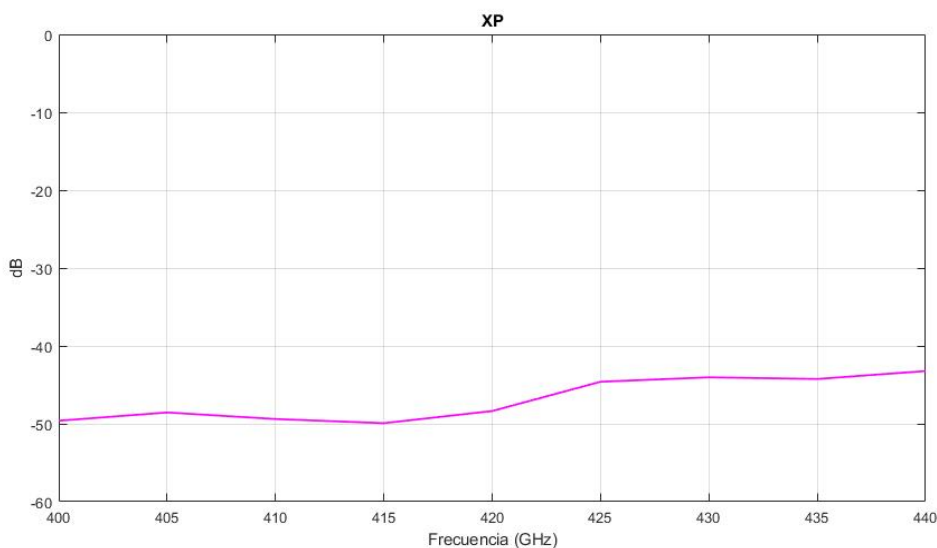


Ilustración 34: Valores de XP obtenidos en simulación

c. Adaptación

En una red básica donde el puerto 1 es el de entrada y el 2 el de salida, el parámetro S11 mide la potencia que es reflejada en comparación con la cantidad de potencia que se está aplicando en el puerto 1. Se conoce como el coeficiente de reflexión del puerto de entrada, y por ello es de especial interés para el diseño de antenas. En este caso, queremos que este parámetro tome valores inferiores a -10dB en torno a la frecuencia de operación.

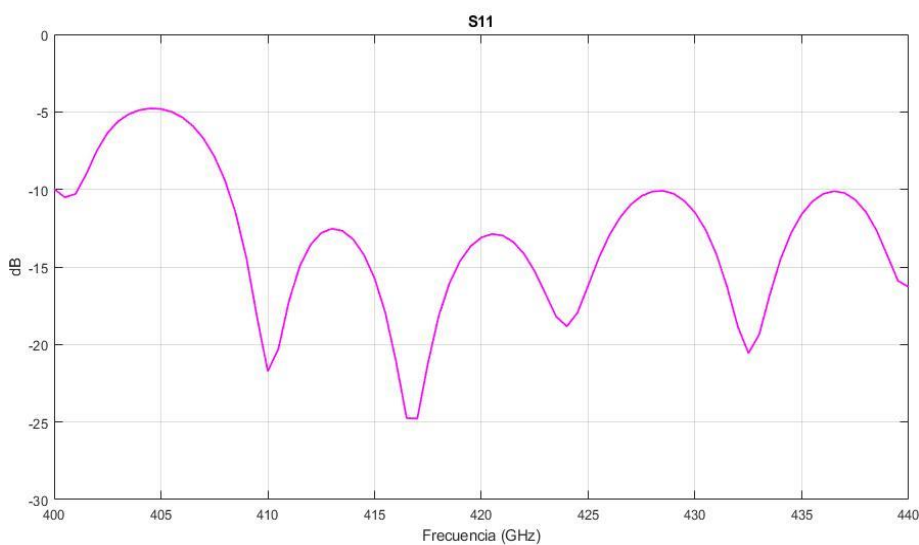


Ilustración 35: Valores de S11 obtenidos en simulación

d. Diagrama de radiación en campo lejano

A continuación, observaremos los diagramas de radiación obtenidos para varias de las frecuencias de interés, para analizar el comportamiento de antena en toda la banda de estudio.

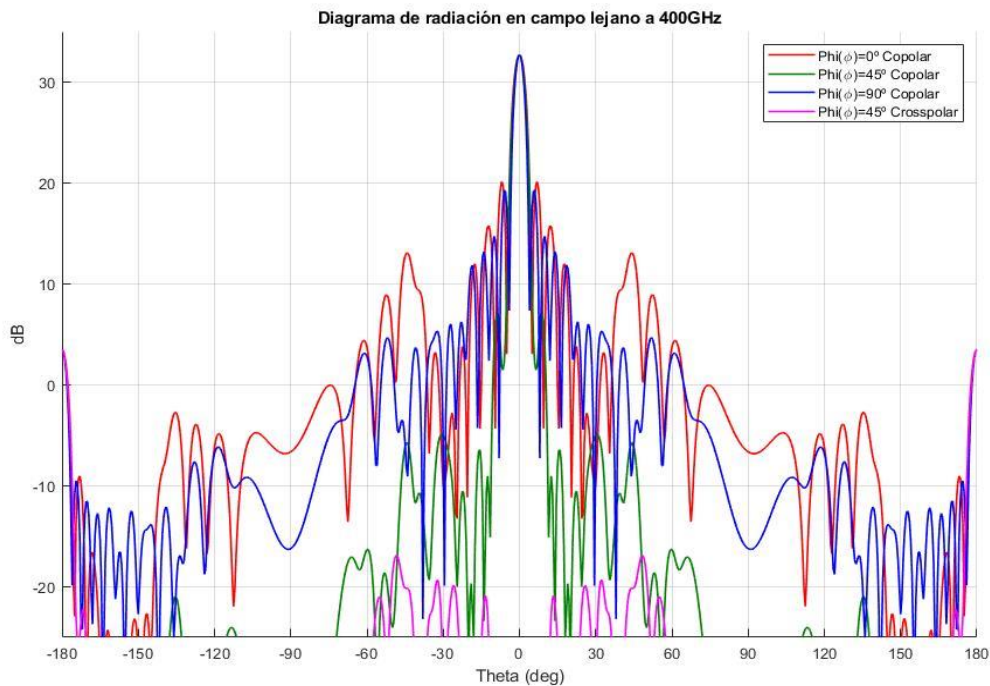


Ilustración 36: Diagrama de radiación en campo lejano a 400 GHz

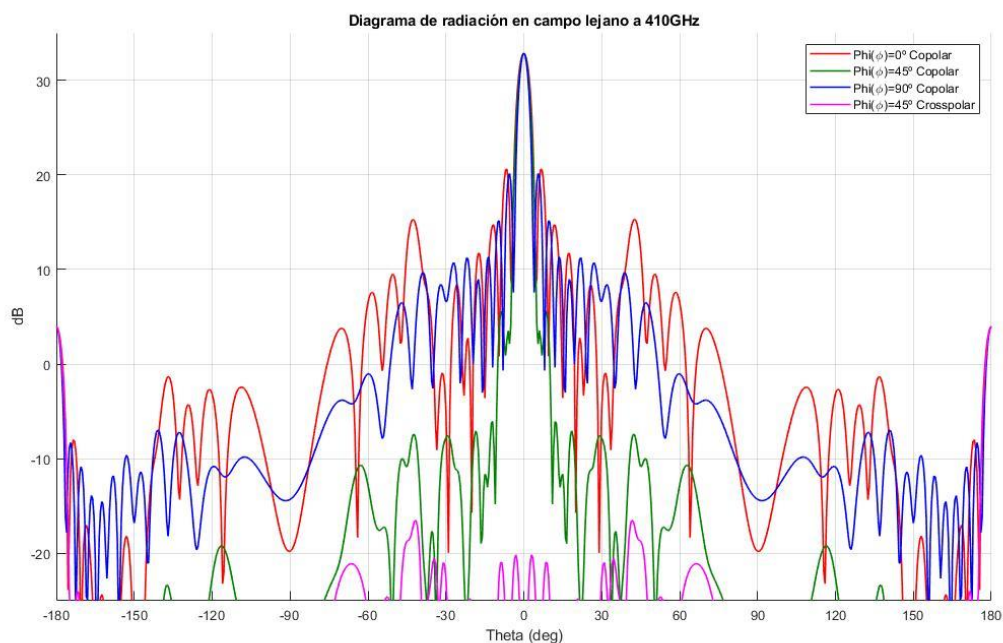


Ilustración 37: Diagrama de radiación en campo lejano a 410 GHz

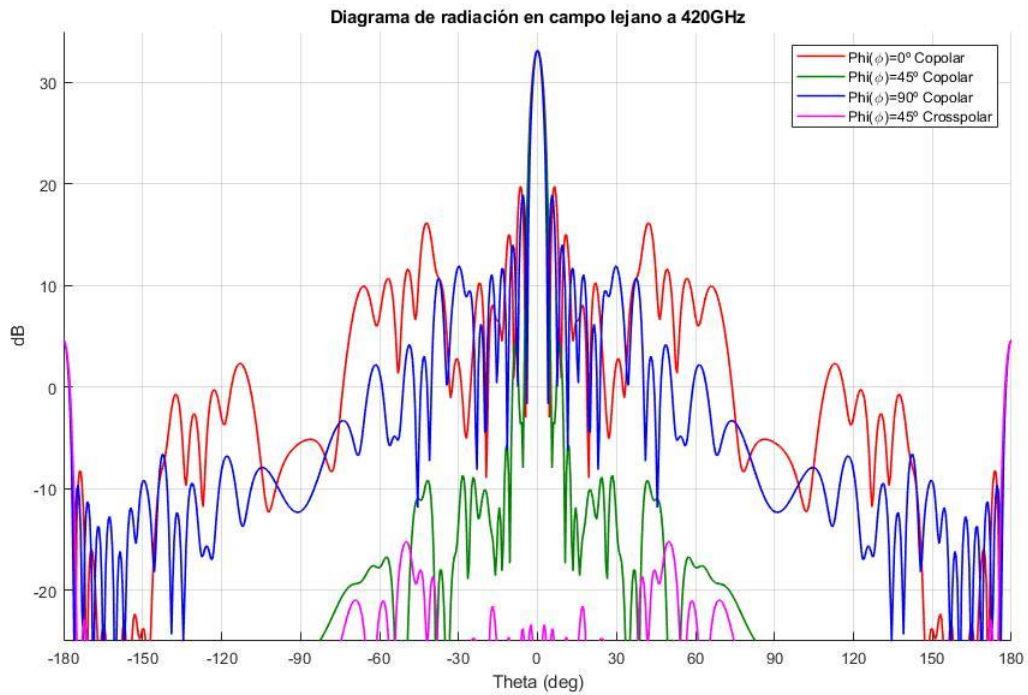


Ilustración 38: Diagrama de radiación en campo lejano a 420 GHz

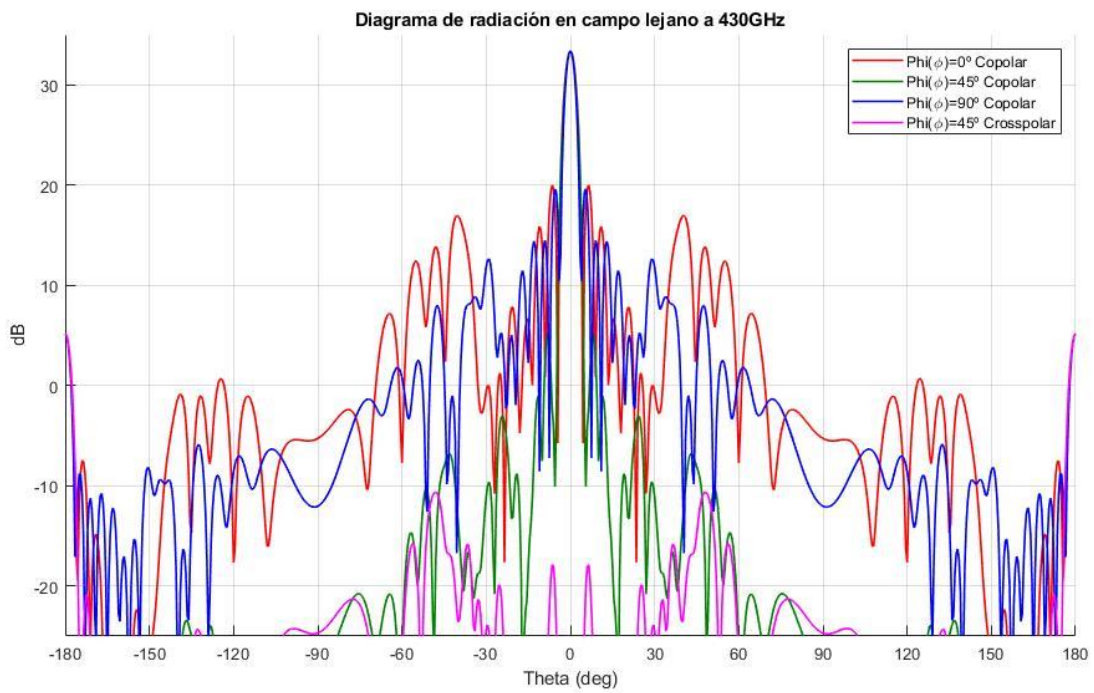


Ilustración 39: Diagrama de radiación en campo lejano a 430 GHz

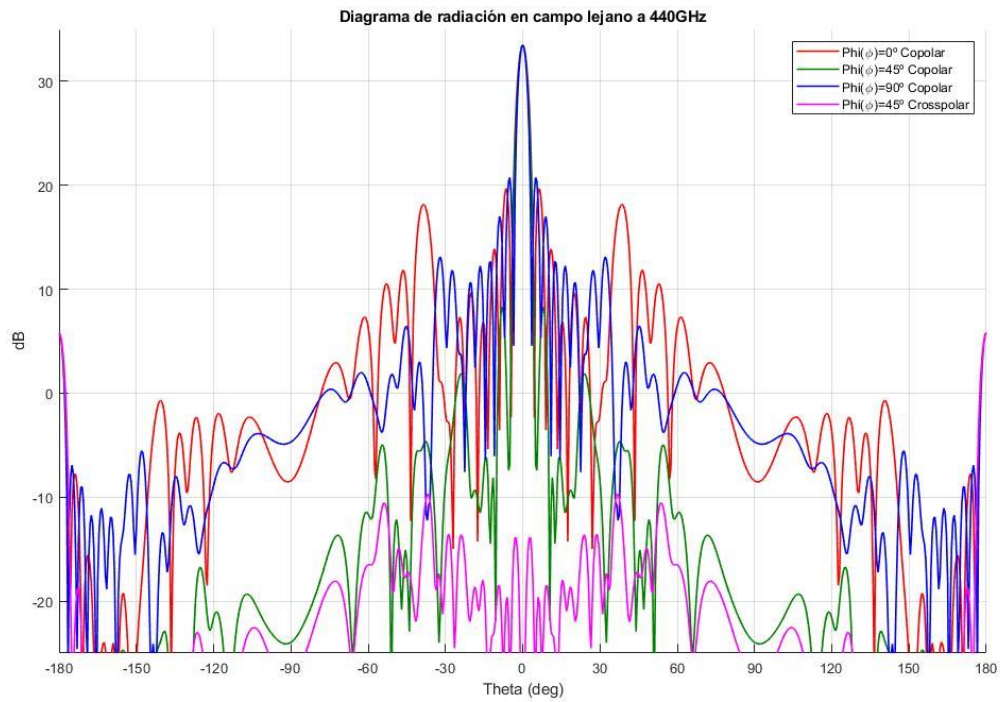


Ilustración 40: Diagrama de radiación en campo lejano a 440 GHz

Capítulo 5: Diseño y fabricación de las máscaras

En este capítulo describiremos el proceso de diseño y fabricación de las máscaras necesarias para la exposición, una de las partes clave del proceso de fotolitografía.

Como explicaremos más adelante, necesitamos realizar el proceso tanto de exposición como de metalización tantas veces como distintas alturas tiene cada pieza. El proceso base es la deposición de dióxido de silicio (SiO_2) para frenar el excavado. De este modo, iremos construyendo una matriz mediante capas de dióxido de silicio de distintas alturas, para que al introducir la pieza final en el DRIE se frene el excavado en todas aquellas partes donde hayamos depositado dicho material. Las partes que no tengan dióxido de silicio se atravesarán completamente, y en función de la altura de SiO_2 que tenga cada capa se excavará una profundidad u otra.

A continuación, describiremos el proceso completo para una sola de las máscaras, y posteriormente mostraremos el resultado final de todas ellas.

5.1. Cortes transversales de la pieza

El primer paso para la fabricación de las máscaras es la exportación de los planos correspondientes a los cortes transversales de cada una de las distintas alturas que tiene la estructura. Una vez construida y analizada la figura en el software Ansys HFSS, realizamos cortes a las distintas alturas de la pieza y los exportamos como ficheros de AutoCAD. En la imagen inferior podemos ver el aspecto que tiene uno de los cortes transversales realizados a la pieza. En este caso, corresponde a la altura de las guías (vista en planta).

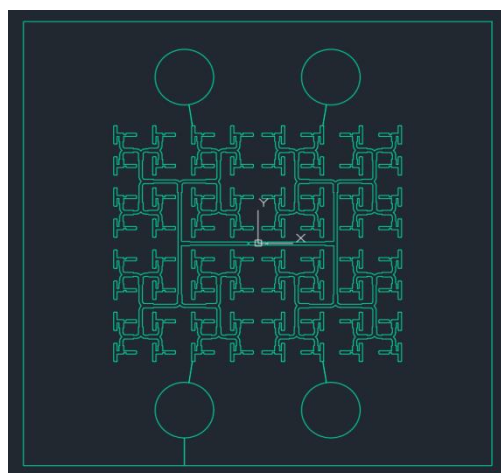


Ilustración 41: Corte transversal exportado

5.2. Constitución de la máscara completa en AutoCAD

Lo siguiente que debemos hacer es dar forma a la máscara completa en AutoCAD. En este caso, al tratarse de elementos pequeños, realizaremos una matriz de 3x3 elementos, de tal modo que en cada proceso obtengamos 9 estructuras para hacer pruebas.

