



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Diseño de metasuperficies absorbentes en el infrarrojo  
cercano y técnicas de reconfiguración

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Carles Rausell, Marta

Tutor/a: Díaz Rubio, Ana

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## Resumen

Las metasuperficies constituyen un innovador campo de investigación en el que se está avanzando en desarrollar materiales artificiales con propiedades únicas. En particular, se están realizando esfuerzos por desarrollar metasuperficies que presenten reflexión nula, también conocidas como absorbentes perfectos. En este Trabajo Final de Grado se presenta el diseño de metasuperficies absorbentes en el infrarrojo a partir del modelo de homogeneización de impedancia de superficie, basadas tanto en oro como en aluminio, a partir de un proceso de diseño incremental. Más tarde, se estudian los procesos utilizados en la posterior fabricación de uno de los diseños de absorbente perfecto basado en aluminio, buscando una eficiencia de costos. Por último, se estudian diversas técnicas de reconfiguración, profundizando en el uso de las propiedades del ITO como recurso para el diseño de una metasuperficie reconfigurable.

**Palabras clave:** metamateriales; metasuperficies; reconfiguración; absorción total.

## Resum

Les metasuperfícies constitueixen un innovador camp d'investigació en el qual s'està avançant a desenvolupar materials artificials amb propietats úniques. En particular, s'estan fent esforços per desenvolupar metasuperfícies que presenten reflexió nul·la, també conegudes com a absorbents perfectes. En aquest Treball Final de Grau es presenta el disseny de metasuperfícies absorbents en l'infraroig a partir del model d'homogeneïtzació d'impedància de superfície, basades tant en or com en alumini, a partir d'un procés de disseny incremental. Més tard, s'estudien els processos utilitzats en la posterior fabricació d'un dels dissenys d'absorbent perfecte basat en alumini, buscant una eficiència de costos. Finalment, s'estudien diverses tècniques de reconfiguració, aprofundint en l'ús de les propietats del ITO com a recurs per al disseny d'una metasuperfície reconfigurable.

**Paraules clau:** metamaterials; metasuperfícies; reconfiguració; absorció total.

## Abstract

Metasurfaces constitute an innovative field of research in which progress is being made in developing artificial materials with unique properties. In particular, efforts are being made to develop metasurfaces with zero reflection, also known as perfect absorbers. In this thesis, the design of infrared absorbing metasurfaces based on the surface impedance homogenization model is presented, based on both gold and aluminum, using an incremental design process. Later, the processes used in the subsequent fabrication of one of the perfect absorber designs based on aluminum, looking for cost efficiency, are studied. Finally, various reconfiguration techniques are studied, delving into the use of ITO properties as a resource for the design of a reconfigurable metasurface.

**Keywords:** metamaterials; metasurfaces; reconfiguration; full absorption.

# Diseño de metasuperficies absorbentes en el infrarrojo cercano y técnicas de reconfiguración

Marta Carles Rausell

## Índice

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Resum</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Metasuperficies absorbentes y reconfigurables . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible . . . . .	4
<b>2. Diseño de metasuperficies absorbentes</b>	<b>6</b>
2.1. Marco teórico . . . . .	6
2.1.1. Estructura básica y equivalente circuital . . . . .	6
2.1.2. Absorbentes perfectos . . . . .	8

2.1.3. Impedancias controlables mediante diseños periódicos . . . . .	8
2.2. Proceso de diseño . . . . .	12
2.2.1. Modelo con $Z_g$ y Conductor Eléctrico Perfecto . . . . .	14
2.2.2. Modelo con $Z_s$ y Conductor Eléctrico Perfecto . . . . .	16
2.2.3. Modelo con $Z_g$ y Oro . . . . .	24
2.2.4. Modelo con Oro . . . . .	28
2.2.5. Modelo con Aluminio . . . . .	30
2.3. Reconfiguración de metasuperficies absorbentes . . . . .	34
<b>3. Fabricación</b>	<b>47</b>
<b>4. Conclusiones</b>	<b>53</b>
<b>5. Trabajo Futuro</b>	<b>54</b>

## Índice de figuras

1.	Espectro electromagnético. Fuente: Edmund Optics. . . . .	1
2.	Esquemático de una metasuperficie reflectora o absorbente. . . . .	6
3.	Equivalente circuital de la metasuperficie propuesta. . . . .	7
4.	Celda unidad de la red capacitiva. . . . .	9
5.	Celda unidad de la red capacitiva con tiras internas para control independiente de la resistividad. . . . .	10
6.	Celda unidad de la red inductiva. . . . .	11
7.	Celda unidad de la red inductiva con ajuste reactivo, con $N = 3$ . . . . .	12
8.	Diagrama de flujo seguido para el diseño de metasuperficies absorbentes. . .	13
9.	Esquemático de la metasuperficie absorbente con capa metálica de impedancia homogénea. . . . .	15
10.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_g$ y Conductor Eléctrico Perfecto. . .	16
11.	Esquemático de la metasuperficie absorbente a partir de un conductor con $Z_s = 1 \Omega$ . . . . .	17
12.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_s = 1 \Omega$ y Conductor Eléctrico Perfecto. .	18
13.	Esquemático de la metasuperficie absorbente a partir de un conductor con $Z_s = 10 \Omega$ . . . . .	19
14.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_s = 10 \Omega$ y Conductor Eléctrico Perfecto. .	20
15.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_s = 10 \Omega$ y Conductor Eléctrico Perfecto, tras el reescalado. . . . .	21
16.	Esquemático de la metasuperficie absorbente a partir de un conductor con $Z_s = 1 \Omega$ y $N = 3$ . . . . .	22

17.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_s = 1 \Omega$ , $N = 3$ y Conductor Eléctrico Perfecto. . . . .	23
18.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_s = 1 \Omega$ , $N = 3$ y Conductor Eléctrico Perfecto, tras el reescalado. . . . .	23
19.	Equivalente circuital de la metasuperficie propuesta con $Z_L$ . . . . .	25
20.	$Z_s^{Au}$ y $Z_g$ en función del grosor del dieléctrico $h$ . . . . .	26
21.	Esquemático de la metasuperficie absorbente con impedancia homogénea y oro en la base. . . . .	27
22.	Absorción obtenida con el diseño con $Z_g$ y oro. . . . .	28
23.	Esquemático de la metasuperficie absorbente con oro. . . . .	29
24.	Absorción obtenida con el diseño con oro. . . . .	30
25.	$Z_s^{Al}$ y $Z_g$ en función del grosor del dieléctrico $h$ . . . . .	31
26.	Esquemático de la metasuperficie absorbente con aluminio. . . . .	32
27.	Absorción obtenida con el diseño con aluminio. . . . .	33
28.	Absorción de las muestras seleccionadas para fabricación. . . . .	34
29.	Permitividad calculada del ITO según el modelo de Drude, para concentraciones de portadores $N$ de $10^{19}$ a $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . . . . .	37
30.	Diagrama de flujo seguido para el diseño de la metasuperficie reconfigurable con ITO. . . . .	38
31.	Esquemático de la metasuperficie absorbente inductiva con ITO. . . . .	39
32.	Índice de refracción del ITO según el modelo de Drude, para concentraciones de portadores $N$ de $10^{19}$ a $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . . . . .	40
33.	Esquemático de la metasuperficie absorbente capacitiva con ITO. . . . .	41



34.	Absorción obtenida con el diseño con ITO. . . . .	42
35.	Absorción obtenida con el diseño con ITO con $w_{in} = 308,33$ nm, $thick = 50$ nm y $h = 472,22$ nm. . . . .	42
36.	Esquemático de la metasuperficie absorbente con ITO. . . . .	43
37.	Absorción obtenida con el diseño con ITO tras el reescalado, sin incorporar la dispersión. . . . .	44
38.	Absorción obtenida con el diseño con ITO tras incorporar la dispersión. . .	45
39.	Absorción obtenida con el diseño con ITO en función de la concentración de portadores $N$ . . . . .	46
40.	Pasos del proceso de fabricación de las muestras. . . . .	47
41.	Coater EVG 101 utilizado para el depósito de la resina. . . . .	48
42.	Raith 150 utilizado para la exposición de la resina. . . . .	49
43.	Brewer Science CEE 100CB utilizado para el revelado. . . . .	49
44.	PFEIFFER Vacuum Classic 500 utilizado para el depósito del metal. . . . .	50
45.	Fotografías de la primera muestra tras su fabricación. . . . .	52

## Índice de tablas

1.	Absorción a 120 THz en función de la concentración de portadores. . . . .	46
2.	Comparativa entre valor de diseño y especificación de fabricación para los parámetros de la primera muestra. . . . .	51
3.	Comparativa entre valor de diseño y especificación de fabricación para los parámetros de la segunda muestra. . . . .	51
4.	Comparativa entre valor de diseño y especificación de fabricación para los parámetros de la tercera muestra. . . . .	51

# 1. Introducción

## 1.1. Metasuperficies absorbentes y reconfigurables

La búsqueda del ser humano por controlar los fenómenos electromagnéticos se remonta varios siglos atrás, con una tendencia a lo largo de las décadas a trabajar con frecuencias cada vez más altas, que permiten anchos de banda y capacidades de transmisión mayores. En particular, existe un interés creciente por trabajar en el infrarrojo cercano (NIR, siglas en inglés de Near Infra-red), que comprende las longitudes de onda desde los  $0.8 \mu\text{m}$  hasta los  $3 \mu\text{m}$  (Figura 1) [1], inmediatamente después del espectro visible.