Además de la matriz de los elementos principales, debemos añadir más cosas. Lo primero es añadir marcos a cada uno de los elementos, para facilitar el revelado en el proceso de la fotolitografía. También debemos enmarcar toda la estructura completa, así como poner marcas de alineamiento en los laterales. Las marcas de alineamiento nos ayudarán a poder alinear la placa a la máscara en los sucesivos procesos de exposición.

Es decir, el proceso resumido será: exponemos la placa con la primera máscara, la metalizamos, volvemos a exponer esa placa con la segunda máscara, la metalizamos, la exponemos con la tercera máscara, etc. Por tanto, necesitamos guiarnos a la hora de alinear la placa ya grabada con las máscaras, para eso utilizaremos estas marcas de alineamiento.

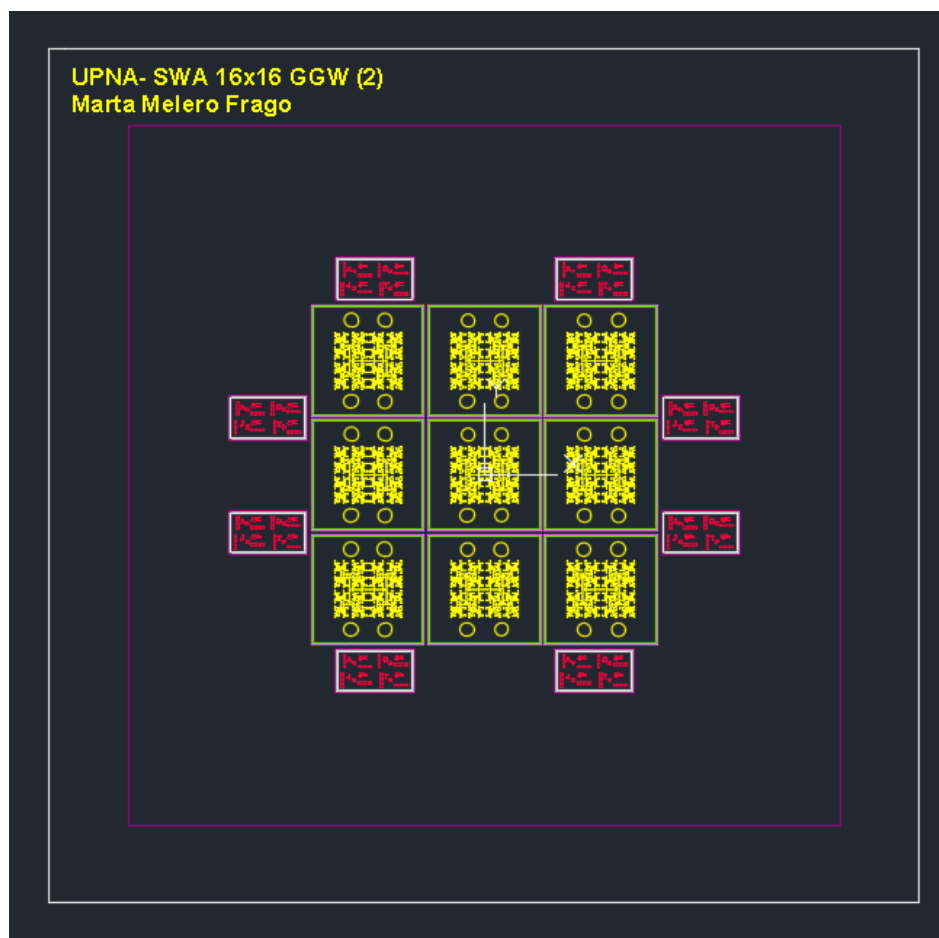


Ilustración 42: Máscara completa en AutoCAD

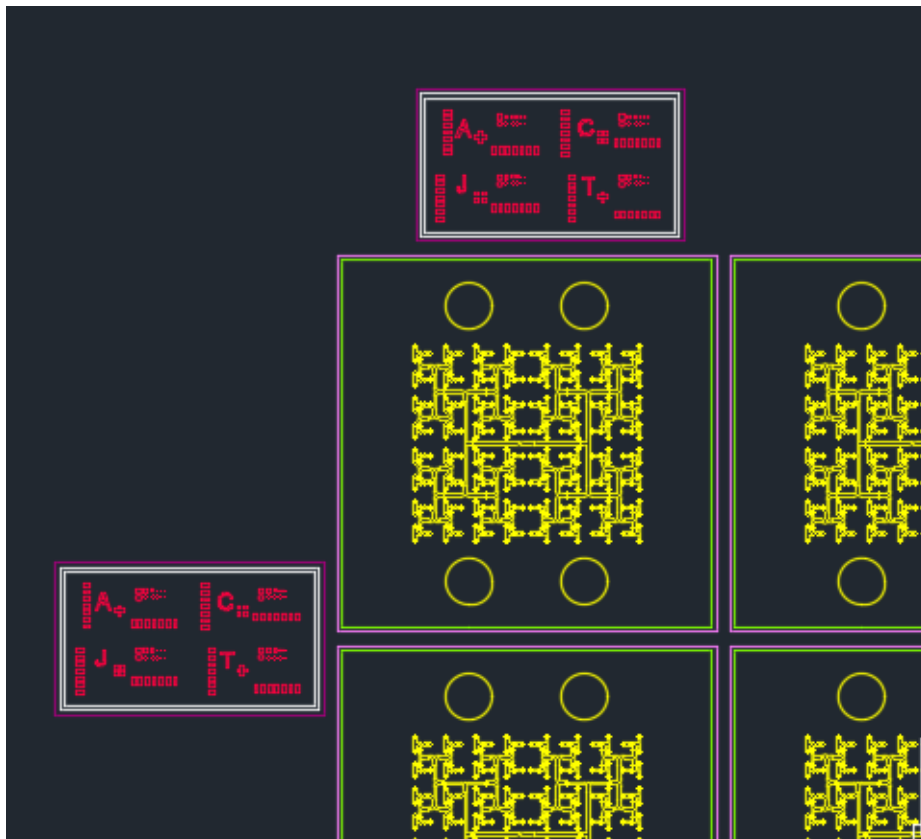


Ilustración 43: Detalle de la máscara y las marcas de alineamiento

Otro detalle importante es que las marcas de alineamiento no deben ser iguales en todas las máscaras. Deben ser iguales dos a dos, de tal modo que las marcas de las máscaras 1 y 3 sean iguales pero diferentes a las de las máscaras 2 y 4, que a su vez serán iguales entre sí.

A continuación, observaremos las diferencias:

- Marcas de alineamiento para las máscaras 1 y 3:

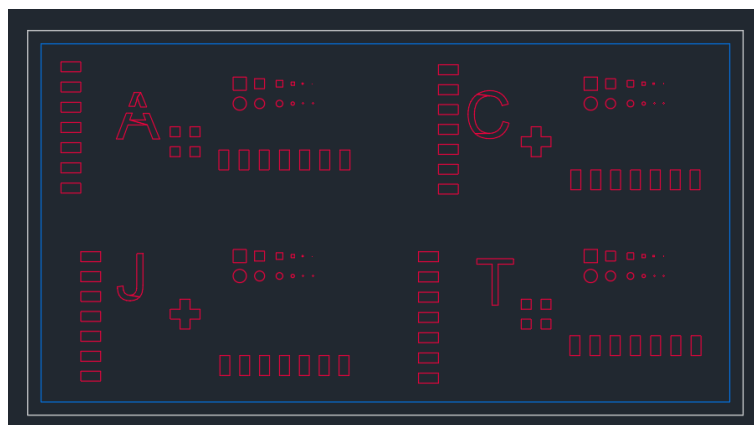


Ilustración 44: Marcas de alineamiento para máscaras impares

- Marcas de alineamiento para las máscaras 2 y 4:

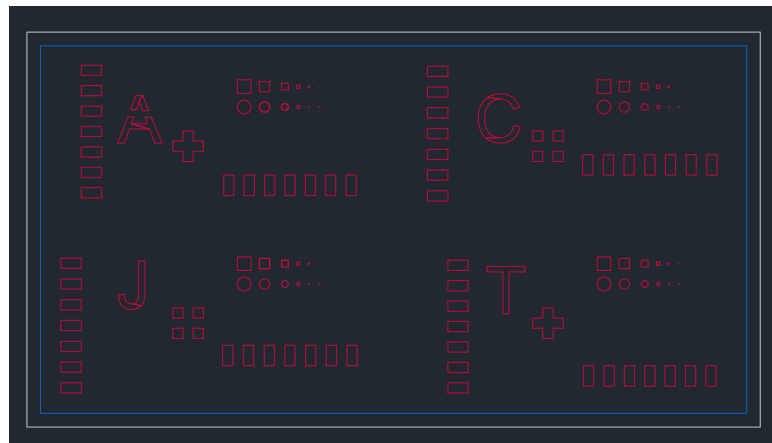


Ilustración 45: Marcas de alineamiento para máscaras pares

Al ser contrarias entre sí e iguales dos a dos, lo que buscamos es que al superponerlas la coincidencia de las letras sea perfecta, pero los slots queden pegados en vez de superpuestos.

Así es como queda al superponer las máscaras:

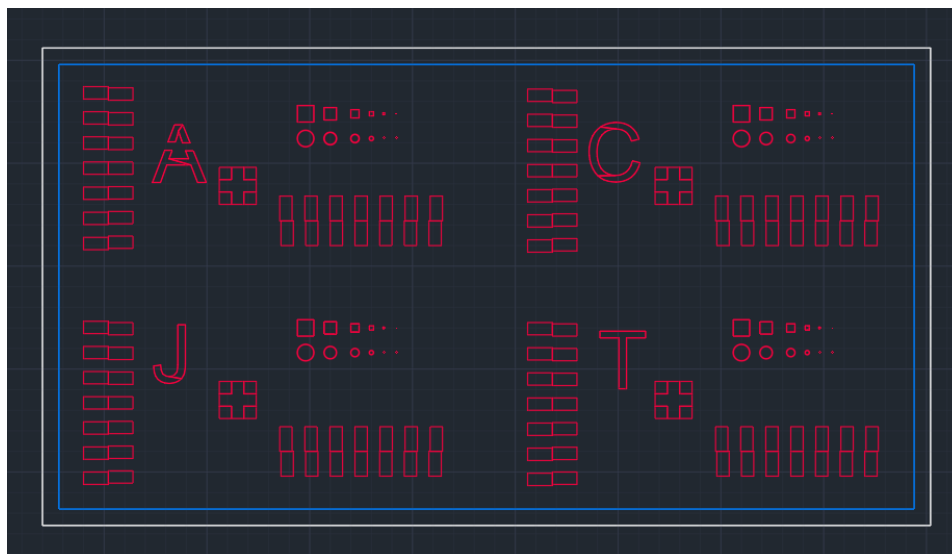


Ilustración 46: Superposición de máscaras

En la imagen superior podemos observar que las letras quedan justo una encima de la otra pero los slots no se solapan, sino que quedan unos junto a otros. Para ser conscientes de la precisión alcanzada, de cada conjunto de 7 slots, sabemos que el central debe quedar perfectamente alineado, pero el resto estarán un poco desfasados.

5.3. Creación de la máscara final con LinkCAD

A continuación, creamos la máscara final con el software LinkCAD. Mediante este programa, partiendo del archivo exportado de AutoCAD podemos crear la máscara final en dos colores (zonas por donde pasará la luz y zonas por donde no).

Tras el proceso de suma y resta de las capas creadas en AutoCAD, vamos construyendo la máscara hasta que como resultado tengamos únicamente una sola capa.

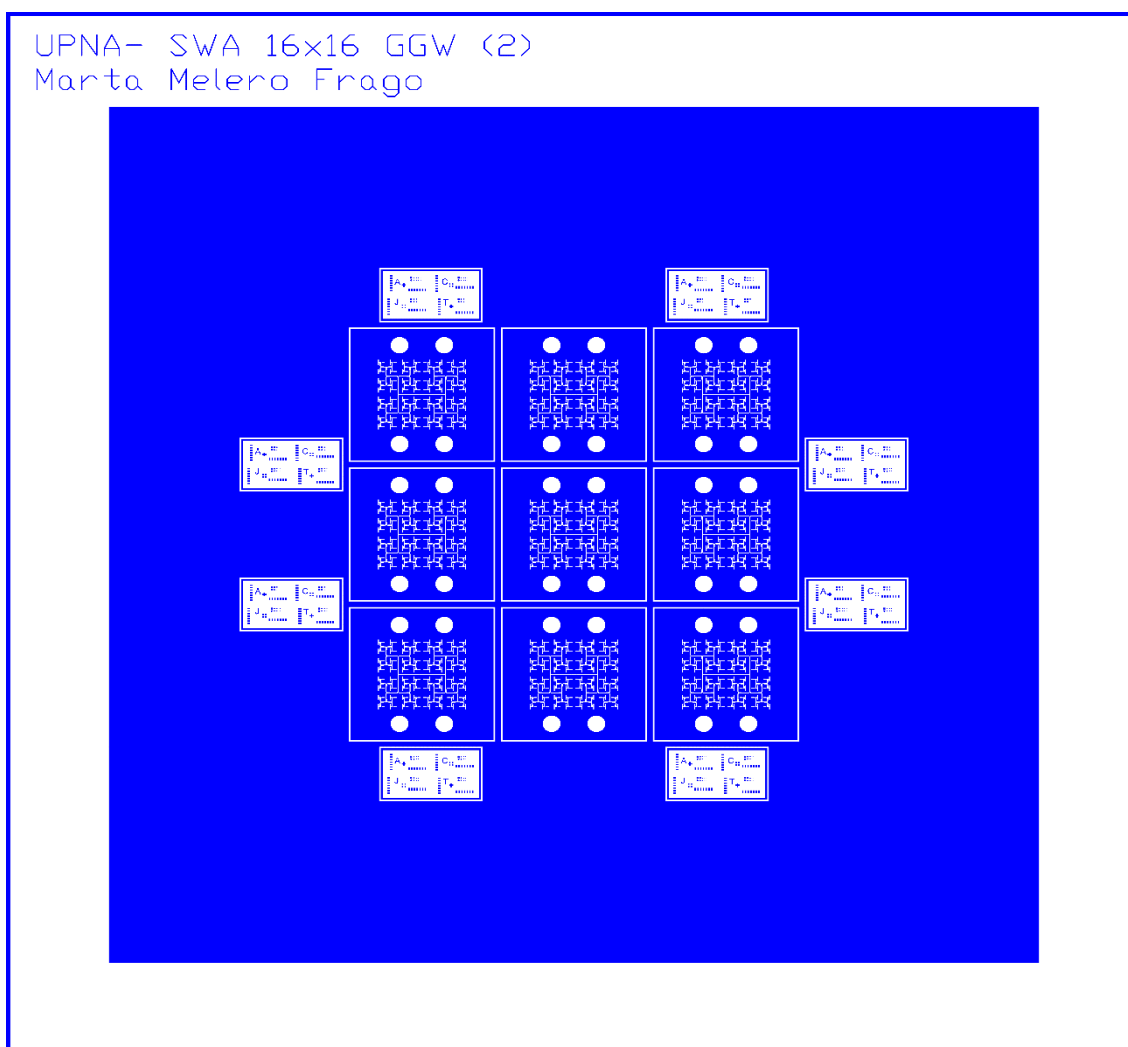


Ilustración 47: Máscara final exportada de LinkCAD

Para la máscara que hemos estado utilizando para relatar el proceso, el resultado final es:

Como hemos explicado en el capítulo dedicado a la fotolitografía, al tratarse de foto-resinas negativas, tras el paso de exposición, las zonas donde la foto-resina haya sido iluminada se reticularán y endurecerán.

En el anexo 2 se incluyen las 7 máscaras finales creadas para el proyecto

Capítulo 6: Fabricación de la antena SWA

6.1. Estrategia de fabricación

Se ha decidido comenzar la fabricación por la estructura de la antena SWA, dejando para después la estructura de alimentación GGW. El motivo es que la estructura de la antena consta de tres capas mientras que la GGW está formada por cuatro.

Se han realizado varias versiones en múltiples intentos, ya que la fabricación de circuitos de alta frecuencia es una tarea compleja y donde hay muchos errores potenciales. A continuación, se desglosa el procedimiento general a seguir para fabricar esta pieza por capas, y después se irán explicando los detalles relativos a cada etapa así como los problemas surgidos en cada etapa.

La estructura SWA tiene tres alturas distintas. El objetivo es la deposición de tres capas de SiO_2 de tal forma que cada capa tenga un grosor distinto de dióxido de silicio. De este modo, al introducir la pieza final en el *DRIE* se realizará la excavación de las distintas alturas. Cuanto más material tenga la zona menos se excavará (ya que el SiO_2 retrasa el excavado). Aquellas zonas sin dióxido de silicio se atravesarán completamente. Las etapas del proceso de esta pieza pueden resumirse en:

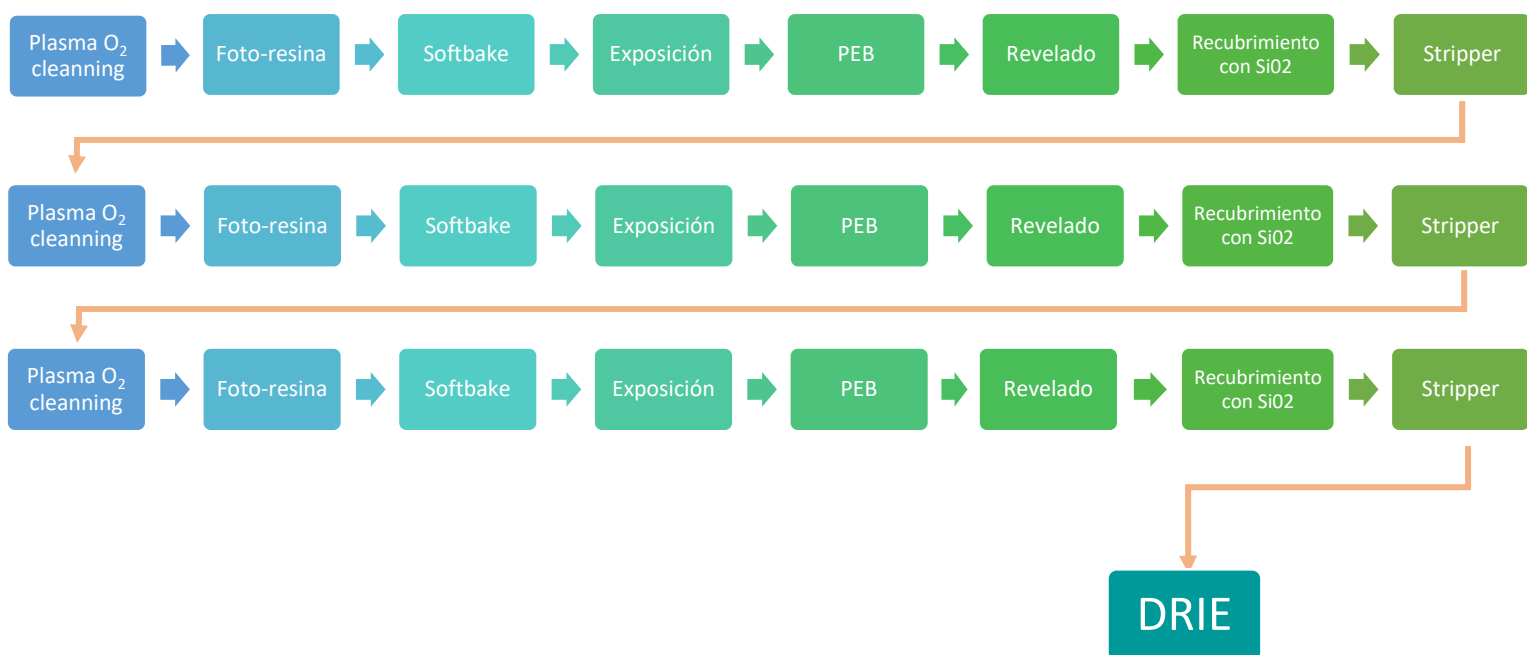


Ilustración 48: Gráfico del proceso requerido para la estructura de la antena SWA

6.2. Elección de los parámetros de fabricación

En este apartado fijaremos los parámetros que utilizaremos en la etapa de fabricación, relativos al proceso de foto-resina.

Tipo de foto-resina y parámetros principales

Durante este proyecto vamos a utilizar foto-resina negativa AZ nLOF 2070, cuyo grosor una vez depositada es de 7 micras. En el datasheet proporcionado por el fabricante se nos indican una serie de parámetros ya ajustados para este tipo de foto-resina en concreto.

Tabla 4: Parámetros proporcionados por el fabricante de la foto-resina

Paso del proceso	Parámetro
Recubrimiento	Película de 7.0µm de grosor (AZ nLOF 2070)
Soft Bake	110°C, 90s, contacto directo con la hotpalte
Post Bake Delay	Ninguno
Exposición	i-line (365 nm)
Post Expose Bake (PEB)	110°C, 90s, contacto directo con la hotpalte
Tipo de revelador	MIF, 2 puddles de 60 segundos

Los bakes los haremos de 110 grados y 90s, como indica el fabricante. Sin embargo, el revelado se realizará en 2 baños de 90s (en vez de 2 baños de 60s), porque tras varias pruebas hemos obtenidos mejores resultados.

Tiempo de exposición

El tiempo de exposición depende fundamentalmente de dos parámetros: la dosis específica que necesita cada tipo de foto-resina para reticular, y la dosis que ofrece la bombilla de nuestra mask-aligner. Conforme avanza la vida de la bombilla de la máquina, disminuye la dosis que ofrece. Para ser exactos en el proceso, se realizó un test para conocer la dosis exacta de la bombilla y su uniformidad, mediante un fotómetro. Los resultados fueron bastante estables y el valor obtenido fue de **12,7 mJ/cm² cada segundo**.

En la tabla superior, vemos que en “exposición”, nos indican que tiene que ser con i-line. ¿Y eso qué quiere decir? Pues bien, la bombilla de UV de la mask-aligner emite en dos frecuencias distintas: i-line (365 nm) y h-line (405 nm). En este caso la que nos interesa es la i-line, por lo que la medida de dosis ofrecida por la bombilla debe realizarse con esa opción elegida en el fotómetro.

El fabricante nos ofrece los siguientes datos relativos a la dosis necesaria:

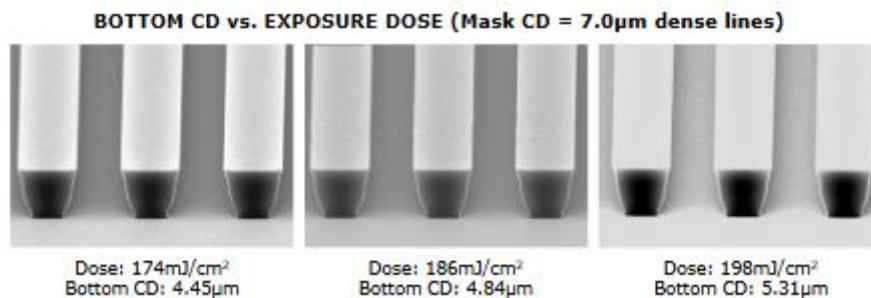


Ilustración 49: Dosis de exposición dada por el fabricante

Utilizaremos el valor intermedio, 186 mJ/cm². Con este dato ya podemos calcular el tiempo de exposición:

$$\text{Tiempo exposición} = \frac{186 \text{ mJ/cm}^2}{12,7 \text{ mJ/cm}^2 \text{ every second}} \approx 15 \text{ segundos}$$

En la imagen superior podemos observar un efecto típico de las foto-resinas negativas: su perfil tiende a formar un trapecio invertido, siendo la anchura de la parte superior mayor que la de la base. Esto es un efecto positivo que favorece la actuación del *stripper*, ya que al químico le resulta más sencillo introducirse en esas zonas para eliminar la foto-resina restante.

Grosos de SiO₂ a depositar en cada capa

Como hemos explicado durante el análisis de la estructura, la antena tiene tres alturas distintas: la correspondiente a la profundidad de los slots, la de las costillas bajas y la de las costillas altas. Cada altura lleva asociada una capa distinta, con una estructura distinta, que se solaparán creando la estructura multicapa que conforma la antena.

A su vez, en cada una de las tres etapas se recubrirá la estructura con una fina capa de dióxido de silicio. Se ha elegido este material porque, como explicaremos más adelante en este capítulo, es el material que nos permite retrasar el excavado de algunas zonas mientras otras sí son excavadas.

El grosor de cada capa de SiO₂ está directamente relacionado con la altura de las estructuras de esa capa, pero para saber sus valores primero tenemos que estimar la selectividad del proceso del DRIE.

Tras varias pruebas realizadas observamos que, echando 1,5 micras de dióxido de silicio en una superficie, se conseguía atravesar perfectamente la oblea de 200 micras, por lo que al resultar imposible medir el excavado real en ese caso, supusimos una selectividad de 200:1. (Nota: En el capítulo 7 explicaremos los errores cometidos al suponer una selectividad más baja al principio).

De este modo, seguimos el siguiente método para calcular los grosores deseados:

$$\text{Grosor de SiO}_2 = \frac{\text{Altura estructura}}{\text{Selectividad}}$$

Siendo para la primera capa:

$$\text{Grosor de SiO}_2 \text{ para la capa 1} = \frac{\text{Altura estructura}}{\text{Selectividad}} = \frac{100 \text{ micras}}{200} = 500 \text{ nm}$$

Tabla 5: Grosos de SiO₂ usados en fabricación

Capa	Altura estructura	Grosor de SiO ₂
1	100 micras	500 nm
2	40 micras	200 nm
3	60 micras	300 nm *

Nota: las alturas de las estructuras de la tabla están referenciadas en función de cuánto sobrepasan la altura anterior. Por ejemplo, las costillas bajas miden en total 140 micras, pero 100 micras ya están incluidas en la máscara 1 (capa 1) por lo que la parte extra a añadir en la capa 2 solo son las 40 micras restantes.

6.3. Etapa de deposición (estructuración)

a. Primera capa de la SWA

Siguiendo el método de fotolitografía explicado anteriormente, el primer paso es cubrir la oblea con foto-resina. En este caso, para asegurarnos que la oblea no tiene residuos hemos realizado antes un proceso de limpieza previo (*Plasma O₂ cleaning*) realizado en el *DRIE*. El objetivo es eliminar los residuos de la superficie de la oblea que puedan dificultar su recubrimiento uniforme con foto-resina.

Una vez limpia, se procede a recubrir la oblea con foto-resina negativa **AZ nLof 2070** en el *spinner* de forma dinámica. Para ello, depositamos una pequeña cantidad de la resina en el centro de la oblea para hacerla girar posteriormente. La aceleración centrífuga hace que la resina se extienda y obtengamos una fina capa sobre la oblea.

Al sacarla del *spinner*, se le realiza un proceso de cocción *softbake* para eliminar los solventes residuales y a continuación se expone. Utilizando la primera de las máscaras de la SWA (que podemos ver en el anexo 2 como “linear 1”), exponemos la estructura con la *Mask-aligner* 15 segundos. De este modo, las zonas transparentes de la máscara permitirán que la luz pase a través de ellas e ilumine la resina de esas zonas, haciendo que se endurezcan por consecuencia del proceso de reticulación (*cross-linking*).

Al terminar la exposición, se procede a un segundo paso de cocción denominado *PEB* (*Post-Exposure Bake*) con el objetivo de que la foto-resina termine de reticular.

A continuación, introducimos la oblea en el revelador **726 MiF**. Se realizan dos baños (*puddles*) de 1'30" cada uno. Entre *puddle* y *puddle* se limpia la oblea con agua destilada. Una vez en este paso se debe tener especial cuidado con químicos como la acetona o el alcohol isopropil, muy utilizados para eliminar residuos pero que ahora podrían destruir nuestro circuito. Durante el revelado, aquellas zonas que no han sido iluminadas durante la exposición se disuelven en el *developer* mientras que las zonas expuestas se han endurecido y permanecen insolubles en el químico.

Lo siguiente es construir la *hard mask*. Para ello recubriremos la oblea con dióxido de silicio (SiO₂) en el *E-beam*. Como hemos comentado en el apartado de elección de parámetros de fabricación, la primera capa de la SWA irá recubierta por 500 nm de SiO₂.

Resulta imprescindible que la adhesión del dióxido de silicio sea lo más perfecta posible. En algunas pruebas realizadas esto no ocurría y había zonas inválidas debido a que el material era disuelto en pasos posteriores.

A continuación, es el turno del *stripper*. Una vez creada la *hard-mask*, la oblea estará cubierta por una capa relativamente uniforme de 500 nm de dióxido de silicio. Al introducir la oblea en el *stripper* **NI555**, aquellas zonas donde quede foto-resina reticulada se disolverán (eliminando también la capa de metal que haya encima de la foto-resina), y únicamente sobrevivirá el SiO₂ en aquellas zonas donde no haya foto-resina debajo. La duración de este paso es de unas dos horas y se realiza a 80° para acelerar el proceso.

Una vez llegados hasta aquí ya hemos finalizado la primera capa de la estructura. En este momento tendremos un patrón de dióxido de silicio sobre la oblea. A continuación, observamos algunas imágenes de detalles tomadas con el microscopio óptico:

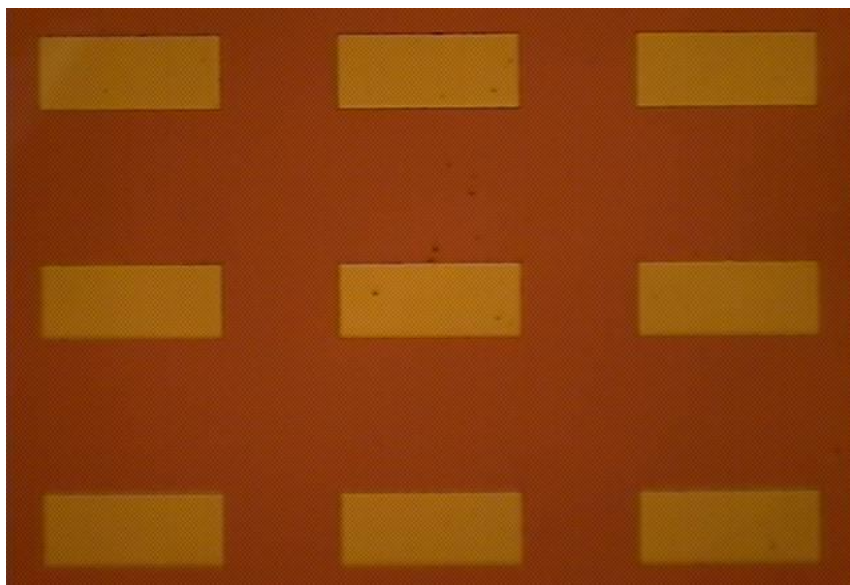


Ilustración 50: Detalles de los slots de la antena SWA en fabricación

En la ilustración superior, podemos ver un zoom a los slots de la antena. Cada antena consta de 256 slots, en este caso estamos viendo solo 9. Las partes que deben atravesarse no tienen SiO₂ y se ven de color amarillento mientras que las partes donde hay dióxido de silicio se ven rojizas.

En la siguiente imagen estudiaremos las marcas de alineamiento, que nos servirán para poder alinear con precisión las capas superiores que irán colocadas sobre esta.

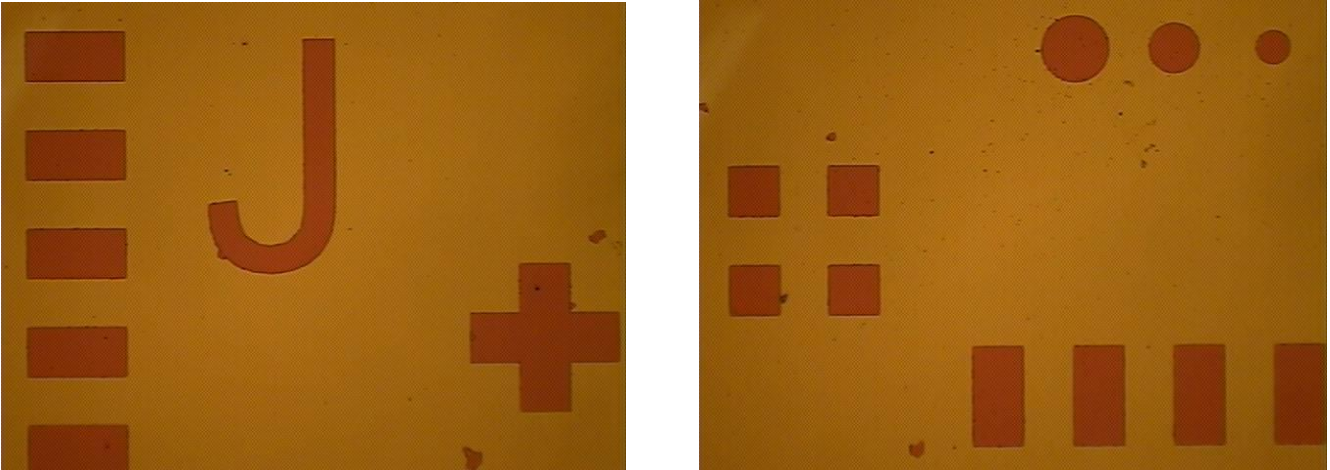


Ilustración 51: Detalles de las marcas de alineamiento en fabricación

Al igual que la imagen anterior, en este caso vemos de color rojizo las zonas donde el SiO_2 ha sobrevivido al proceso de *stripper* y en tono amarillento las zonas donde ya no queda resto del material.

b. Segunda capa de la SWA

En este caso seguimos el mismo procedimiento, pero trabajando ahora sobre la oblea ya con la primera capa subyacente en su superficie (en vez de sobre una oblea lisa). De esta manera intentaremos construir nuestra estructura multi capa.

Como podíamos apreciar en el capítulo 4, la segunda altura de la estructura SWA es la correspondiente a las costillas bajas, formada por una estructura de rectángulos donde cada rectángulo engloba a cuatro *slots*. Como la altura de las costillas bajas era de 140 micras en total, la deposición en este caso será de 200 nm de SiO_2 .

El principal reto de esta segunda capa es la **alineación**. Al exponer la oblea con la segunda máscara, debemos alinear la máscara con la estructura subyacente en la oblea (perteneciente a la primera capa) y asegurarnos que encajen perfectamente.

Este paso ha requerido de especial cuidado y paciencia, ya que un error de unas cuantas micras podría suponer la no validez de la antena. A continuación, podemos observar imágenes procedentes del microscopio donde estudiaremos el alineamiento.

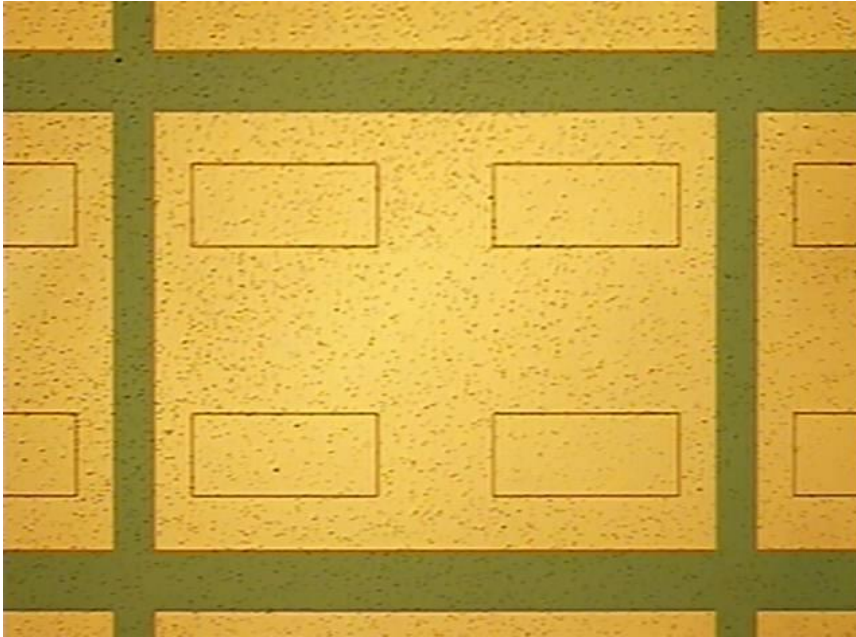


Ilustración 52: Detalle de la estructura central de la segunda capa (slots + costillas bajas)

En la imagen superior vemos las dos capas superpuestas, los *slots* de la primera (color amarillo) y la estructura de las costillas bajas de la segunda (color verde). La diferencia de tonos se debe a que el SiO₂ toma colores distintos dependiendo de su grosor.