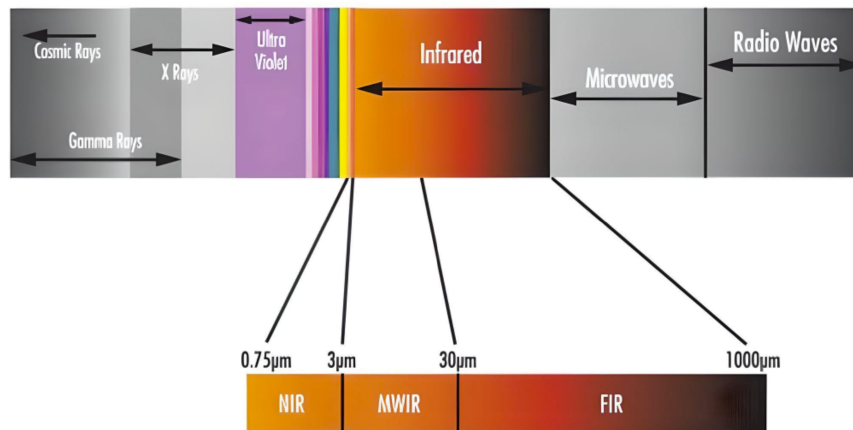


Figura 1: Espectro electromagnético. Fuente: Edmund Optics.

Sin embargo, trabajar a frecuencias ópticas puede resultar complejo. Para cada aplicación particular, resulta necesario contar con materiales que cumplan una serie de características y exhiban ciertos comportamientos. No obstante, los materiales existentes en la naturaleza son limitados, de manera que encontrar el comportamiento electromagnético adecuado para cierta aplicación puede ser un desafío. Así pues, un campo de investigación que presenta un gran dinamismo actualmente se centra en crear materiales con parámetros controlables y conseguir así efectos en las ondas que no existen en la naturaleza [2]. Es aquí

cuando nacen los **metamateriales**, unos nuevos materiales formados por meta-átomos. Dichos meta-átomos son estructuras periódicas en las que se debe cumplir que su tamaño sea mucho menor a la longitud de onda. Solo en ese caso podrá considerarse el metamaterial como homogéneo y describirse con parámetros constitutivos efectivos, como la permitividad  $\varepsilon$  y la permeabilidad  $\mu$  [3]. En definitiva, un metamaterial puede definirse como un material artificial, formado por una disposición de elementos estructurales diseñados para obtener propiedades electromagnéticas ventajosas e inusuales y que se comporta de manera efectiva como un medio homogéneo [4].

No obstante, los metamateriales pueden ser voluminosos, pesados y difíciles de fabricar, sobre todo para aplicaciones ópticas que requieren técnicas de nanofabricación avanzadas. Además, debido a las pérdidas de material, la luz propagada a través de metamateriales voluminosos puede experimentar un decaimiento significativo, puesto que para conseguir propiedades exóticas los metamateriales suelen estar compuestos por elementos altamente resonantes [4]. Esto lleva a buscar medios alternativos que puedan superar estos problemas sin perder las principales ventajas que pueden ofrecer los metamateriales. Una de esas posibilidades es el uso de **metasuperficies**, que pueden considerarse la versión 2D de los metamateriales y permiten controlar la luz de igual manera que estos últimos, modificando la amplitud, fase o polarización de las ondas, con un grosor prácticamente despreciable en comparación con la longitud de onda [5]. A diferencia de los metamateriales, las metasuperficies no pueden caracterizarse mediante la permitividad y la permeabilidad efectivas, pero pueden homogeneizarse utilizando la polarizabilidad, la susceptibilidad y la impedancia de superficie efectivas [3]. De esta forma, es posible diseñar nuevos materiales con las propiedades homogéneas que se deseen a partir de materiales ya existentes. En este caso, a lo largo de este documento se llevará a cabo el diseño de metasuperficies partiendo del modelo de homogeneización de impedancia de superficie, haciendo uso de la configuración típica de metasuperficies: metal – dieléctrico – metal.

De manera específica, estos conceptos se utilizarán para diseñar **absorbentes perfectos**, en los que toda la energía se disipa en la metasuperficie, presentando así reflexión y

transmisión nulas [4]. Existe un considerable interés y actividad de investigación en el campo del diseño de absorbentes, debido a sus múltiples aplicaciones en áreas como las células solares – donde un incremento de la eficiencia se basa en la absorción de la mayor cantidad de la luz incidente posible – o la disminución de la detección radar – evitando que la señal de detección sea reflejada por el objeto, haciéndolo así invisible [6]. Gracias a la teoría de las metasuperficies, es posible diseñar nuevos materiales que absorban toda la luz en la zona del espectro deseada.

Sin embargo, las metasuperficies convencionales presentan el problema de que tienen unas propiedades fijas, lo que limita su uso. En el mundo real, es interesante contar con **metasuperficies reconfigurables**, que pueden cambiar su respuesta en función de algún factor externo. Estas metasuperficies reconfigurables se pueden clasificar según los mecanismos que provocan dicho cambio: inducir cambios de temperatura, iluminar con luz, inducir deformaciones mecánicas o aplicar campos electromagnéticos [7].

## 1.2. Objetivos

Los objetivos de este Trabajo Final de Grado son:

- Diseño y simulación con software de simulación electromagnética de absorbentes perfectos en el infrarrojo cercano a partir del modelo de homogeneización de superficie, basados en oro y aluminio.
- Estudio de diversas técnicas de reconfiguración de metasuperficies, modificando los parámetros de la estructura a partir de estímulos externos. Posteriormente, diseño de una metasuperficie absorbente reconfigurable basada en ITO, permitiendo reconfiguración a partir de la aplicación de un campo eléctrico externo.
- Análisis de las técnicas de fabricación de un absorbente perfecto en el infrarrojo basado en aluminio.

Los diseños de absorbentes aparecen desarrollados en la Sección 2, donde las técnicas

de reconfiguración se estudian en la Subsección 2.3, mientras que la fabricación se describe en la Sección 3 del documento.

### 1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El desarrollo de metasuperficies absorbentes en el infrarrojo llevado a cabo a lo largo de este Trabajo Final de Grado contribuye a los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 [8]:

- **ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante.** Las metasuperficies absorbentes son utilizadas en tecnologías como paneles solares. Estas superficies pueden mejorar la absorción de la radiación infrarroja del sol, aumentando así la eficiencia de la conversión de energía solar en electricidad o calor, al minimizar las pérdidas [9]. Por otro lado, las metasuperficies absorbentes resultan también ventajosas para aumentar la eficiencia energética de los edificios, al ser útiles para reducir la transferencia de calor a través de paredes y techos, y reduciendo así el uso de sistemas de climatización [10]. Así pues, esta tecnología se alinea con las siguientes metas:
  - Meta 7.3: De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética.
  - Meta 7.a: De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias.
- **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura.** El desarrollo de metasuperficies absorbentes en el infrarrojo implica avances en la ciencia de materiales y la ingeniería de superficies, promoviendo así la investigación. Se trata de una tecnología con grandes proyecciones económicas y de empleo. En este sentido, se alinea con la siguiente meta:

- Meta 9.5. Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.

## 2. Diseño de metasuperficies absorbentes

### 2.1. Marco teórico

En esta sección, se sientan las bases teóricas para el diseño de metasuperficies absorbentes. Partiendo del equivalente circuital, se obtienen las ecuaciones necesarias para determinar su impedancia de entrada. A continuación, se determinan las características que debe cumplir una metasuperficie para conseguir absorción perfecta. Por último, se detalla el proceso de diseño necesario para crear capas conductoras con impedancias controlables, haciendo una distinción entre capas con impedancias capacitivas e inductivas.

#### 2.1.1. Estructura básica y equivalente circuital

En la Figura 2 se muestra un esquema común de una metasuperficie reflectante o absorbente. En esta configuración, un **plano de tierra conductor**, que asegura la no penetración de los campos detrás de la metasuperficie (con coeficiente de transmisión cero), está cubierta por una  **fina capa con cierta conductividad** con un **sustrato dieléctrico** en medio [11].