Si miramos las marcas de alineamiento, vemos que la letra está totalmente solapada y la cruz (perteneciente a la máscara anterior) está muy bien enmarcada por los cuadrados de la nueva capa, lo que significa que en una primera aproximación el alineamiento ha sido bueno.

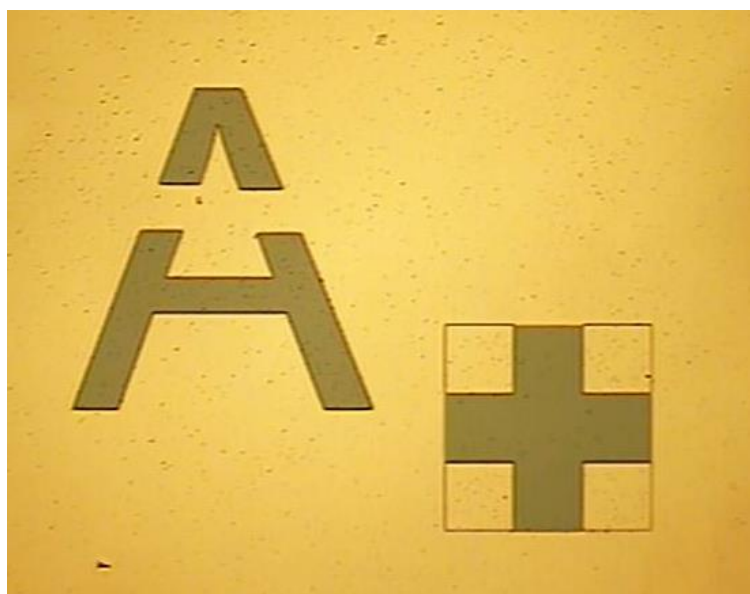


Ilustración 53: Detalle de marca de alineamiento de la segunda capa de la SWA

Para estudiarlo en profundidad, observaremos los slots de alineación. Si recordamos, hay 7 slots verticales y 7 horizontales. Los slots de las capas contrarias (por ejemplo, de la uno y la dos) no deben superponerse, sino quedar contiguos. Únicamente el slot central (el cuarto) es el que debe quedar perfectamente alineado mientras que el resto estarán desfasados respecto al central. En la imagen inferior podemos ver que efectivamente el slot central (indicado con un "4") es el único bien alineado y el resto van desfasándose un poco conforme se alejan de este.

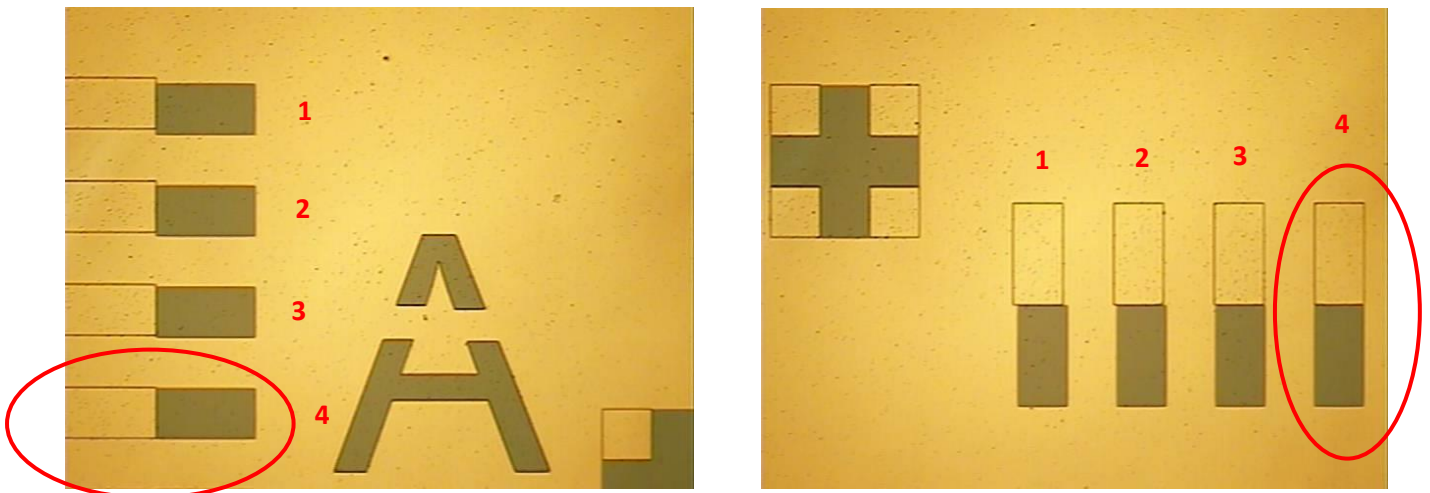


Ilustración 54: Otro detalle de las marcas de alineamiento de la segunda capa de la SWA

c. Tercera capa de la SWA

Una vez llegados a este punto, ya sólo queda una capa para acabar la etapa de deposición de la SWA. El procedimiento es similar: 15 segundos de exposición, dos baños de 1'30'' en el *developer* y *bakes* de 90 segundos a 110º.

Como la altura de esta última estructura (que corresponde a las costillas altas horizontales) es de 100 micras pero ya hemos depositado lo correspondiente a 40 micras en la segunda capa, ahora únicamente debemos añadir lo que corresponde a 60 micras más, que teóricamente serían 300 nm de SiO₂. Como esta capa corresponde a lo que no se debe excavar, para proteger toda la estructura de los ataques del DRIE se ha decidido echar 2 micras de SiO₂.

El principal reto de esta etapa es la **alineación**. Ahora tenemos dos capas subyacentes en la oblea, por lo que asegurar una alineación perfecta en la *mask-aligner* es esencial para el buen funcionamiento de la antena. A continuación, estudiaremos el alineamiento a través de unas fotos tomadas de esta capa en el microscopio óptico:

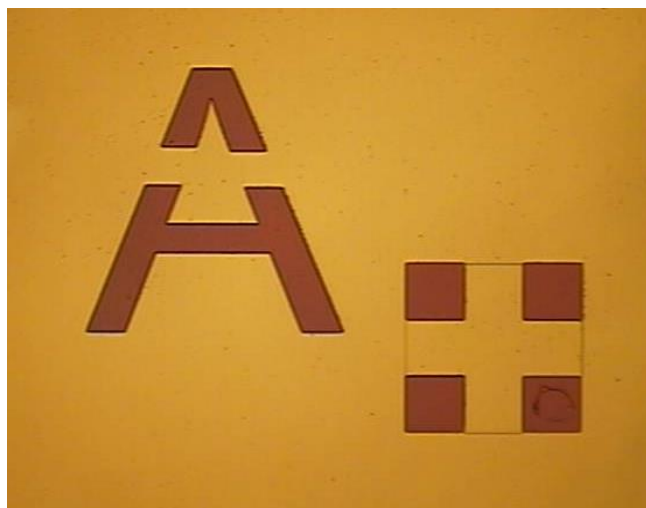


Ilustración 55: Marcas de alineamiento en la tercera capa de la SWA

En la imagen superior podemos ver que el alineamiento ha sido bastante preciso, para estudiarlo más a fondo nos fijaremos en los slots (recordamos que el cuarto slot es el que debe estar perfectamente alineado):

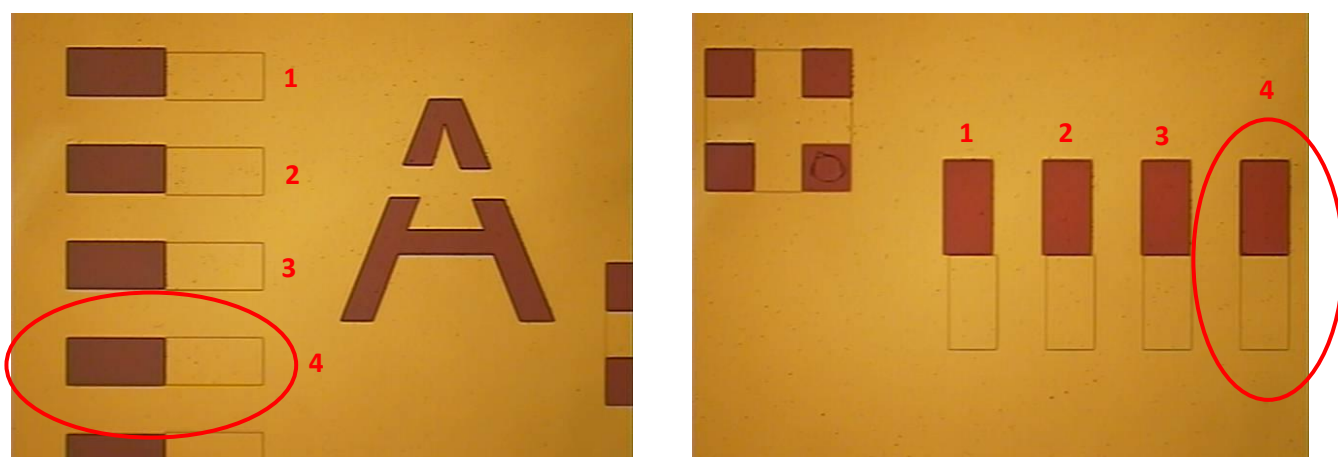


Ilustración 56: Alineación de la tercera capa de la SWA

Usando el máximo aumento del microscopio, se ha podido medir la magnitud del error de alineación cometido. Al tratarse de valores tan pequeños, la medición no es exacta pero los resultados obtenidos han sido:

Tabla 6: Valores de desalineamiento SWA

Desalineamiento	Valor
Eje X	1.9 micras
Eje Y	2.3 micras

Una vez estudiado el alineamiento observamos la estructura completa:

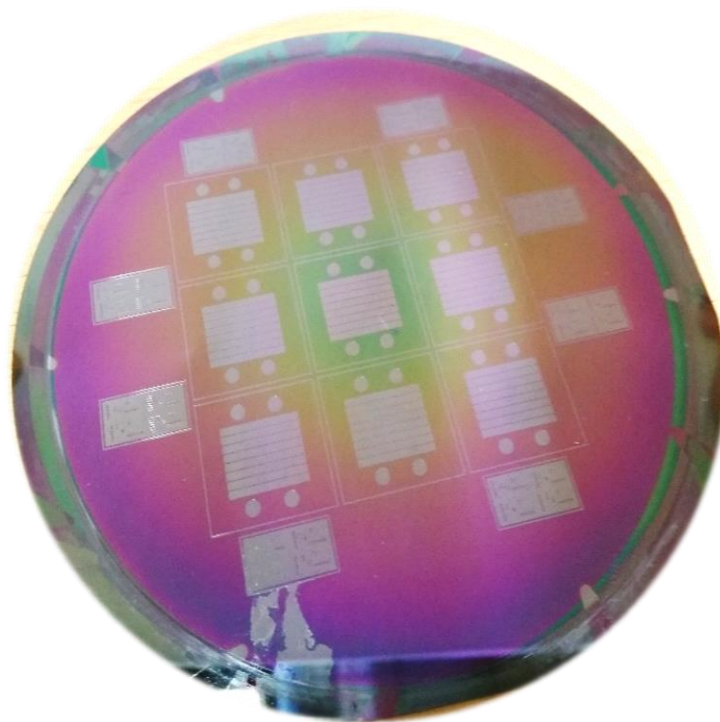


Ilustración 57: Oblea recubierta por las tres capas de SiO₂

Se puede apreciar que la oblea adquiere distintos colores, como hemos comentado anteriormente. Esto se debe a los distintos grosores de SiO₂, ya que la deposición no es uniforme y la zona central recibe más material que la periferia. Una diferencia de grosor de tan solo unos nanómetros puede cambiar completamente el resultado. En la siguiente imagen podemos observar la misma estructura en las distintas zonas de la oblea, viendo su variación de color con respecto a la distancia al centro (desde verde en el centro hasta rojo en la periferia).

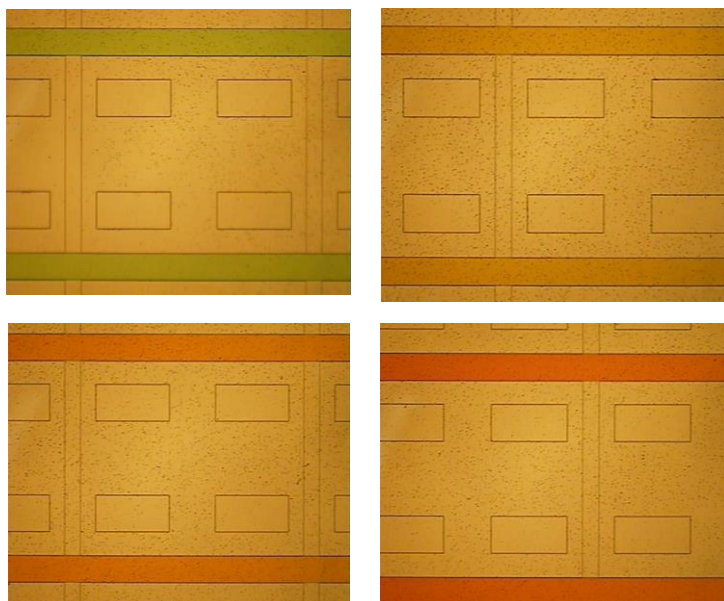


Ilustración 58: Variación del color en función de la zona (de drch. a izq. y de arriba a abajo)

6.4. Excavado en el DRIE

A lo largo del proyecto se han realizado varios prototipos y pruebas de las distintas estructuras, centrándonos primero en la estructura de la antena SWA. Algunas de las obleas trabajadas resultaban inválidas por diversas causas y fueron utilizadas para estudiar el proceso de DRIE antes de excavar la pieza definitiva. Hicimos dos tipos de pruebas:

a. Prueba de excavado por etapas

Debido a las dificultades técnicas para medir con precisión el grosor real de cada capa de material depositado, se decidió hacer el proceso por etapas, es decir, concatenando varios procesos cortos de excavado en vez de realizarlo únicamente en un paso.

Llegados a este punto, surgió un problema relativo a las características de refrigeración de la máquina de excavado (DRIE). Como ya hemos explicado en capítulos anteriores, el proceso Bosch alterna repetidamente dos modos para lograr estructuras casi verticales. En este proceso también denominado **DRIE**, el grabado es realizado por medio de pasos cortos alternando SF_6 y C_4F_8 .

En este primer intento, la oblea se introdujo en la cámara colocada sobre una oblea *dummy*, pero ambas sin adhesión. Las obleas *dummy* son obleas imperfectas utilizadas únicamente como base protectora. Lanzamos un proceso de excavado de tres etapas con 50 repeticiones (una repetición está alrededor de excavar una micra). Esto produjo que **el sistema de refrigeración de la máquina no actuase bien sobre nuestra oblea y aumentara considerablemente la temperatura del proceso**. Al sacar la muestra pudimos observar como no solo no se había producido ningún excavado, sino que se había deteriorado considerablemente el dióxido de silicio de la superficie.

En consecuencia, a partir de este momento dejamos de tener control sobre qué estaba ocurriendo, ya que los grosores de SiO_2 habían cambiado y no podíamos medirlos con exactitud. Medimos las diferencias de las distintas alturas (de forma aproximada). Para mostrarlo de forma más clara, se indican a continuación las alturas sobre la pieza del diseño:

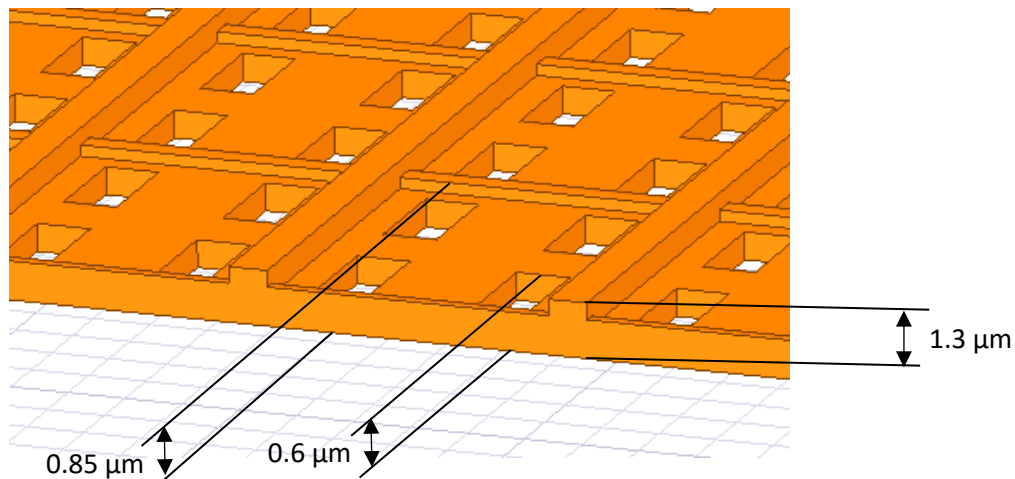


Ilustración 59: Alturas tras el deterioro del SiO₂

Para el siguiente intento, pensamos que quizá pegando ambas obleas (la nuestra y la *dummy*) con cinta de doble cara especial se mejoraría la transferencia de calor.

Ahora, ya con ambas obleas pegadas, lanzamos un proceso de excavado de tres etapas con otras 50 repeticiones. Teóricamente, esto debería suponer un excavado de unas 50 micras.

En las siguientes imágenes observamos el excavado realizado, se puede apreciar que las zonas ahora están rugosas debido a que el material superficial ha sido bombardeado en el DRIE.