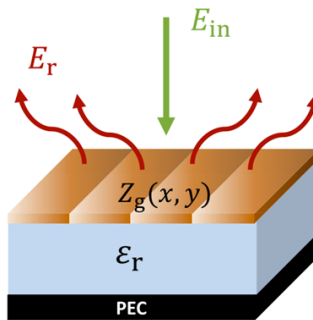


Figura 2: Esquemático de una metasuperficie reflectora o absorbente.

A partir de este esquema, es posible obtener un equivalente circuital que modela dicha metasuperficie, como muestra la Figura 3.



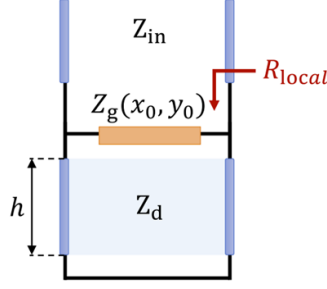


Figura 3: Equivalente circuital de la metasuperficie propuesta.

En este equivalente circuital,  $Z_{in}$  representa la impedancia de entrada de la estructura. La impedancia de red  $Z_g$  modela la impedancia equivalente de la fina capa conductora. Esta  $Z_g$  dependerá del material del que esté hecha, de su grosor y, principalmente, del patrón que forme. Dichos patrones y sus efectos en  $Z_g$  se desarrollan en la Sección 2.2. El sustrato dieléctrico se modela como una línea de transmisión, caracterizada por su ancho  $h$  y su impedancia característica  $Z_d$ . Por último, se asume el plano de tierra como un conductor eléctrico perfecto, por lo que se modela como un cortocircuito. Por tanto, el conjunto del dieléctrico y el plano de tierra pueden modelarse como una línea de transmisión terminada en cortocircuito, con impedancia  $Z_{gd}$ , atendiendo a la Ecuación (1) [12].

$$Z_{gd} = jZ_d \tan(k_d h) \quad (1)$$

Donde la impedancia característica del dieléctrico es  $Z_d = \sqrt{\mu_0/(\epsilon_0 \epsilon_d)}$  y  $k_d$  es la constante de propagación en el sustrato dieléctrico para el modo TEM, siendo  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío,  $\epsilon_0$  la permitividad eléctrica del vacío y  $\epsilon_d$  la permitividad eléctrica del material dieléctrico.

Así pues, la impedancia de entrada  $Z_{in}$  de la estructura será el paralelo entre la impedancia de red y la impedancia del sustrato conectado a tierra  $Z_{gd}$ , según la Ecuación (2).

$$Z_{in} = Z_g \parallel Z_{gd} = \frac{Z_g Z_{gd}}{Z_g + Z_{gd}} \quad (2)$$

### 2.1.2. Absorbentes perfectos

La absorción perfecta implica que la estructura presente reflexión nula. La impedancia de entrada de la estructura se puede expresar en términos del coeficiente de reflexión según la Ecuación (3) [12].

$$Z_{\text{in}} = \frac{1 + R}{1 - R} Z_0 \quad (3)$$

Donde  $Z_0$  es la impedancia característica del vacío. Por tanto, sabiendo que para conseguir absorción total se debe cumplir que  $R = 0$ , se deriva que  $Z_{\text{in}} = Z_0 = 120\pi$ . Es decir, hay que adaptar la impedancia de entrada de la estructura a la del medio para conseguir reflexión nula. Así pues, para cierta  $\omega$  de trabajo y una  $\varepsilon_d$  y  $h$  del dieléctrico determinados, se puede obtener la impedancia de la capa conductora requerida para conseguir absorción total, según la Ecuación (4).

$$Z_g = \frac{Z_{\text{in}} Z_{\text{gd}}}{Z_{\text{in}} - Z_{\text{gd}}} = \frac{Z_0 Z_{\text{gd}}}{Z_0 - Z_{\text{gd}}} \quad (4)$$

De esta forma, controlando  $Z_g$  es posible conseguir absorción perfecta a la frecuencia deseada. Cabe tener en cuenta que  $Z_g$  será una impedancia compleja, de forma que  $Z_g = \Re(Z_g) + j\Im(Z_g)$ , siendo  $\Re(Z_g)$  la parte resistiva y  $\Im(Z_g)$  la parte reactiva. Esta última podrá ser capacitiva, si  $\Im(Z_g) < 0$ , o inductiva, en caso de que  $\Im(Z_g) > 0$ . Por tanto, será necesario modificar tanto la parte resistiva como la reactiva para conseguir la  $Z_g$  deseada.

### 2.1.3. Impedancias controlables mediante diseños periódicos

Resulta muy difícil obtener la impedancia compleja deseada directamente a partir de una capa de material homogéneo, a menos que se dibuje en ella un patrón en alguna forma periódica. Es decir, resulta necesario disponer de un sistema de diseño para adaptar la impedancia de un material conductor a la deseada, puesto que será muy difícil encontrar en la naturaleza materiales que presenten una impedancia equivalente a  $Z_g$ .

Existen metasuperficies sin pérdidas, donde las impedancias necesarias son puramente reactivas, con  $\Re(Z_g) = 0$  de forma que  $Z_g = j\Im(Z_g)$ , y permiten modificar la fase en reflexión. Sin embargo, en metasuperficies que presentan pérdidas, como es el caso de los absorbentes, la impedancia contiene tanto parte resistiva como reactiva, haciendo que  $Z_g = \Re(Z_g) + j\Im(Z_g)$ . Para ello, es posible usar ciertas estructuras, como la cruz de Jerusalén o parches cuadrados. Sin embargo, esos patrones presentan el problema de que cualquier modificación de sus dimensiones afecta tanto a la parte resistiva como a la parte reactiva de la impedancia. Esto dificulta el ajuste de las dimensiones que proporcionen la impedancia deseada. Así pues, resulta preferible trabajar con un método que permita controlar de manera independiente la resistencia y la reactancia de la capa conductora. De esta forma, se puede conseguir cualquier  $Z_g$  compleja deseada.

A continuación se presenta una serie de patrones en los que un material conductor con impedancia  $Z_s$  se dispone formando distintos dibujos según el valor requerido para la resistencia, la capacitancia y la inductancia, permitiendo así su ajuste [3] [11].

### A. Redes capacitivas

Para estructuras que requieran una impedancia de red con carácter capacitivo, donde  $\Im(Z_g) < 0$ , se disponen sobre el dieléctrico tiras metálicas orientadas ortogonalmente al campo eléctrico, según lo mostrado en la Figura 4.

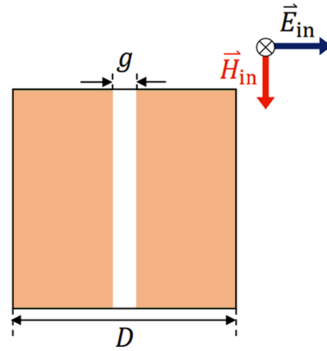


Figura 4: Celda unidad de la red capacitiva.

En este caso, la impedancia de la red viene determinada por la Ecuación (5).

$$Z_c = \frac{D}{D-g} Z_s - j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2\alpha_c}, \quad \alpha_c = \frac{k_{\text{eff}} D}{\pi} \ln \left( \frac{1}{\sin \frac{\pi g}{2D}} \right) \quad (5)$$

Donde  $k_{\text{eff}} = k_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}$  y  $\eta_{\text{eff}} = \sqrt{\mu_0 / (\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}})}$  siendo  $\varepsilon_{\text{eff}} = (\varepsilon_d + 1)/2$  la permitividad efectiva relativa, ya que el patrón está situado entre el espacio libre y un dieléctrico de permitividad relativa  $\varepsilon_d$ , y  $Z_s$  es la impedancia del material conductor. Los parámetros de la estructura son  $D$  y  $g$ , y el factor geométrico es  $D/(D-g)$ . Sin embargo, se puede comprobar que tanto la parte resistiva como la capacitiva dependen de los parámetros de la estructura, de manera que resulta difícil igualar  $Z_c$  a la  $Z_g$  deseada.

## B. Redes capacitivas con ajuste resistivo

Si se incluyen ranuras sobre las tiras periódicas, orientadas en la misma dirección que el campo eléctrico según la Figura 5, se crean barreras para la corriente que está fluyendo en las tiras capacitivas, aumentando de esta forma la resistencia efectiva.

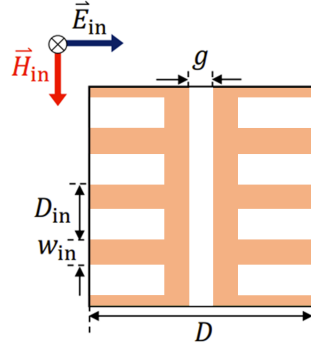


Figura 5: Celda unidad de la red capacitiva con tiras internas para control independiente de la resistividad.