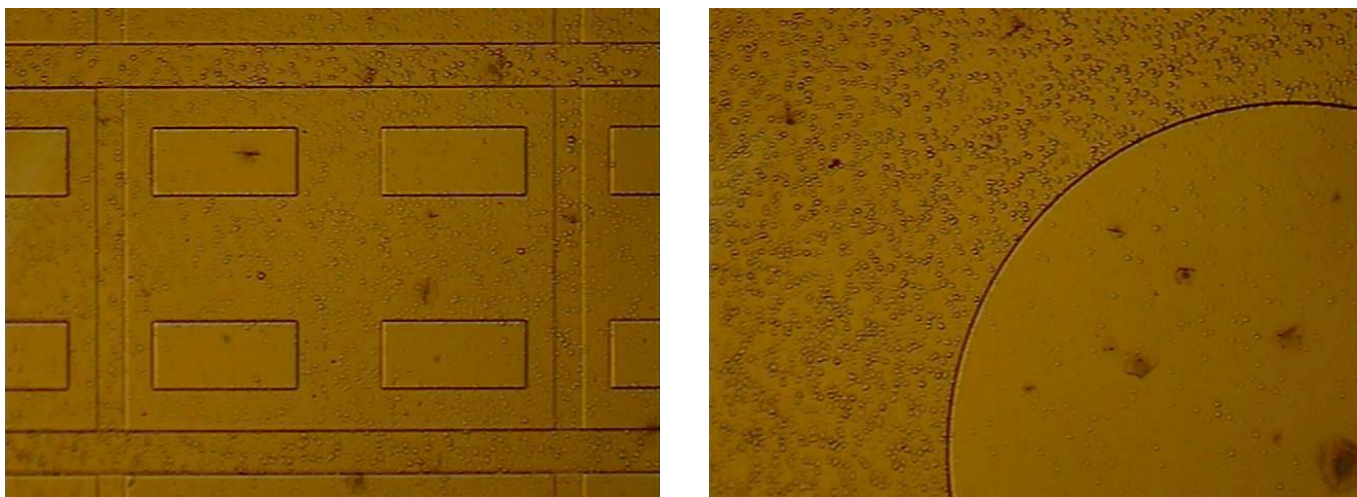


Ilustración 60: Excavado del SWA en el DRIE (slots y parte de un círculo de ensamblaje)

En la imagen superior puede observarse la rugosidad de las zonas que contenían dióxido de silicio. El ataque de partículas SF₆ desgasta la superficie átomo a átomo, haciendo que la superficie obtenga esta rugosidad tan característica.

También podemos ver que las zonas de las marcas de alineamiento han sido deterioradas:

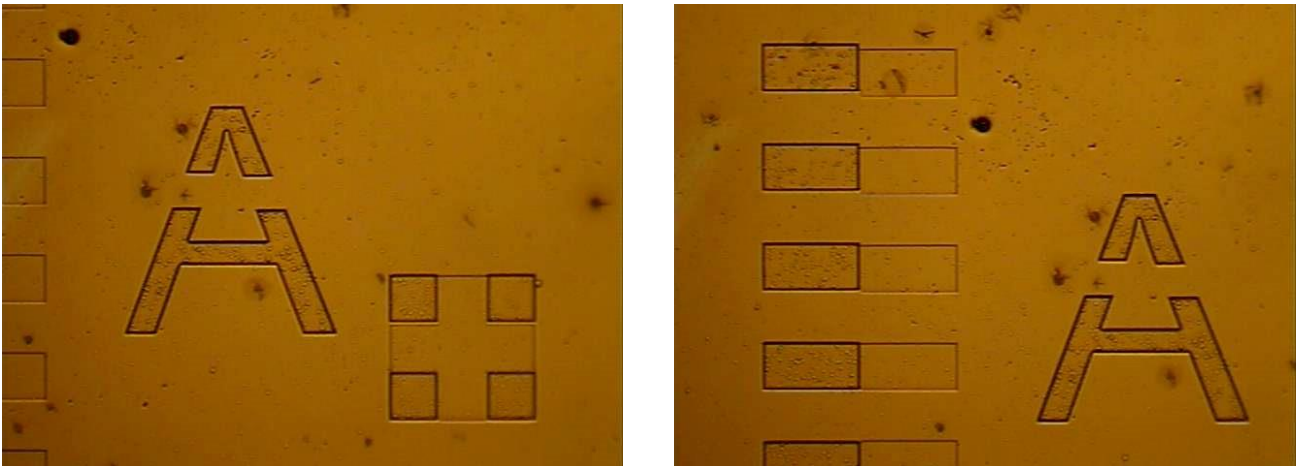


Ilustración 61: Excavado en SWA en el DRIE (detalles de las marcas de alineamiento)

Llegados hasta aquí, se decidió que lo mejor era empezar de cero con otras pruebas distintas, ya que no teníamos información sobre la cantidad de dióxido de silicio que quedaba en la superficie o sobre cuánto habíamos excavado.

b. Pruebas de linealidad del proceso de excavado

Con el objetivo de poder medir la linealidad del proceso de excavado, decidimos aprovechar una de las obleas que se había roto para seccionarla en 9 muestras, correspondientes a las 9 antenas que caben en una oblea, y realizar distintas pruebas en ellas. La información relativa a la linealidad del DRIE sería algo muy útil para afrontar el excavado final de la pieza definitiva, así que realizamos pruebas aumentando en cada iteración el número de pasadas en la receta del excavado. La oblea en cuestión tenía grosores de dióxido de silicio de 1,5 micras, 800nm y 1,2 micras (correspondientes a las capas 1, 2 y 3). Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 7: Estudio de la linealidad del proceso del excavado en el DRIE

Número de muestra	Número de pasadas DRIE	Excavado
1	25 pasadas	40 micras
2	50 pasadas	75 micras
3	75 pasadas	110 micras
4	100 pasadas	150 micras
5	125 pasadas	198 micras
6	150 pasadas	Atravesado (más de 200 micras)
7	160 pasadas	Atravesado (más de 200 micras)

Los resultados nos proporcionaron una idea sobre cómo se comporta el proceso, y para observar los resultados con más detalle observamos tres de las muestras en el microscopio. La información obtenida puede verse en las siguientes imágenes:

Muestra 4 (100 pasadas)

El excavado realizado fue de unas 150 micras. Como puede verse en la imagen inferior, los slots ya se han empezado a excavar pero las costillas todavía no han aparecido. Hay una imagen latente de ellas, puesto que su grosor es mayor que el resto de zonas (porque tienen más dióxido de silicio) pero todavía no se han excavado.



Ilustración 62: Excavado de los slots con 100 pasadas

Como podemos apreciar en la imagen siguiente, los orificios tampoco se han excavado (aunque podemos ver su notable deterioro).

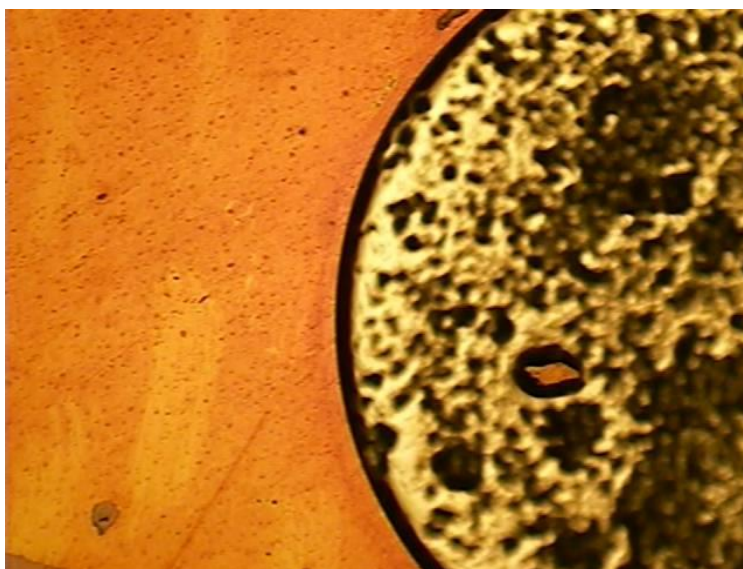


Ilustración 63: Excavado de los orificios con 100 pasadas

Muestra 5 (125 pasadas)

Ahora estudiaremos los efectos del excavado sobre la siguiente muestra, correspondiente a 125 pasadas en la receta.

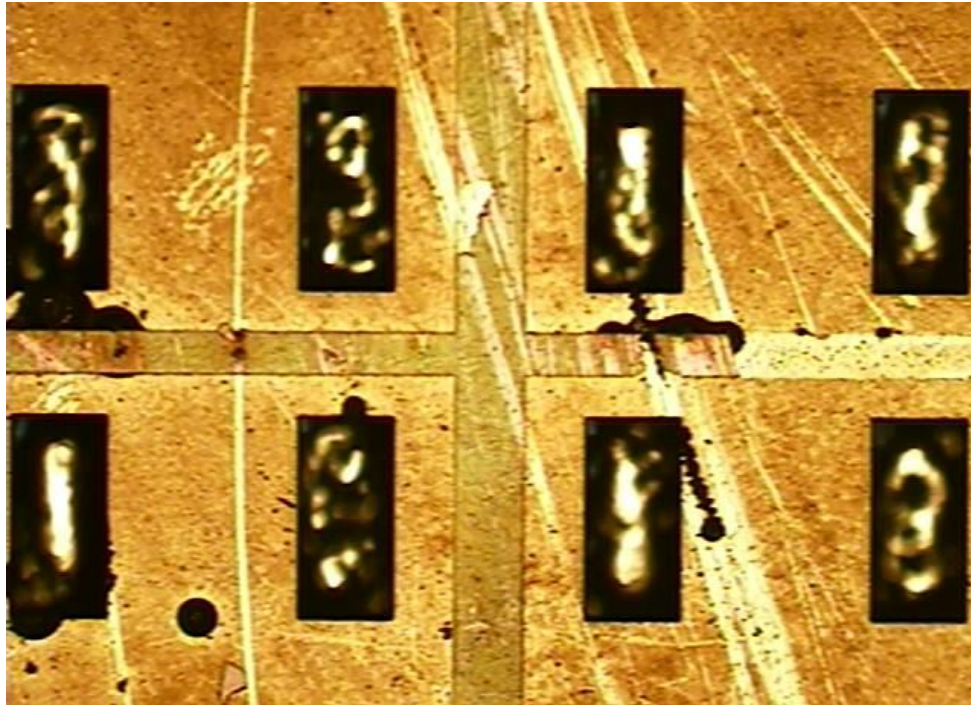


Ilustración 64: Excavado de los slots con 125 pasadas

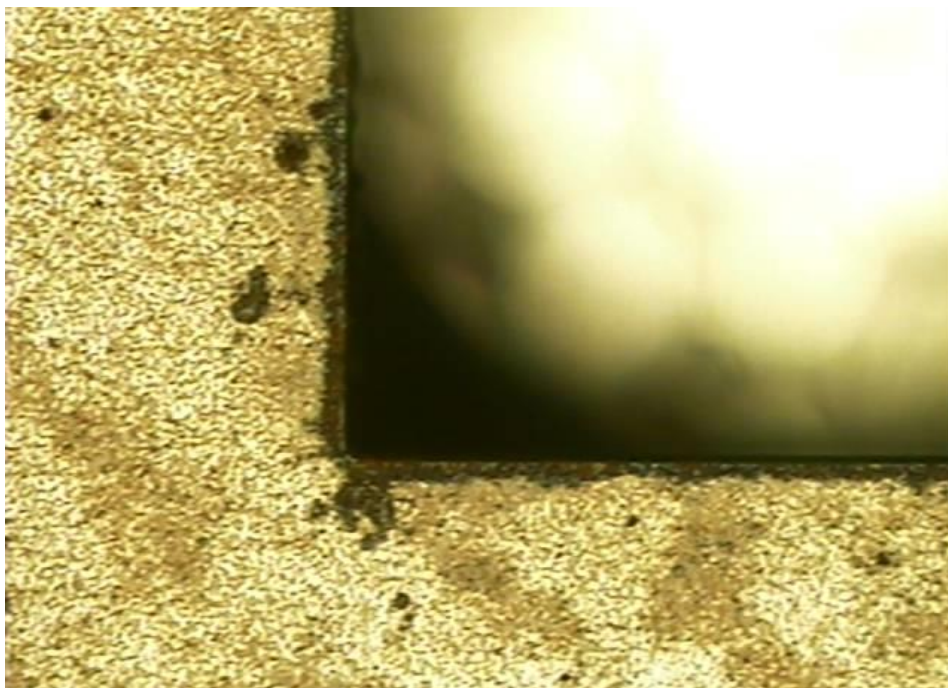


Ilustración 65: Detalle de una esquina de un slot con 125 pasadas

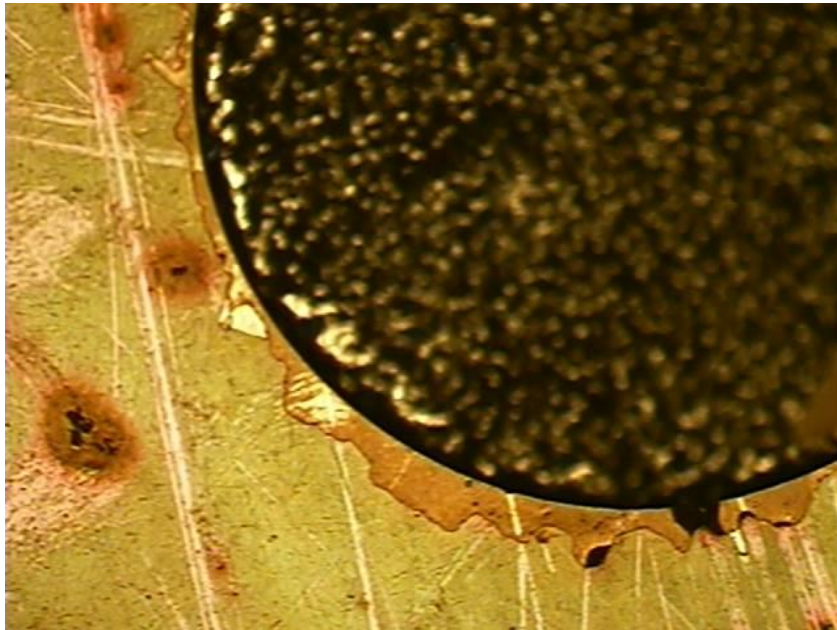


Ilustración 64: Excavado de un orificio con 125 pasadas

Podemos apreciar que ni los slots ni los orificios se han atravesado todavía, que es nuestro objetivo, pero las costillas empiezan a apreciarse mejor y los materiales de estas zonas están muy deteriorados debido al ataque del DRIE.

Muestra 6 (150 pasadas)

Por último, veremos cuál ha sido el resultado en una muestra aplicando un proceso con 150 pasadas esta vez, ya que en este caso sí conseguimos atravesar los slots y orificios.

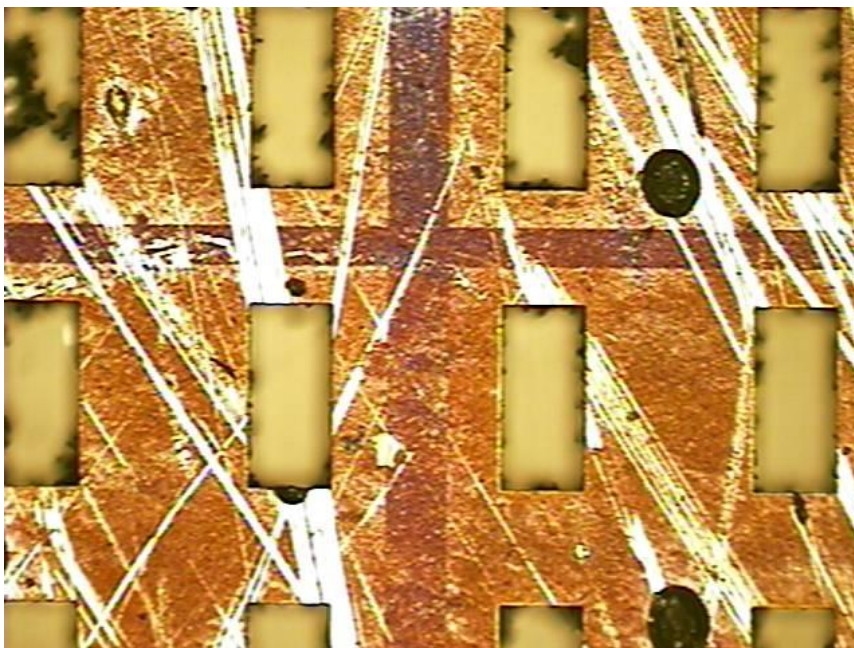


Ilustración 65: Excavado de los slots con 150 pasadas

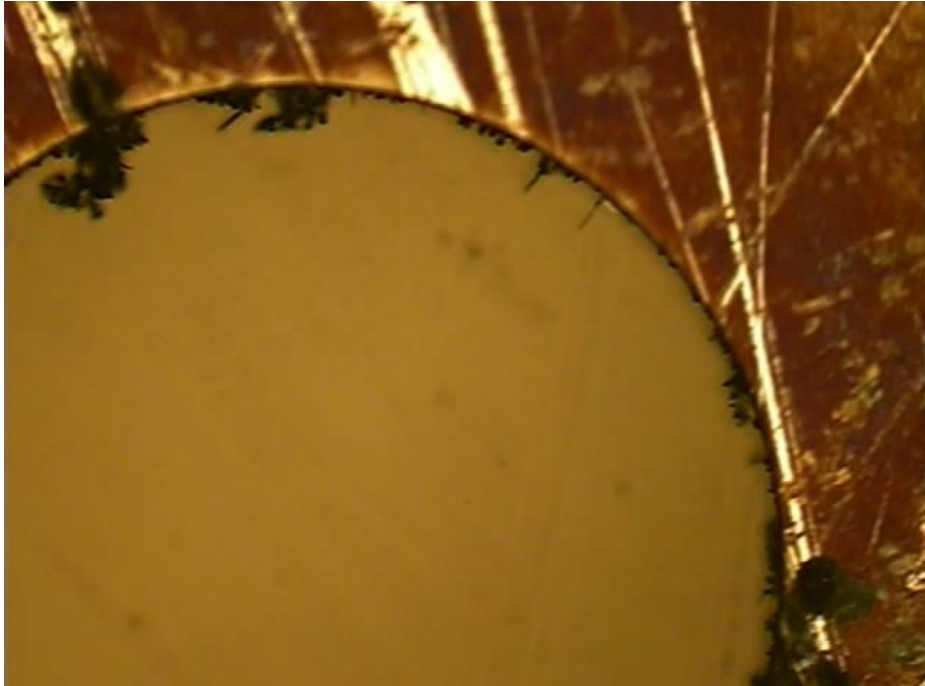


Ilustración 68: Excavado de un orificio con 150 pasadas

En este caso podemos ver que tanto los slots como los orificios se han atravesado completamente y por tanto el material de las superficies que han sobrevivido está muy dañado. Además, las costillas bajas ya han comenzado a excavarse y podemos distinguirlas claramente. Por último, cabe destacar la anisotropía del proceso de excavado, que es totalmente vertical y ha hecho que los bordes se excaven perfectamente. Esto puede apreciarse a continuación con más detalle en un zoom de una esquina de un slot:

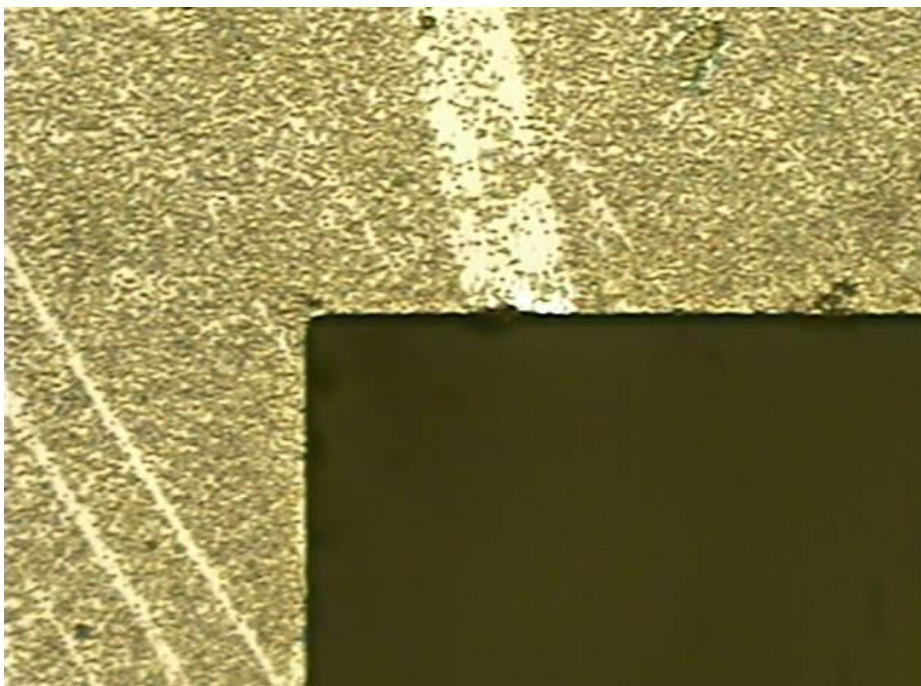


Ilustración 69: Detalle de una esquina de un slot

Muestra 7 (160 pasadas)

Aunque en las imágenes anteriores se puede observar que los slots han sido atravesados, todavía quedan restos de material que no se han limpiado, que pueden impedir el buen funcionamiento de la antena. Por ello, se decidió realizar una última prueba con 10 pasadas más para ver si los restos de silicio se eliminaban sin hacer que los bordes de las estructuras se destrozaran por aumentar el excavado. Los resultados fueron los siguientes:

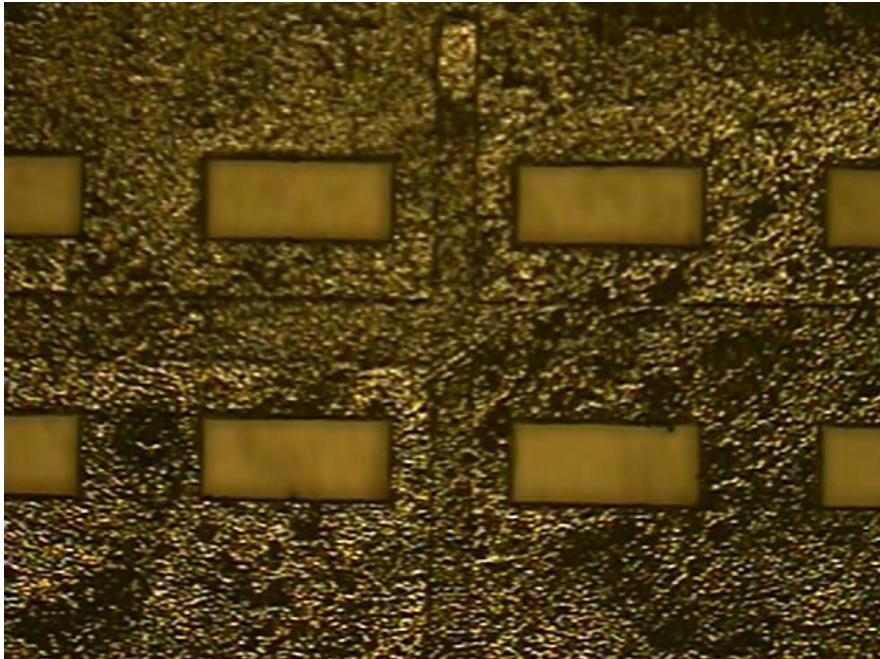


Ilustración 66: Slots y costillas bajas con 160 pasadas de excavado

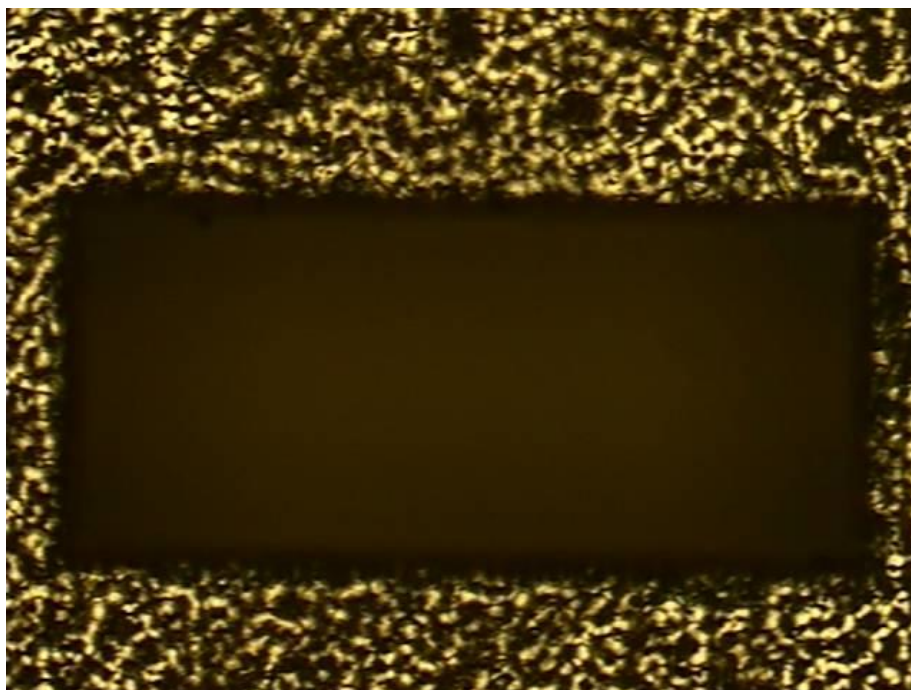


Ilustración 67: Detalle de un slot con 160 pasadas de excavado

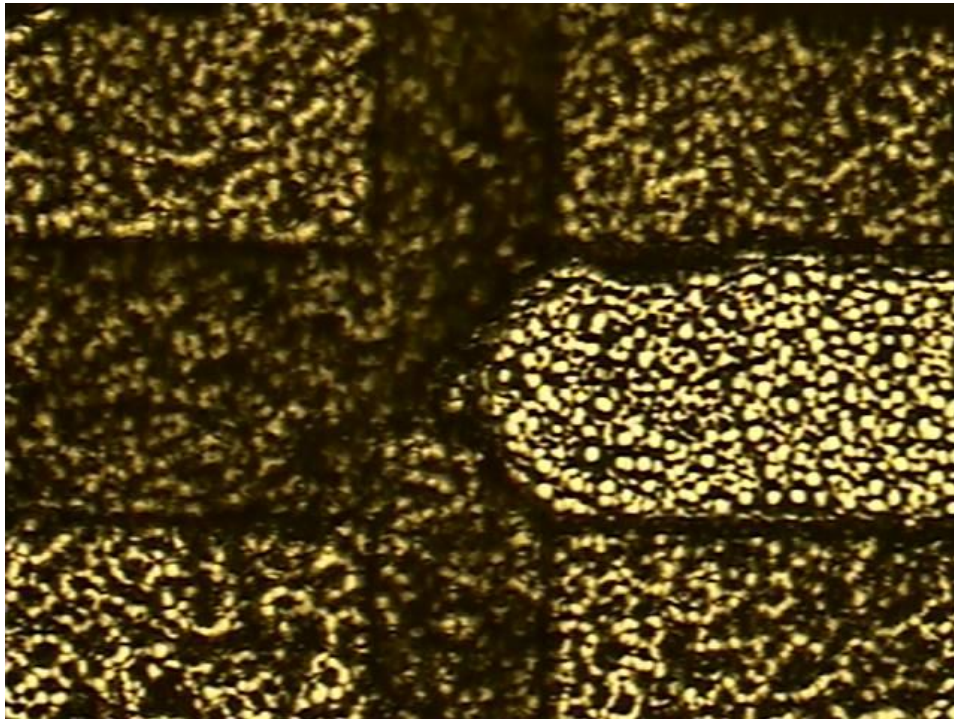


Ilustración 68: Detalle de las costillas bajas con 160 pasadas

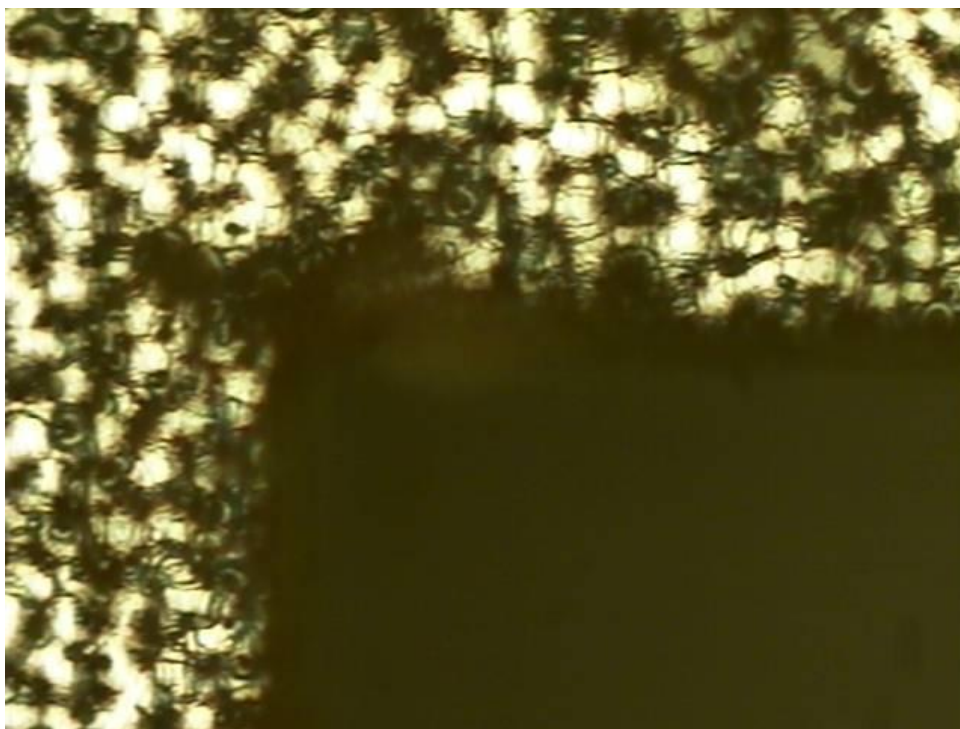


Ilustración 69: Detalle de una esquina de un slot

Estudiando las imágenes anteriores podemos concluir que efectivamente se han eliminado los restos de material residual pero que esto no ha afectado a la forma o el contorno de las estructuras excavadas.

Capítulo 7: Problemas surgidos durante la fabricación

A lo largo del proyecto, han surgido diversos problemas debido a que la fabricación es una parte compleja, sujeta a muchas variables que pueden alterar el resultado. Además, el factor humano conlleva incertidumbre, ya que es imposible llevar a cabo el proceso siempre con la misma exactitud y perfección. En este capítulo recogeremos un resumen de algunos problemas surgidos durante la fabricación, que ya se han ido nombrando anteriormente.

7.1. Problemas relativos al método de fabricación

a. Incorrecta refrigeración durante el proceso DRIE

El problema más grave surgido durante la fabricación de la primera versión del SWA fue la incorrecta refrigeración de la oblea. Al introducir la muestra en el DRIE ésta se colocó sobre una *dummy* pero ambas no se pegaron con adhesivo, por lo que la refrigeración no actuó sobre nuestra oblea. Para solucionar esto, en los siguientes pasos ambas obleas se pegaron con cinta de doble cara especial, aunque este hecho supuso la no validez del primer intento.

b. Incertidumbre en la selectividad del DRIE

Al comienzo del proyecto, cometimos un error calculando la selectividad del proceso de excavado ya que erramos al suponerla demasiado baja, de 60:1, y en las pruebas realizadas para controlar el proceso DRIE resultaba imposible excavar las costillas. El dióxido de silicio en las costillas era tanto que no se acababa, por lo que no podía comenzar su excavado. En la versión final lo solucionamos suponiendo la selectividad de 200:1 (explicado en el capítulo anterior), pero este error nos hizo tener que invalidar muchas de las pruebas realizadas.

Además, pese a suponer la selectividad de 200:1, en la recta final del proyecto nos dimos cuenta que una simple estimación de la selectividad no era suficiente, y la complejidad del proyecto requería de un estudio detallado de la selectividad para garantizar el buen funcionamiento de la antena.

c. Partición de las obleas

A lo largo del proyecto, ha habido varias obleas que se han partido en alguna de las etapas del proceso, inhabilitándose por no poder depositar foto-resina encima. Sabiendo que las obleas en cuestión son muy frágiles (debido a su escaso grosor de 200 micras) se ha intentado indagar en los motivos adicionales que provocaban su ruptura.

La conclusión a la que hemos llegado es que el hecho de pegar y despegar nuestras obleas a una oblea *dummy* cada vez que realizábamos un proceso en el DRIE (tanto *O₂ cleaning* como excavados), hacía que las probabilidades de partirse aumentaran exponencialmente. Dado que esta solución de pegar la oblea a una *dummy* se pensó para solucionar los problemas de refrigeración, nos encontramos ante una disyuntiva.

Realizando múltiples pruebas nos dimos cuenta de que para algunos de los procesos del DRIE la correcta refrigeración era vital, pero para otros no tanto. Si realizamos un excavado de una oblea sin pegarla a una *dummy* el resultado es espantoso, sin embargo, los procesos de limpieza por plasma no sufren apenas variación. Una vez llegado a esta conclusión, a partir de ese momento únicamente se pegaban las obleas a las *dummies* con cinta adhesiva para los procesos de excavado.

d. Error en la adhesión de SiO₂ en el E-beam

Otro de los problemas que tuvimos que afrontar a lo largo de la fabricación fue el hecho de que durante la deposición de SiO₂ en el *e-beam* a veces ocurrían errores debido a que se cambiaban los valores por defecto de máxima potencia permitida. Normalmente, la tasa de deposición de material es de 2 Å/s, con una potencia máxima de un 3%. Una de las pruebas tuvo que ser invalidada porque ese valor había aumentado peligrosamente y la tasa de deposición había sido muy elevada, aumentando así también la temperatura del proceso e impidiendo la correcta adhesión del material a la oblea. Al sacar la muestra del *e-beam* todo parecía correcto, pero al introducir la oblea en el stripper el resultado fue que se borró todo el circuito completo.

Este error se repitió varias veces, inhabilitando varias de las obleas trabajadas en la última capa y suponiendo la pérdida de muchos días de trabajo debido a la imposibilidad de excavar las tres alturas si la adhesión de SiO₂ de las tres capas no había sido perfecta.

Capítulo 8: Conclusiones y futuro del proyecto

La principal conclusión es que el tiempo ha sido insuficiente para poder construir correctamente la antena pretendida en un proyecto de investigación como este. Al tratarse de una tecnología relativamente compleja, a una frecuencia muy alta, y utilizando técnicas de fabricación bastante costosas que requieren un proceso de aprendizaje largo, se necesitaría investigar mucho y hacer muchas más pruebas para conseguir fabricar las dos estructuras completas.

La utilización de máquinas muy delicadas y complejas ha supuesto un lastre a la hora de avanzar de forma rápida en el proyecto, ya que muchas veces las limitaciones venían de mano de fallos producidos en las distintas máquinas y que debían ser solucionados para poder seguir. Los procesos químicos y físicos que tienen lugar en las máquinas se escapan muchas veces de nuestra comprensión, ya que resulta muy difícil entender a la perfección el funcionamiento completo de cada proceso, lo que hacía que los problemas fueran más complejos de afrontar. A todo esto, debemos sumar el factor humano, que también ha sido fuente de varios problemas surgidos en el proyecto, ya que es imposible realizar un mismo proceso siempre del mismo modo exacto y con la misma precisión y exactitud. Todo ello ha supuesto que haya resultado imposible conseguir el excavado de las tres alturas de la antena, y que no haya habido suficiente tiempo para excavar la red de alimentación.

Pese a esto, todos los pasos seguidos en este proyecto han resultado muy útiles y enriquecedores ya que conforman un esquema de directrices para la fabricación de componentes de alta frecuencia en sala limpia. El profundo estudio realizado sobre las técnicas de fotolitografía y micromecanizado en silicio brinda una serie de pautas a seguir para la estructuración de circuitos multicapa sobre obleas de silicio.

Algunas de las conclusiones más importantes obtenidas son:

- En la estructuración de circuitos multicapa, el alineamiento es algo esencial para el buen funcionamiento de la antena. En este caso, un desalineamiento de unas dos micras sigue siendo válido. Este aspecto se ha conseguido sin problemas a lo largo del proyecto lo cual resulta muy satisfactorio.
- En ocasiones, la rugosidad de las capas subyacentes en la oblea puede hacer que la deposición de la foto-resina de capas superiores no sea correcta, debiendo hacerse la deposición en modo estático si esto ocurre.

- La limpieza mecánica de las obleas de silicio favorece el deterioro del dióxido de silicio depositado encima, mientras que la limpieza por plasma mejora la adhesión de las capas siguientes. Sin embargo, hay que asegurarse que entre capa y capa de dióxido de silicio la oblea esté completamente limpia y no quede ningún resto de foto-resina del proceso anterior.
- El proceso de excavado en silicio en el DRIE requiere de una perfecta refrigeración para funcionar correctamente. Para asegurarnos, debemos pegar la oblea a otra oblea de soporte con una cinta adhesiva resistente y buena conductora de la temperatura.
- Para el proceso de limpieza por plasma en el DRIE no es necesario pegar la oblea con cinta adhesiva a la *dummy*, ya que esto hace que aumenten las probabilidades de que la oblea se fragmente, ya que la oblea utilizada para la SWA es de tan solo 200 micras de grosor.
- El proceso de excavado en el DRIE depende directamente de la selectividad del proceso, y esta selectividad hemos comprobado que no es lineal, o sea que el desgaste de óxido de silicio en el proceso no es directamente proporcional a su grosor ya que grosores delgados se consumen antes.
- El proceso de excavado puede considerarse prácticamente anisotrópico.

De cara a futuro, me gustaría, en primer lugar, realizar un estudio exhaustivo sobre la selectividad del excavado en el DRIE, ya que ha resultado ser el factor más importante a la hora de conseguir la estructuración de las tres capas. Mi intención es realizar una serie de pruebas para poder no solo estimar el valor de selectividad sino hallarlo de un modo preciso. De este modo, podré calcular de forma exacta los grosores de dióxido de silicio necesarios realmente, lo cual asegurará casi por completo el éxito en la fabricación de la antena. Además, con toda la experiencia ganada en la fabricación de esta primera pieza, podré abordar la fabricación de la red de alimentación GGW de una forma mucho más rápida y sencilla. La idea es seguir con el proyecto para poder fabricar las dos piezas y conseguir medir sus prestaciones.

Tanto las técnicas de micromecanizado en silicio como fotolitografía resultan mucho más complejas y delicadas que las técnicas clásicas, pero sus ventajas hacen que merezca la pena investigar en formas de conseguir controlar y simplificar el proceso.

Referencias

- [1] BALANIS, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [2] AZNAR, Ángel Cardama, et al. *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.
- [3] RAJO-IGLESIAS, Eva; KILDAL, Per-Simon. Groove gap waveguide: A rectangular waveguide between contactless metal plates enabled by parallel-plate cut-off. En *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*. IEEE, 2010. p. 1-4.
- [4] FERRANDO-ROCHER, Miguel, et al. Single-layer circularly-polarized Ka band antenna using gap waveguide technology. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no 8, p. 3837-3845.
- [5] ZHOU, Hongyuan; XU, Feng. Artificial magnetic conductor and its application. En *2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation*. IEEE, 2013. p. 1110-1113.
- [6] PUCCI, Elena. *Gap Waveguide Technology for Millimeter Wave Applications and Integration with Antennas*. 2013. Tesis Doctoral. Chalmers University of Technology.
- [7] BRAZÁLEZ, Astrid Algaba. *Gap Waveguide for Packaging Microstrip Filters & Investigation of Transitions from Planar Technologies to Ridge Gap Waveguide*. 2013. Tesis Doctoral. Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology.
- [8] ALJAROSHA, Alhassan. *Millimeter-wave microstrip-to-groove gap waveguide transition for use in gap-waveguide-integrated grid amplifiers and antenna arrays*. 2016. Tesis Doctoral. Master's thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [9] MACK, Chris A. *Field guide to optical lithography*. Bellingham, WA: SPIE Press, 2006.
- [10] SANTOS, Iñaki CORNAGO. *Desarrollo de nuevos procesos de fabricación de nanoestructuras para aplicaciones ópticas avanzadas basados en litografía por interferencia láser*. 2015. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.
- [11] CABALLERO, R., TENIENTE, J., BIURRUN, C., Ferrando, M. y Herranz, J. I. *Fabrication of a Slotted-Waveguide Antenna Based on Gap Waveguide Technology at 440 GHz*. 2019. 13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019, Cracovia, Polonia

Lista de imágenes

Ilustración 1: Propagación de una onda en el interior de una guía de onda	8
Ilustración 2: Esquema de una antena	9
Ilustración 3: Sistema de coordenadas angulares.....	10
Ilustración 4: Cortes plano E y plano H	11
Ilustración 5: Tipos de polarizaciones	12
Ilustración 6: Dipolo elemental	14
Ilustración 7: Diagrama de radiación de un dipolo	14
Ilustración 8: Comportamiento dual dipolo-ranura	15
Ilustración 9: Antena de array de ranuras.....	16
Ilustración 10: GW formada por PECs y AMCs.....	17
Ilustración 11: GW con separación de placas inferior a $\lambda/4$	18
Ilustración 12: Superficies duras y blandas	18
Ilustración 13: EBGs de tipo pines (izquierda) o mushroom (derecha)	19
Ilustración 14: RGW vista de perfil.....	20
Ilustración 15: GGW vista de perfil	21
Ilustración 16: Representación de los tipos de GW	21
Ilustración 17: Obleas de silicio.....	22
Ilustración 18: Foto-resinas positivas y negativas.....	23
Ilustración 19: Proceso de spin coating.....	24
Ilustración 20: Recubrimiento de la oblea por la resina	25
Ilustración 21: Estado de la foto-resina en función de la velocidad de giro del spinner	25
Ilustración 22: Softbake.....	26
Ilustración 23: Proceso de exposición de la oblea	27
Ilustración 24: Revelado para foto-reinas positivas y negativas.....	28
Ilustración 25: Proceso de stripper	29
Ilustración 26: Proceso de grabado en seco [11]	31
Ilustración 27: Vista en perspectiva de la estructura GGW	33
Ilustración 28: Vista en planta de la GGW	34
Ilustración 29: Detalle de la estructura de GGW	34
Ilustración 30: Polarizador lineal colocado sobre estructura GGW	35
Ilustración 31: Detalle de las costillas del polarizador lineal	36
Ilustración 32: Pieza metálica para proteger la antena	37

Ilustración 33: Valor de directividad obtenido en simulación	38
Ilustración 34: Valores de XP obtenidos en simulación	39
Ilustración 35: Valores de S11 obtenidos en simulación	39
Ilustración 36: Diagrama de radiación en campo lejano a 400 GHz	40
Ilustración 37: Diagrama de radiación en campo lejano a 410 GHz	40
Ilustración 38: Diagrama de radiación en campo lejano a 420 GHz	41
Ilustración 39: Diagrama de radiación en campo lejano a 430 GHz	41
Ilustración 40: Diagrama de radiación en campo lejano a 440 GHz	42
Ilustración 41: Corte transversal exportado	43
Ilustración 42: Máscara completa en AutoCAD	44
Ilustración 43: Detalle de la máscara y las marcas de alineamiento	45
Ilustración 44: Marcas de alineamiento para máscaras impares.....	45
Ilustración 45: Marcas de alineamiento para máscaras pares.....	46
Ilustración 46: Superposición de máscaras.....	46
Ilustración 47: Máscara final exportada de LinkCAD	47
Ilustración 48: Gráfico del proceso requerido para la estructura de la antena SWA	48
Ilustración 49: Dosis de exposición dada por el fabricante.....	50
Ilustración 50: Detalles de los slots de la antena SWA en fabricación.....	53
Ilustración 51: Detalles de las marcas de alineamiento en fabricación	54
Ilustración 52: Detalle de la estructura central de la segunda capa (slots + costillas bajas)	55
Ilustración 53: Detalle de marca de alineamiento de la segunda capa de la SWA	55
Ilustración 54: Otro detalle de las marcas de alineamiento de la segunda capa de la SWA	56
Ilustración 55: Marcas de alineamiento en la tercera capa de la SWA.....	57
Ilustración 56: Alineación de la tercera capa de la SWA.....	57
Ilustración 57: Oblea recubierta por las tres capas de SiO ₂	58
Ilustración 58: Variación del color en función de la zona (de drch. a izq. y de arriba a abajo) ..	58
Ilustración 59: Alturas tras el deterioro del SiO ₂	60
Ilustración 60: Excavado del SWA en el DRIE (slots y parte de un círculo de ensamblaje).....	60
Ilustración 61: Excavado en SWA en el DRIE (detalles de las marcas de alineamiento).....	61
Ilustración 62: Excavado de los slots con 100 pasadas	62
Ilustración 63: Excavado de los orificios con 100 pasadas.....	62
Ilustración 64: Detalle de una esquina de un slot con 125 pasadas	63
Ilustración 65: Excavado de los slots con 125 pasadas	63
Ilustración 66: Excavado de un orificio con 125 pasadas.....	64
Ilustración 67: Excavado de los slots con 150 pasadas	64

Ilustración 68: Detalle de una esquina de un slot.....	65
Ilustración 69: Excavado de un orificio con 150 pasadas.....	65
Ilustración 70: Slots y costillas bajas con 160 pasadas de excavado	66
Ilustración 71: Detalle de un slot con 160 pasadas de excavado.....	66
Ilustración 72: Detalle de las costillas bajas con 160 pasadas	67
Ilustración 73: Detalle de una esquina de un slot.....	67
Ilustración 74: Mask-aligner	76
Ilustración 75: E-beam	76
Ilustración 76: Spin coater.....	77
Ilustración 77: DRIE	77
Ilustración 78: Hot plate.....	77

Anexo 1: Máquinas utilizadas en la sala limpia ISO7

Mask-aligner (MJB4 Suss MicroTec)

Una *mask aligner* es un instrumento clave en la fotolitografía, que es un proceso de microfabricación que se utiliza para eliminar selectivamente partes de una película delgada para crear un patrón o un diseño sobre un sustrato. Para generar este patrón, primero se recubre el sustrato con un producto químico sensible a la luz. Luego se introduce el sustrato en el alineador y se coloca una máscara con el patrón deseado sobre el sustrato. Una luz ultravioleta de alta intensidad brilla sobre la máscara. La luz solo se transmite a través de las aberturas en el patrón, lo que permite que el patrón evapore áreas correspondientes de la capa foto resistente del sustrato. Cuando los procesos litográficos requieren la alineación de estructuras en un solo lado de la oblea del dispositivo, la alineación del lado superior se usa para alinear las referencias de la máscara con las de la oblea. Dependiendo de las propiedades del sustrato, esto se puede lograr utilizando datos de posición almacenados para la oblea o mediante la alineación de imágenes en vivo.



Ilustración 70: Mask-aligner

E-beam (Nexdep Angstrom Engineering)

La evaporación por haz de electrones (*e-beam*) es una tecnología de deposición para producir recubrimientos densos de alta pureza. Durante un proceso de evaporación de haz de electrones, la corriente pasa primero a través de un filamento de tungsteno que conduce al calentamiento de joule y la emisión de electrones. Se aplica alto voltaje para acelerar estos electrones liberados hacia el crisol que contiene el material a depositar. Un fuerte campo magnético enfoca los electrones en un haz unificado; al llegar, la energía de este haz de electrones se transfiere al material de deposición, lo que hace que se evapore (o sublime) y se deposite sobre el sustrato.



Ilustración 71: E-beam

Spinner (Spin-coater Labspin Suss MicroTec)

El recubrimiento por rotación es el proceso de recubrir uniformemente un sustrato con una solución. La solución, por ejemplo, una resistencia fotosensible, se dispensa en el centro de la oblea. La aceleración posterior, así como la velocidad de rotación y el tiempo asignado a los pasos individuales aseguran que el espesor de una capa homogénea permanezca después de que se desprenda el exceso de resistencia. Junto con los parámetros del proceso, las propiedades físicas de la solución o la foto-protección determinan el grosor de la película aplicada.



Ilustración 72: Spin coater

DRIE (PlasmaPro 80 ICP Oxford Instruments)

El DRIE PlasmaPro es una máquina que proporciona soluciones de grabado ICP. Presenta una alta uniformidad de temperatura para la oblea y permite grabado de SiO_2 y de cuarzo. El ICP, abreviatura de Plasma de acoplamiento inductivo, es un método de espectrometría de emisión óptica. El grabado ICP es una técnica ampliamente utilizada para proporcionar altas tasas de grabado, alta selectividad y bajo procesamiento de daños. Para generar plasma, primero, se suministra gas argón a la bobina y se aplica corriente eléctrica de alta frecuencia a la bobina de trabajo en la punta del tubo de la antorcha.



Ilustración 73: DRIE

Hot plate (Apogee Bake Plate Cost Effective Equipment)

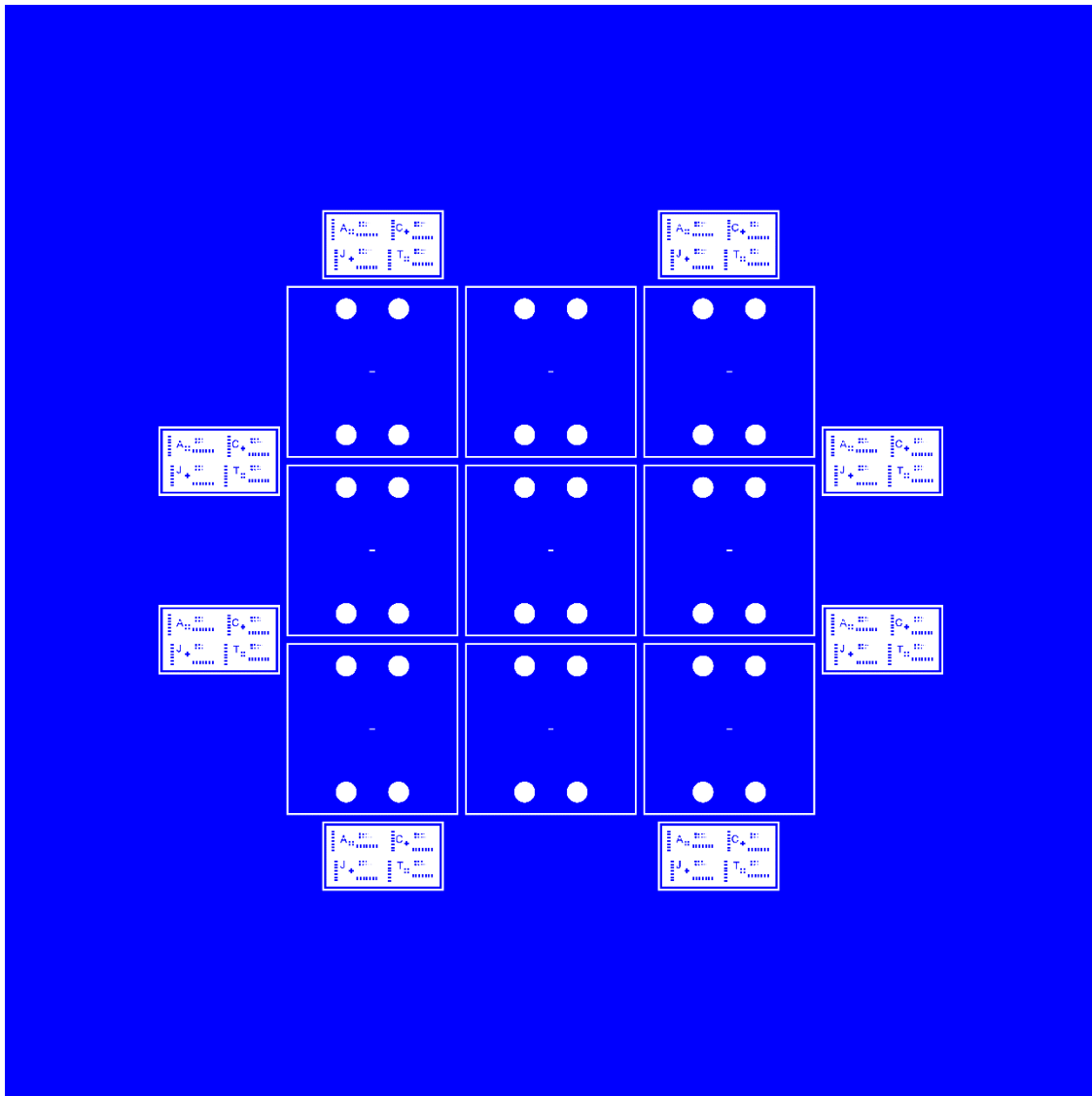
Una hot plate es una máquina utilizada para realizar los *bakes* de las obleas. Tanto el softbake, como el PEB como el hardbake, ya sea para eliminar solventes residuales o para culminar el proceso de reticulación iniciado durante la exposición. Este tipo de hot plate en concreto tiene grandes ventajas como la posibilidad de grabar recetas (variando la temperatura y el tiempo del proceso), además de asegurar un contacto con la placa casi perfecto.