La nueva tira metálica con las ranuras en la dirección del campo eléctrico presenta una impedancia  $Z_g^{\text{inner}}$  con carácter resistivo e inductivo determinada por la Ecuación (6).

$$Z_g^{\text{inner}} = \frac{D_{\text{in}}}{w_{\text{in}}} Z_s + j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2} \alpha_{\text{in}}, \quad \alpha_{\text{in}} = \frac{k_{\text{eff}} D_{\text{in}}}{\pi} \ln \left( \frac{1}{\sin \frac{\pi w_{\text{in}}}{2D_{\text{in}}}} \right) \quad (6)$$

Sustituyendo  $Z_s$  de la Ecuación (5) con la impedancia de las tiras  $Z_g^{\text{inner}}$  de la Ecuación (6), se obtiene la impedancia de la red capacitiva, expresada en la Ecuación (7).

$$Z_g^{\text{cap}} = \frac{DD_{\text{in}}}{(D-g)w_{\text{in}}} Z_s - j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2} \left( \frac{1}{\alpha_c} - \frac{D}{D-g} \alpha_{\text{in}} \right) \quad (7)$$

Por tanto, con una red con el dibujo presentado en la Figura 5 es posible ajustar la parte capacitiva con  $g$  y la parte resistiva con  $w_{\text{in}}$ , según se desee.

### C. Redes inductivas

En el caso de que la estructura requiera una impedancia de red con carácter inductivo, con  $\Im(Z_g) > 0$ , se disponen tiras metálicas en paralelo al campo eléctrico, según lo mostrado en la Figura 6.

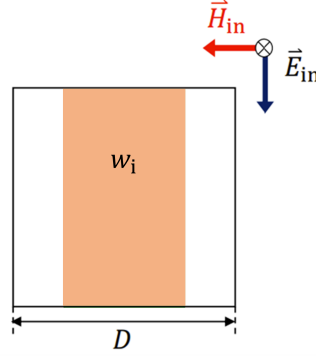


Figura 6: Celda unidad de la red inductiva.

En este caso, la impedancia de la red viene descrita por la Ecuación (8), donde la inductancia puede ajustarse con el periodo  $D$  y el ancho de la tira  $w_i$ .

$$Z_i = \frac{D}{w_i} Z_s + j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2} \alpha_{\text{in}}, \quad \alpha_{\text{in}} = \frac{k_{\text{eff}} D}{\pi} \ln \left( \frac{1}{\sin \frac{\pi w_i}{2D}} \right) \quad (8)$$

### D. Redes inductivas con ajuste resistivo

De forma similar al caso capacitivo, si en la estructura de la Figura 6 se sustituye la tira metálica por  $N$  sub-tiras metálicas atendiendo a la Figura 7, es posible aumentar la resistencia de la red, con un efecto prácticamente despreciable en la reactancia.

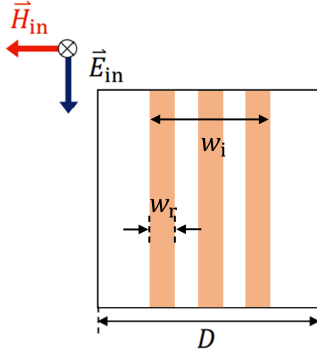


Figura 7: Celda unidad de la red inductiva con ajuste reactivo, con  $N = 3$ .

La impedancia con carácter inductivo de la red viene descrita por la Ecuación (9). De este modo, es posible ajustar la parte inductiva con  $w_i$  y la parte resistiva con  $w_r$ .

$$Z_g^{\text{ind}} = \frac{D}{Nw_r} Z_s + j \frac{\eta_{\text{eff}}}{2} \alpha_{\text{in}}, \quad (Nw_r \leq w_i) \quad (9)$$

De esta forma, haciendo uso de las estructuras y ecuaciones desarrolladas en esta sección, es posible diseñar estructuras capacitivas o inductivas con control independiente de la parte resistiva y la reactiva. Así pues, será posible ajustar la impedancia de la red a la  $Z_g$  requerida para conseguir absorción total.

## 2.2. Proceso de diseño

A lo largo de esta sección, se describe el proceso seguido para el diseño de absorbentes perfectos, con el objetivo de obtener una estructura cuya impedancia esté adaptada a la del medio, consiguiendo absorción total, a 1550 nm en términos de longitud de onda, o 193 THz en términos de frecuencia, con incidencia normal y polarización simple. El planteamiento elegido ha sido seguir un proceso incremental, en el que la metasuperficie planteada se hace cada vez más realista y compleja, asegurando así en cada etapa que se cuenta con la capacidad de diseño y simulación necesaria para pasar a la siguiente. Así, se pasa de un plano de diseño teórico a un plano mucho más cercano a la fabricación real. La Figura 8

muestra el diagrama de flujo seguido para el diseño de absorbentes.

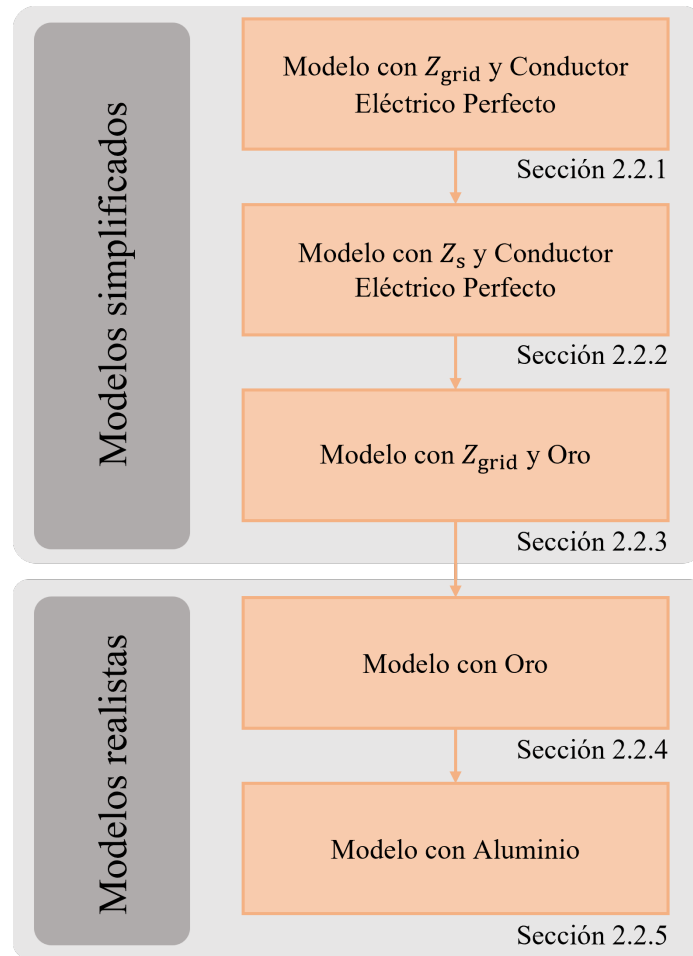


Figura 8: Diagrama de flujo seguido para el diseño de metasuperficies absorbentes.

En primer lugar, se parte de una estructura en la que la capa conductora es una superficie homogénea con una impedancia igual a la deseada. Esta fase queda descrita en la Sección 2.2.1. La siguiente fase consiste en cambiar esa capa homogénea por una en la que, a partir de una tinta con impedancia  $Z_s$ , se imprimen los dibujos correspondientes para conseguir la impedancia objetivo, según lo descrito en la sección previa. Los diseños y simulaciones realizados en esta fase se describen en la Sección 2.2.2. Por último, se incluyen los materiales reales. Este proceso se realiza, en primer lugar, incorporando una capa de oro en lugar

del conductor eléctrico perfecto pero manteniendo la capa conductora como una superficie homogénea, cuyo proceso queda recogido en la Sección 2.2.3, para después realizar un diseño completo basado en oro, según lo descrito en la Sección 2.2.4. Una vez se ha sistematizado el proceso de diseño, se realiza un diseño con aluminio, y se seleccionan así las muestras a fabricar. Este último paso se detalla en la Sección 2.2.5. En cada fase, se realiza el diseño de una de las celdas periódicas que conformarán la metasuperficie. Así pues, el periodo  $D$  será el ancho de cada uno de esos meta-átomos. Para todos los diseños presentados, la polarización del campo eléctrico se alinea a lo largo del eje  $x$ , y la estructura se orienta de acuerdo a lo mostrado en las figuras anteriores, según sea la celda prototipo de la que se hace uso.