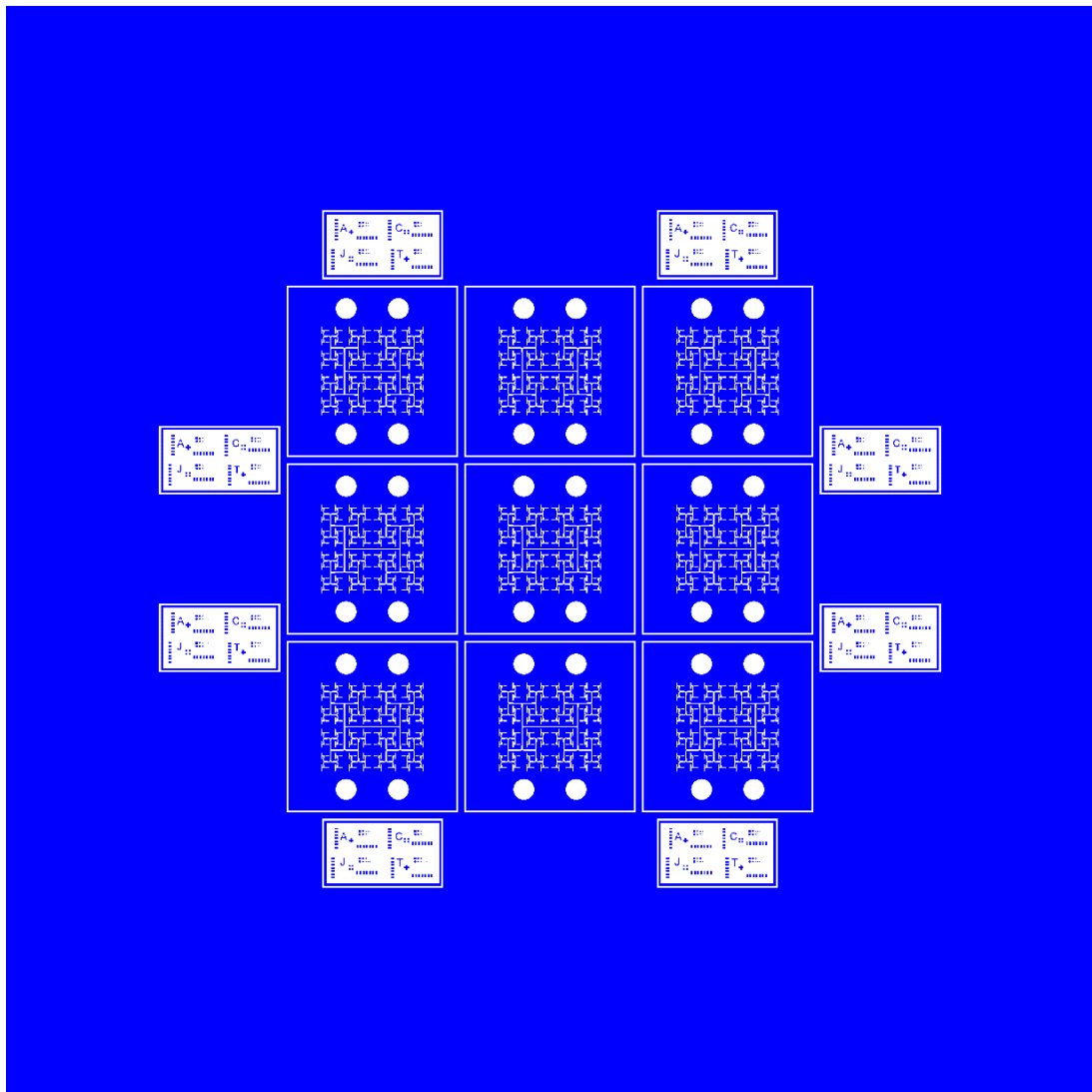
Ilustración 74: Hot plate

Anexo 2: Máscaras completas

UPNA- SWA 16x16 GGW (1)
Marta Melero Frago

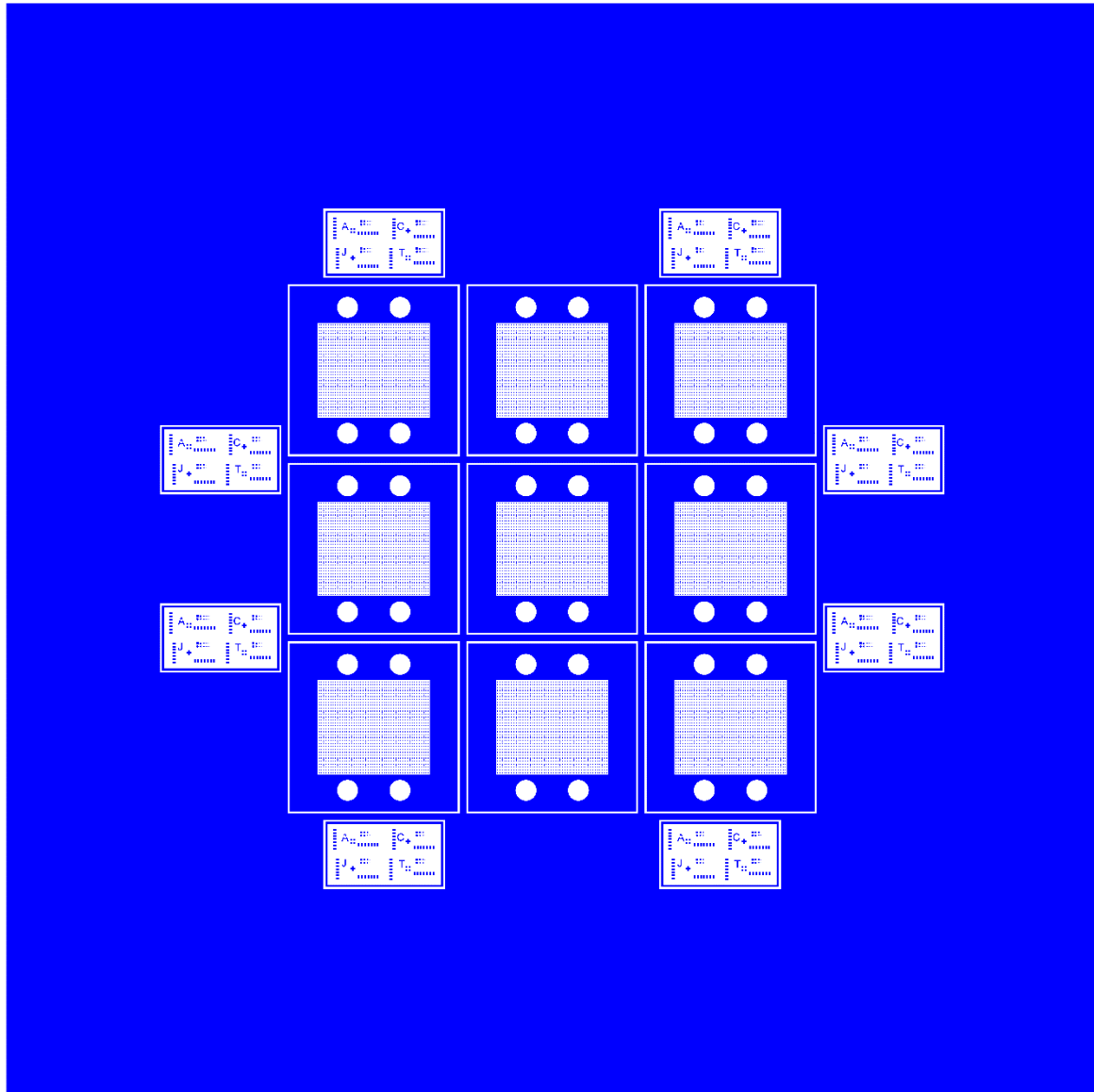


UPNA- SWA 16x16 GGW (2)
Marta Melero Frago



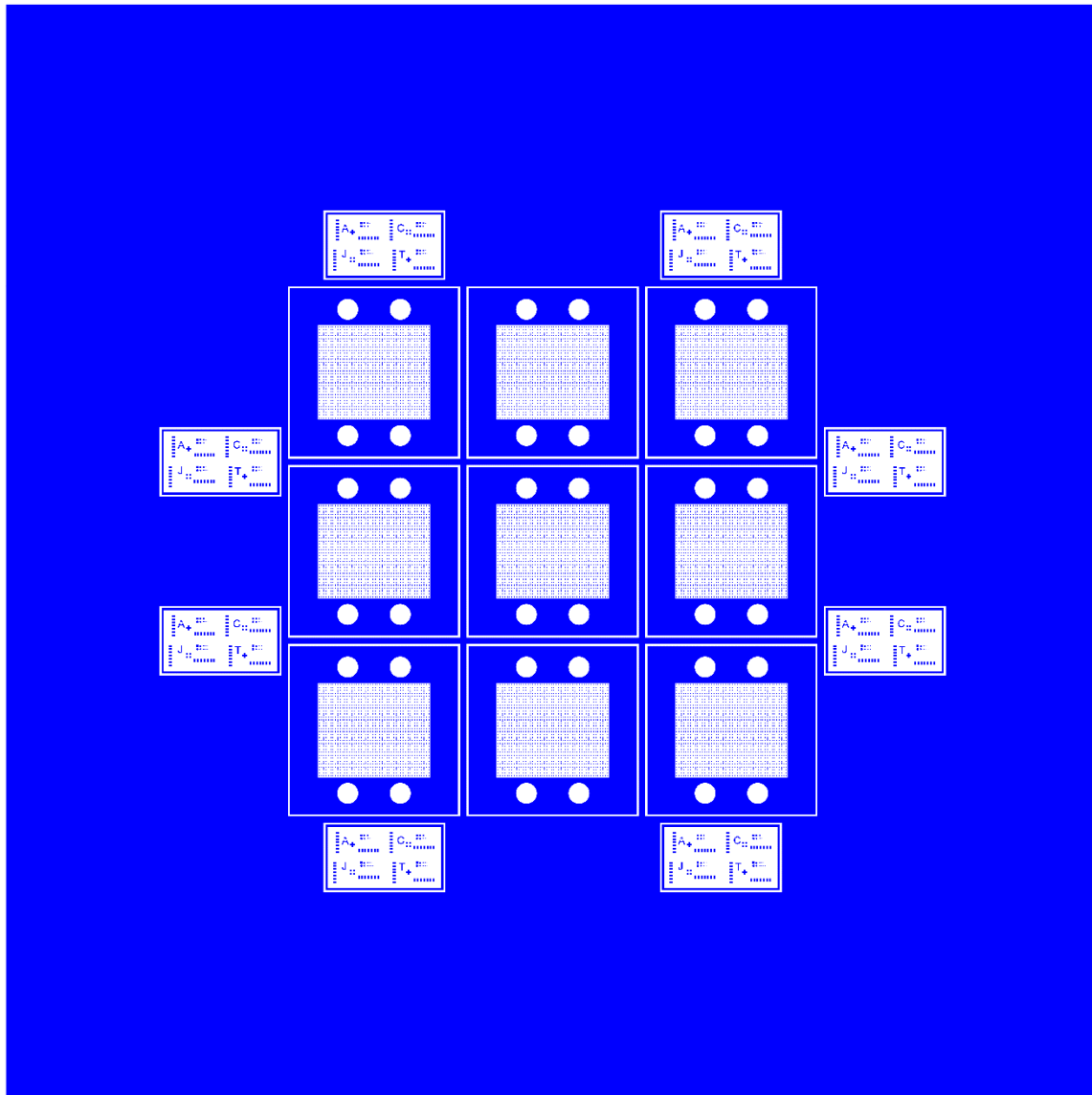
UPNA- SWA 16x16 GGW (3)

Marta Melero Frago



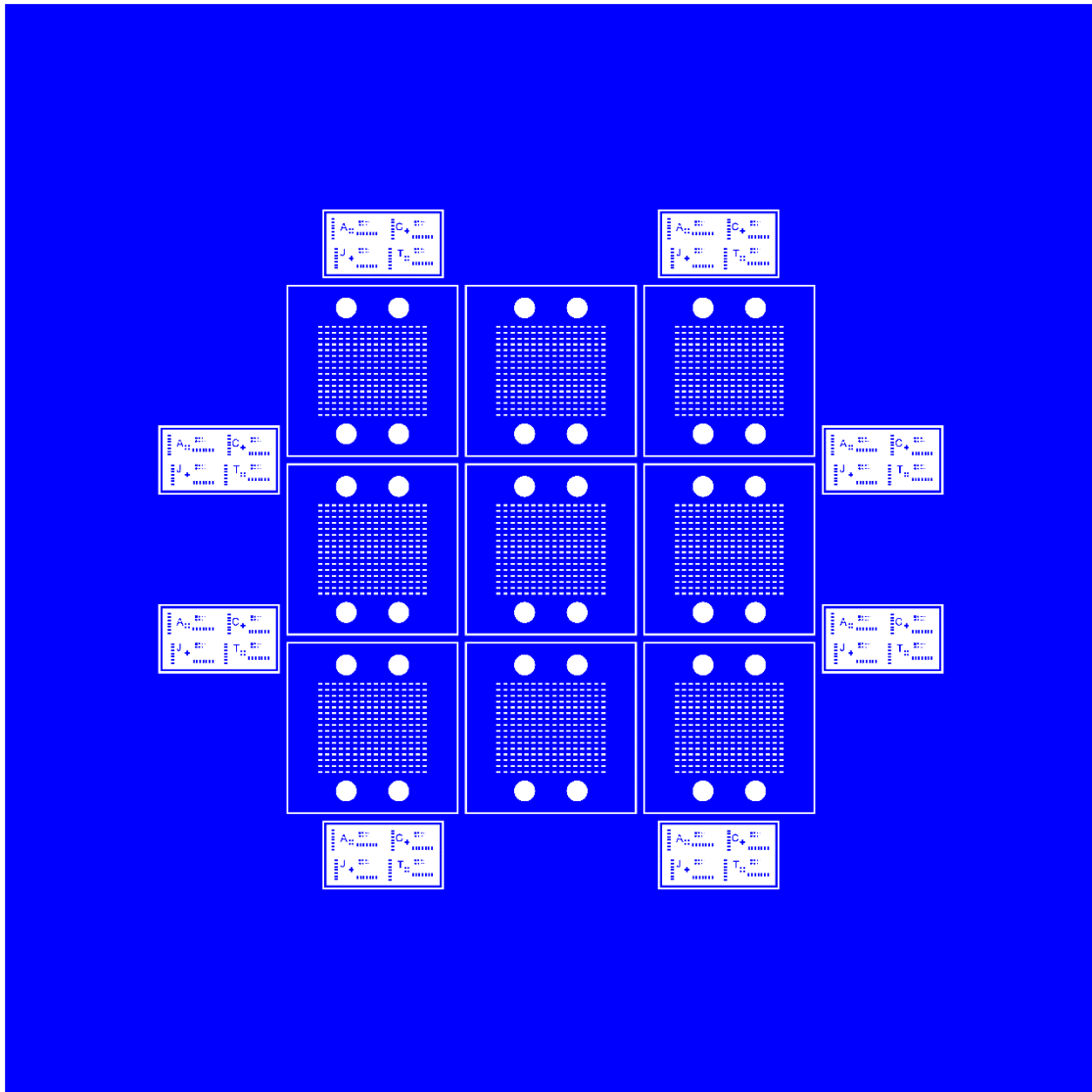
UPNA- SWA 16x16 GGW (4)

Marta Melero Frago

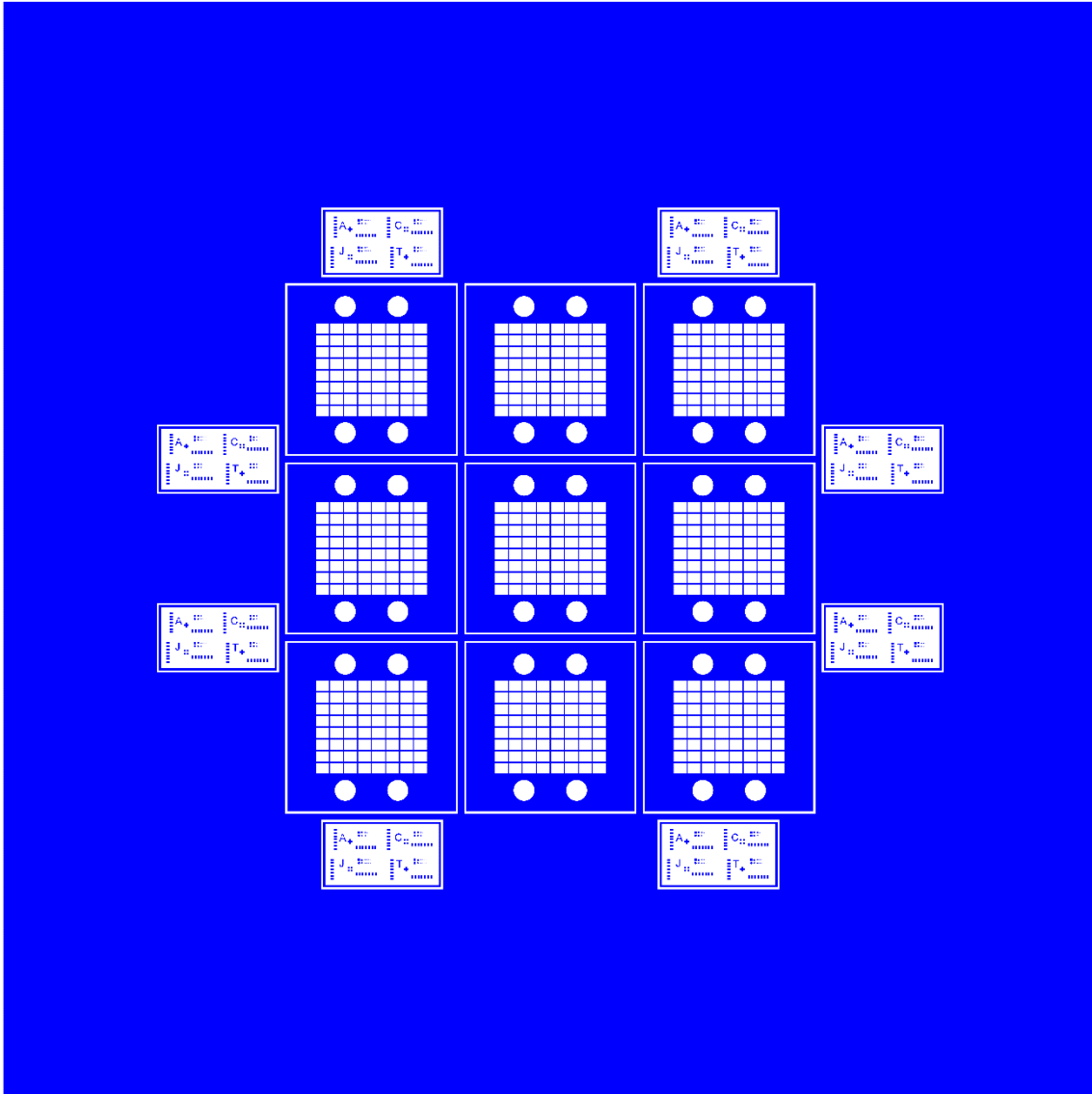


UPNA- SWA 16x16 Linear (1)

Marta Melero Frago



UPNA- SWA 16x16 Lineal (2)
Marta Melero Frago



UPNA- SWA 16x16 Lineal (3)
Marta Melero Frago