### 2.2.1. Modelo con $Z_g$ y Conductor Eléctrico Perfecto

En una primera fase, la capa conductora será una capa homogénea. Por tanto, tan solo será necesario calcular la  $Z_g$  necesaria para conseguir absorción perfecta y modelizarla como una densidad de corriente superficial. El equivalente circuital de la estructura será el mismo que el mostrado en la Figura 3, tomando  $h = \lambda/5$  y  $\varepsilon_d = 4$ , siendo  $\lambda = 1,554 \mu\text{m}$ . Por tanto, haciendo uso de la Ecuación (1), se obtiene  $Z_{gd}$ , que será puramente reactiva dado que se trabaja con un cortocircuito perfecto, y se han despreciado las pérdidas del material dieléctrico.

$$Z_{gd} = jZ_d \tan(k_d h) = -136,56j \Omega \quad (10)$$

Por tanto, con la expresión de la Ecuación (4) es posible determinar la  $Z_g$  necesaria, con  $Z_0 = 120\pi$ .

$$Z_g = \frac{Z_0 Z_{gd}}{Z_0 - Z_{gd}} = 43,7 + 120,7j \Omega \quad (11)$$

Así pues, en la estructura la capa conductora será una capa fina con una impedancia homogénea con valor  $Z_g = 43,7 + 120,7j \Omega$ . En la Figura 9 se muestra el esquemático de la estructura final.



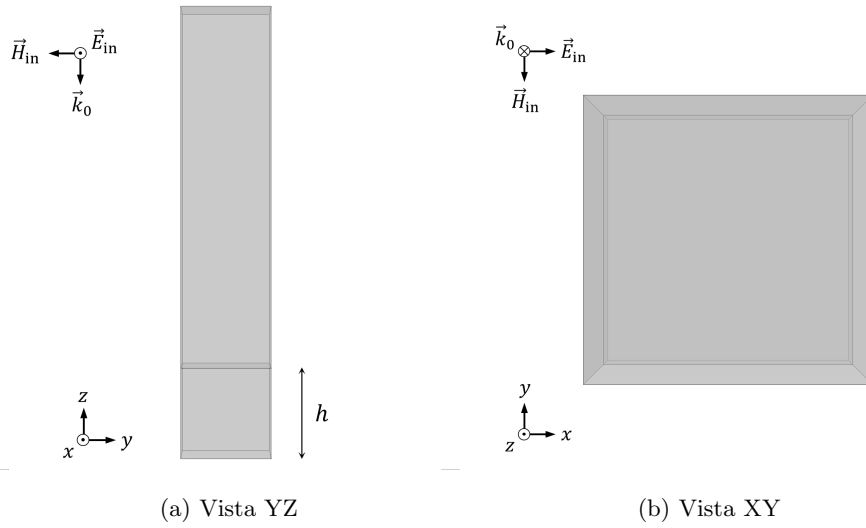


Figura 9: Esquemático de la metasuperficie absorbente con capa metálica de impedancia homogénea. La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una fina capa conductora de impedancia homogénea  $Z_g = 43,7 + 120,7j \Omega$ , un dieléctrico de  $h = 310,88$  nm y permitividad relativa  $\epsilon_d = 4$  y una capa de conductor eléctrico perfecto.

Las simulaciones mostradas a lo largo de este documento han sido realizadas con COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics es un software de simulación que permite utilizar el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de Maxwell, que describen el comportamiento de los campos electromagnéticos en diferentes medios y estructuras. En particular, para la simulación de las metasuperficies propuestas, se ha empleado la funcionalidad de COMSOL que permite aplicar condiciones periódicas. Estas condiciones se utilizan para representar un dominio infinito repetitivo a partir de una única celda unidad, de forma que permite modelar sistemas periódicos, como la metasuperficie.

En las etapas iniciales, antes de incluir los materiales reales en COMSOL, las impedancias homogéneas se modelan como una densidad de corriente superficial, estableciendo una condición de contorno. Para ello, se define una conductancia superficial, que relaciona el campo eléctrico con la densidad de corriente superficial según lo indicado en la Ecuación

(12) [12].

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (12)$$

Donde  $\sigma$  es la conductancia superficial, que se establece como la inversa de la impedancia homogénea  $Z_g$ . De esta forma, es posible modelar una capa metálica de impedancia homogénea cualquiera. Este mismo procedimiento será el utilizado para modelizar la capa metálica de impedancia  $Z_s$  con el que se dibujarán los patrones en etapas posteriores.

La Figura 10 recoge los resultados obtenidos tras la simulación de la estructura planteada. Se observa absorción perfecta a 193 THz, como se esperaba en el diseño.

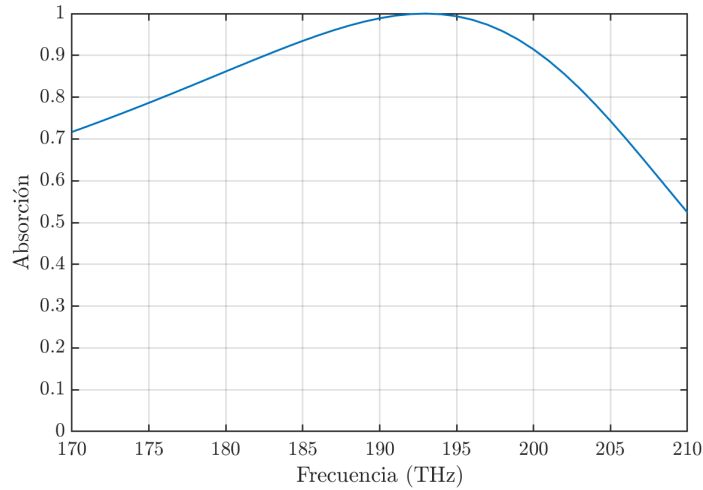


Figura 10: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_g$  y Conductor Eléctrico Perfecto.

### 2.2.2. Modelo con $Z_s$ y Conductor Eléctrico Perfecto

No obstante, la estructura anterior requiere de la existencia de un metal que presente una impedancia exacta de  $43,7+120,7j \Omega$ , algo muy difícil de encontrar en la naturaleza. Por tanto, a continuación se hace uso de la teoría presentada en la Sección 2.1.3, de forma que a partir de un metal con una cierta impedancia de superficie  $Z_s$  se consigue la  $Z_g$  deseada a partir del dibujo de ciertos patrones. El equivalente circuital continúa siendo el mismo que el mostrado en la Figura 3, pero la impedancia  $Z_g$  se obtendrá a partir de dichos patrones

dibujados con el conductor de impedancia  $Z_s$ .

Al tratarse de una impedancia de superficie inductiva, ya que  $\Im(Z_g) > 0$ , se hace uso del patrón mostrado en la Figura 6. Se estudian dos situaciones en relación a la impedancia de superficie del material conductor, con  $Z_s = 1 \Omega$  y  $Z_s = 10 \Omega$ . Para estos dos supuestos, se deben determinar los dos parámetros estructurales: el periodo  $D$  y el ancho de la tira  $w_i$ . Para ello, se igualan las partes real e imaginaria de  $Z_i$  en la Ecuación (8) a las de la  $Z_g$  requerida. De esta forma, se obtiene un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, de donde resulta sencillo despejar  $D$  y  $w_i$ .

Para el primer supuesto, con  $Z_s = 1 \Omega$ , se obtienen unas dimensiones de  $D = 149,69 \text{ nm}$  y  $w_i = 3,42 \text{ nm}$ . La Figura 11 muestra el esquemático de esta estructura.

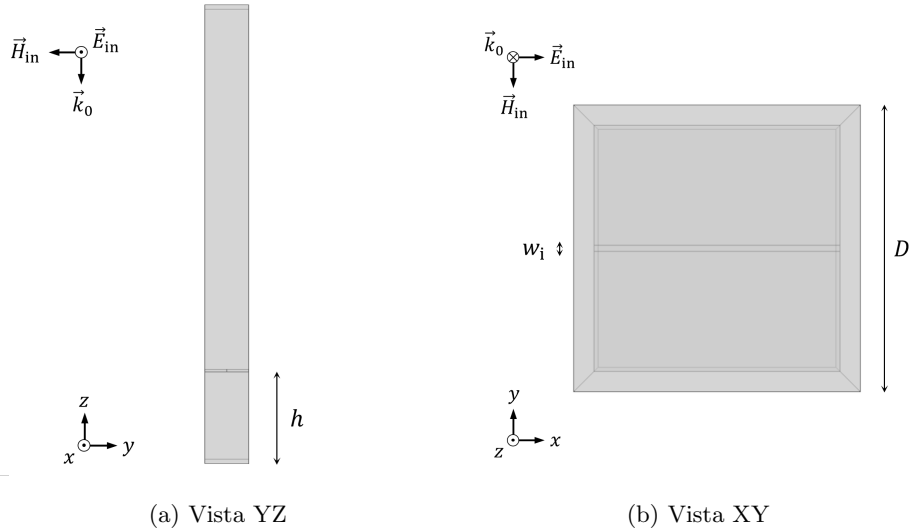


Figura 11: Esquemático de la metasuperficie absorbente a partir de un conductor con  $Z_s = 1 \Omega$ . La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de material conductor con  $Z_s = 1 \Omega$  formando un patrón con  $D = 149,69 \text{ nm}$  y  $w_i = 3,42 \text{ nm}$ , un dieléctrico de  $h = 310,88 \text{ nm}$  y permitividad relativa  $\epsilon_d = 4$  y una capa de conductor eléctrico perfecto.

La Figura 12 recoge los resultados obtenidos por la simulación de dicha estructura,

consiguiendo absorción perfecta a 193 THz.

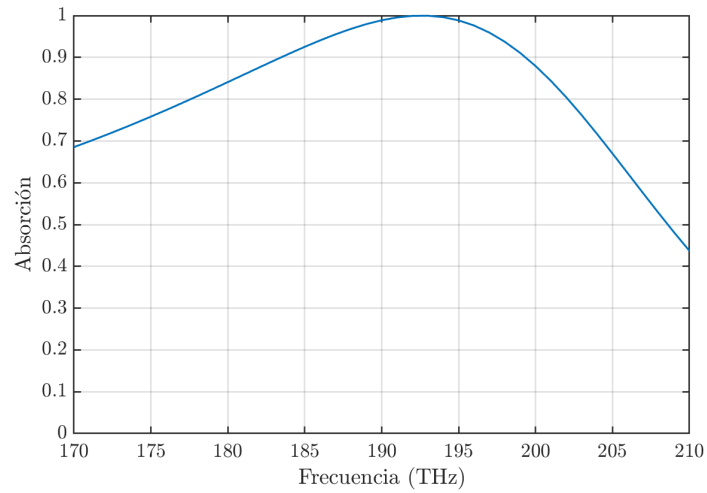


Figura 12: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_s = 1 \Omega$  y Conductor Eléctrico Perfecto.

A continuación, se realiza el diseño a partir de un conductor con  $Z_s = 10 \Omega$ . En este caso, los parámetros estructurales obtenidos a partir del sistema de ecuaciones son  $D = 476,33$  nm y  $w_1 = 108,93$  nm. Esta estructura se muestra en la Figura 13.

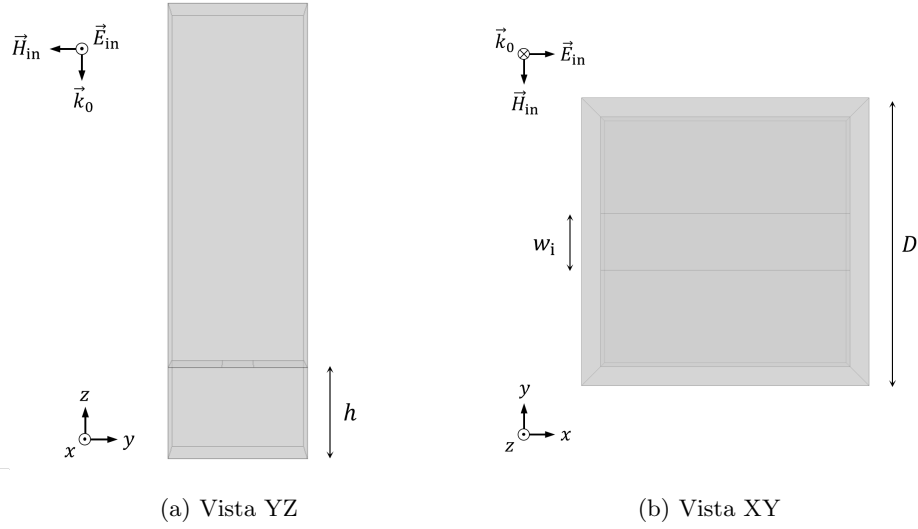


Figura 13: Esquemático de la metasuperficie absorbente a partir de un conductor con  $Z_s = 10 \Omega$ . La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de material conductor con  $Z_s = 10 \Omega$  formando un patrón con  $D = 476,33$  nm y  $w_i = 108,93$  nm, un dieléctrico de  $h = 310,88$  nm y permitividad relativa  $\epsilon_d = 4$  y una capa de conductor eléctrico perfecto.

La Figura 14 muestra los resultados de la simulación de dicha estructura. Sin embargo, se observa que el pico de absorción en este caso aparece desplazado, consiguiéndose absorción total en torno a los 188 THz, en lugar de a los 193 THz deseados. Este desplazamiento puede deberse a que el periodo  $D$  obtenido está en torno a un tercio de la longitud de onda, por lo que no se cumple la condición mencionada en la Sección 1.1 que indicaba que el tamaño de los meta-átomos debía ser mucho menor a la longitud de onda. Por tanto, no puede considerarse totalmente homogeneizado, y las ecuaciones empiezan a presentar ciertas desviaciones. Para poder considerar homogeneización, lo habitual es trabajar con dimensiones inferiores al orden de  $\lambda/10$ , pero en fotónica las longitudes de onda son tan pequeñas que esto se encuentra restringido por limitaciones en la fabricación.

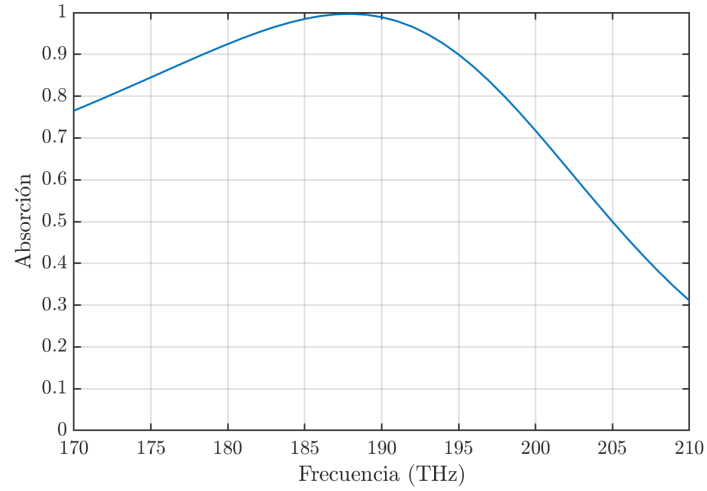


Figura 14: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_s = 10 \Omega$  y Conductor Eléctrico Perfecto.

No obstante, resulta sencillo ajustar el pico de absorción a la frecuencia de operación deseada, realizando un reescalado. Así pues, si se desea tener absorción total a  $1,554 \mu\text{m}$  (193 THz) a partir de una estructura con absorción total a  $1,596 \mu\text{m}$  (188 THz), tan solo es necesario redimensionar la estructura con un factor de  $\frac{1,554 \mu\text{m}}{1,596 \mu\text{m}} = 0,974$ . De esta forma, se consigue desplazar el pico de absorción hasta los 193 THz, tal y como muestra la Figura 15, para unas dimensiones de  $D = 463,99 \text{ nm}$ ,  $w_i = 106,11 \text{ nm}$  y  $h = 302,83 \text{ nm}$ .

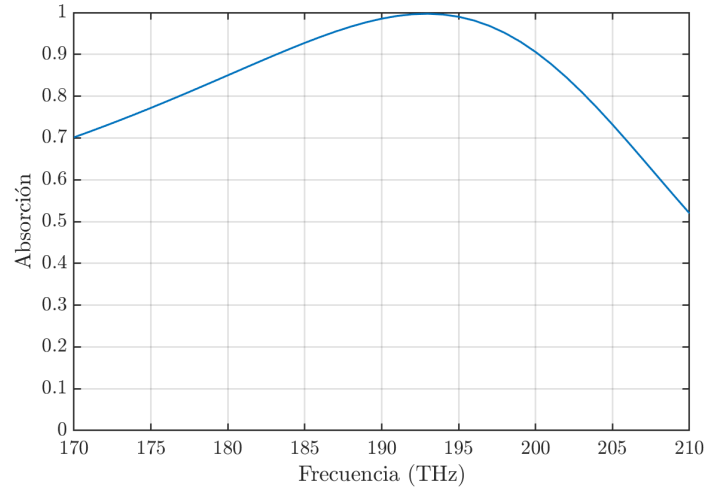


Figura 15: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_s = 10 \Omega$  y Conductor Eléctrico Perfecto, tras el reescalado.

Una vez realizado el diseño con la celda unidad para redes inductivas de la Figura 6, se procede a sustituir la tira metálica por 3 sub-tiras, de la forma mostrada en la Figura 7. De la misma forma que antes, se estudiarán dos casos, con un material conductor de  $Z_s = 1 \Omega$  y con otro de  $Z_s = 10 \Omega$ . Para este patrón, los parámetros estructurales a calcular son  $w_i$  y  $w_r$ , deducidos a partir de la Ecuación (9), donde es indispensable que se cumpla que  $3w_r \leq w_i$ . Al hacer uso de esta estructura, el periodo  $D$  no viene determinado por la ecuación, sino que puede seleccionarse según lo deseado. Por tanto, en este caso se elige un periodo  $D = \lambda/6$ , siendo  $\lambda = 1,554 \mu\text{m}$ .

Para el supuesto con  $Z_s = 1 \Omega$ , se obtienen unas dimensiones de  $w_i = 24,26 \text{ nm}$  y  $w_r = 1,98 \text{ nm}$ . La Figura 16 muestra el esquemático de la estructura.

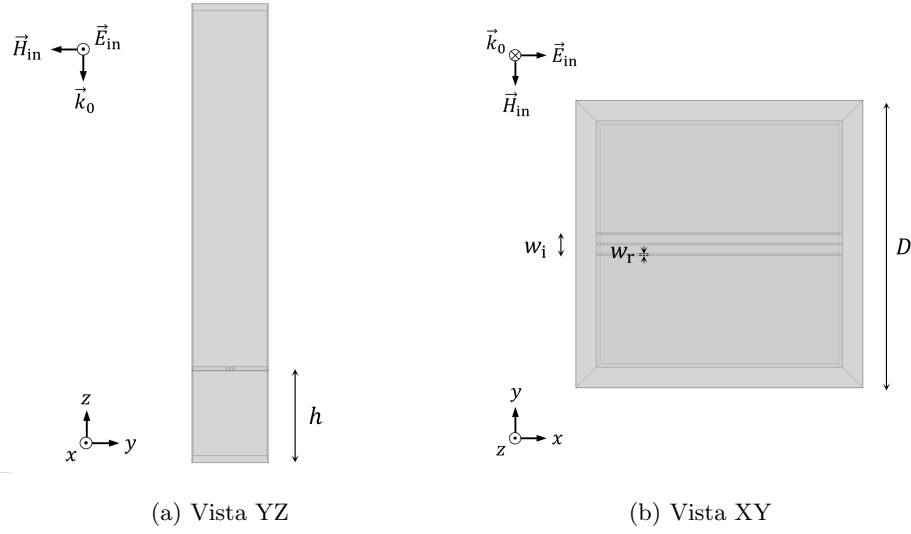


Figura 16: Esquemático de la metasuperficie absorbente a partir de un conductor con  $Z_s = 1 \Omega$  y  $N = 3$ .

La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de material conductor con  $Z_s = 1 \Omega$  formando un patrón con  $w_i = 24,26 \text{ nm}$  y  $w_r = 1,98 \text{ nm}$ , un dieléctrico de  $h = 310,88 \text{ nm}$  y permitividad relativa  $\epsilon_d = 4$  y una capa de conductor eléctrico perfecto.

La Figura 17 recoge los resultados obtenidos tras la simulación de esta estructura. De nuevo, se observa que el pico de absorción está desplazado, situándose este a  $189 \text{ THz}$ . De la misma forma que antes, esto se debe a que el periodo no es lo suficientemente pequeño para considerar homogeneización efectiva. Además, se observa que cierta parte de la energía es reflejada por la estructura, de forma que la absorción conseguida no es total, error debido de nuevo a la falta de homogeneización. Para darle solución, podría hacerse una optimización numérica de las dimensiones de la estructura, buscando absorción total.



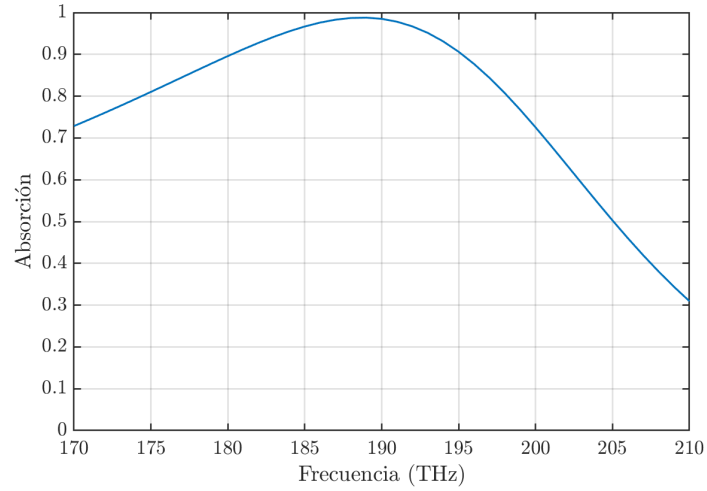


Figura 17: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_s = 1 \Omega$ ,  $N = 3$  y Conductor Eléctrico Perfecto.

Por tanto, se hace un reescalado de la estructura, con un factor de  $\frac{1,554 \mu\text{m}}{1,587 \mu\text{m}} = 0,979$ , con tal de desplazar el pico de absorción a la frecuencia de operación. La Figura 18 muestra los resultados obtenidos, para unas dimensiones de  $D = 253,7 \text{ nm}$ ,  $w_i = 23,75 \text{ nm}$ ,  $w_r = 1,94 \text{ nm}$  y  $h = 304,44 \text{ nm}$ .

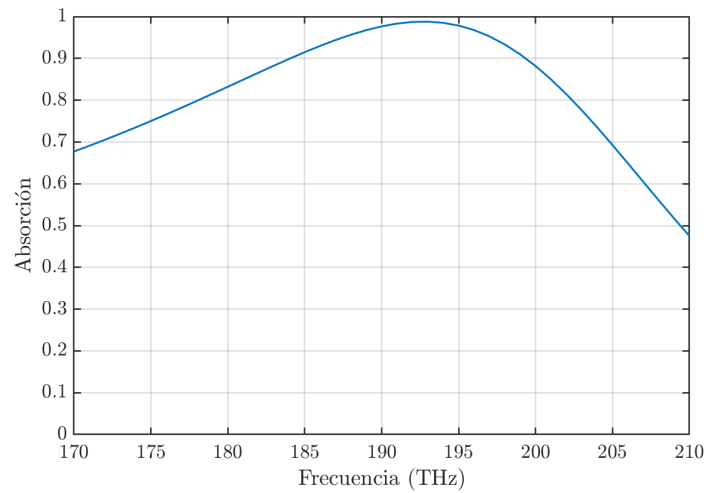


Figura 18: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_s = 1 \Omega$ ,  $N = 3$  y Conductor Eléctrico Perfecto, tras el reescalado.

No obstante, al realizar los cálculos para obtener el diseño a partir de un conductor con  $Z_s = 10 \Omega$ , se observa una particularidad. Las dimensiones obtenidas son de  $w_i = 24,26 \text{ nm}$  y  $w_r = 19,8 \text{ nm}$ , que no verifican la condición impuesta por la que  $3w_r \leq w_i$ , y no tienen sentido físico. Esto se atribuye al hecho de que, en lo que a la resistencia respecta, la parte real de impedancia de superficie del material metálico  $\Re(Z_s)$  tiene un límite superior. Es decir, al dibujar un patrón con un metal con cierta  $\Re(Z_s)$  para conseguir una capa de cierta  $\Re(Z_g)$ , tan solo se podrá conseguir que el material conduzca peor, pero nunca mejor. Es decir, será posible incrementar su resistividad, pero no disminuirla. Es por ello que, para cada patrón, existe un límite para el valor de la  $Z_s$ , que dependerá del valor del factor geométrico de la estructura [11]. En este caso, no es posible realizar el diseño para una  $Z_s = 10 \Omega$ .

### 2.2.3. Modelo con $Z_g$ y Oro

En esta fase del diseño, se introducen materiales reales. Sin embargo, antes de elegir el patrón a realizar con el conductor, se diseña con una superficie homogénea, de igual manera que en la primera fase del proceso de diseño. Así pues, en esta nueva estructura, el conductor eléctrico perfecto será sustituido por una capa de oro, el dieléctrico intermedio será de  $SiO_2$  y la capa fina conductora será por el momento una superficie homogénea. En estas circunstancias, el equivalente circuital de la estructura ya no se corresponde con el mostrado en la Figura 3, ya que el oro presenta pérdidas y no es correcto asumirlo como un conductor perfecto. De esta forma, aparece una resistencia  $Z_L$  al final de la línea de transmisión que modela al dieléctrico, tal y como muestra la Figura 19.

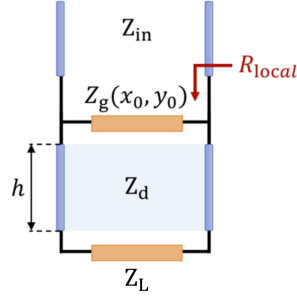


Figura 19: Equivalente circuital de la metasuperficie propuesta con  $Z_L$ .

Así pues,  $Z_{gd}$  puede calcularse como la impedancia de entrada de una línea de transmisión terminada en una impedancia de carga  $Z_L$ , como muestra la expresión de la Ecuación (13) [12].

$$Z_{gd} = Z_d \frac{Z_L + jZ_d \tan(k_d h)}{Z_d + jZ_L \tan(k_d h)} = 1,79 - 70,44j \Omega \quad (13)$$

Donde  $Z_L$  será la impedancia de superficie del oro  $Z_s^{Au}$  que, a diferencia de los casos anteriores, será compleja. Esta impedancia puede calcularse a partir de su índice de refracción, formado por su parte real  $n$  y su parte imaginaria  $k$ , atendiendo a las Ecuaciones (14) y (15) [12]. A 193 THz, el oro presenta  $n^{Au} = 0,525$  y  $k^{Au} = 10,8$ .

$$\epsilon_r^{Au} = (n^{Au} - jk^{Au})^2 = (0,525 - 10,8j)^2 = -116,36 - 11,34j \quad (14)$$

$$Z_s^{Au} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r^{Au}}} = 1,69 + 34,82j \quad (15)$$

En cuanto a  $Z_d$ , la impedancia característica de la línea de transmisión que modela al  $SiO_2$ , esta se calcula a partir de su  $\epsilon_d$  y su  $h$ . La permitividad relativa se calcula de la misma forma que en el caso del oro, sabiendo que a 193 THz, este material presenta  $n^{SiO_2} = 1,5$  y  $k^{SiO_2} = 0$ , por lo que  $\epsilon_d^{SiO_2} = 2,25$ . En cuanto al grosor del dieléctrico, conviene elegirlo de manera que la  $Z_s$  del oro sea lo más cercana posible a la  $Z_g$  requerida – pero siempre asegurando que sea inferior, por lo explicado anteriormente respecto al límite superior de  $Z_s$  – con tal de facilitar el diseño del dibujo en la siguiente etapa, una vez se incorpore el patrón

hecho con oro. La Figura 20 muestra las partes real e imaginaria de  $Z_s^{Au}$  y  $Z_g$ , donde esta última depende del grosor del dieléctrico. Así pues, se puede comprobar que para grosores pequeños, la  $Z_s^{Au}$  dista mucho de  $Z_g$ , mientras que para grosores mayores estos valores se acercan. Por tanto, se ha seleccionado una  $h$  de 450 nm.

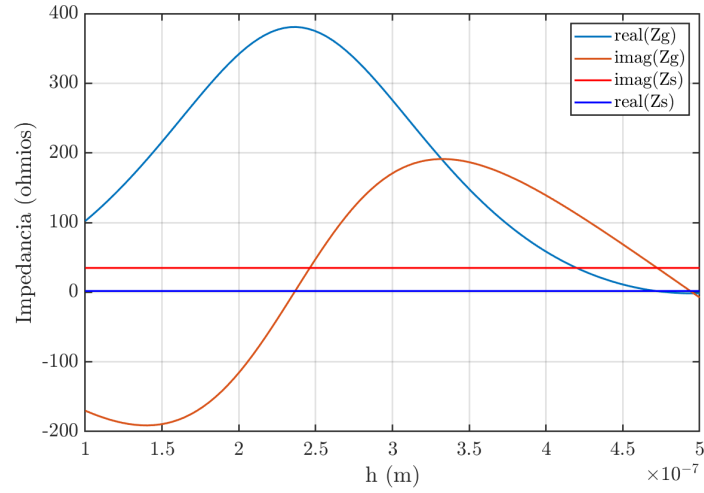


Figura 20:  $Z_s^{Au}$  y  $Z_g$  en función del grosor del dieléctrico  $h$ .

Una vez determinado el valor de  $Z_{gd}$ , es posible calcular la  $Z_g$  requerida haciendo uso de la Ecuación (4).

$$Z_g = \frac{Z_0 Z_{gd}}{Z_0 - Z_{gd}} = 11,1 + 68,69j \Omega \quad (16)$$

Por tanto, la capa fina conductora homogénea tendrá una impedancia inductiva de  $11,1 + 68,69j \Omega$ . La Figura 21 muestra el esquemático de esta estructura.

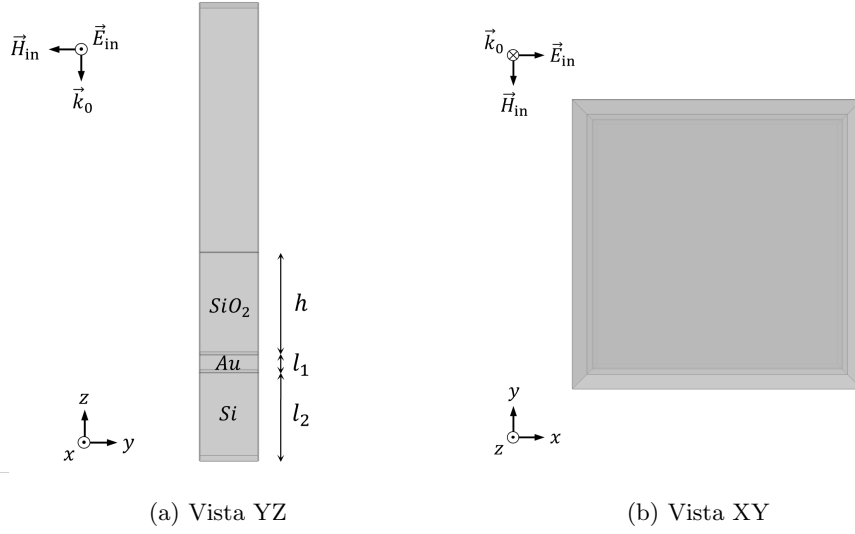


Figura 21: Esquemático de la metasuperficie absorbente con impedancia homogénea y oro en la base. La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una fina capa conductora de impedancia homogénea  $Z_g = 11,1+68,69j \Omega$ , una capa de  $SiO_2$  de grosor  $h = 450$  nm, una capa de oro de grosor  $l_1 = 80$  nm y un bloque de silicio de grosor  $l_2 = \lambda/4$  que modeliza la base sobre la que se depositará la muestra.

Cabe destacar que la onda incidente nunca alcanzará la capa de silicio situada en la base, ya que el grosor de la capa de oro  $l_1$  será superior al *skin depth*  $\delta$  de este metal, por lo que la onda no se propagará a través de ella. Este parámetro puede calcularse a partir de la Ecuación (17) [12].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (17)$$

Donde  $\rho^{Au} = 2,24 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,  $f = 193$  THz,  $\mu_r^{Au} = 1$  y  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ , derivando que  $\delta^{Au} = 5,42$  nm. Por tanto, se verifica que la capa de oro de 80 nm tiene un grosor muy superior a su *skin depth*. Así pues, el coeficiente de transmisión de la estructura será igual a cero.

Los resultados obtenidos tras simular esta estructura quedan recogidos en la Figura 22. Se puede comprobar que se consigue absorción total a 193 THz.

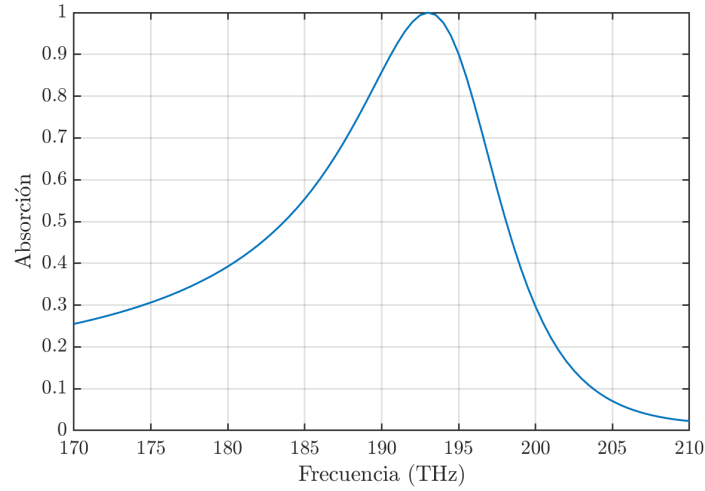


Figura 22: Absorción obtenida con el diseño con  $Z_g$  y oro.

#### 2.2.4. Modelo con Oro

La última fase consiste en sustituir la capa conductora homogénea con  $Z_g = 11,1 + 68,69j \Omega$  por una capa de oro. Sin embargo, esta capa de oro tendrá un cierto grosor, superior al *skin depth* previamente calculado. Su grosor será muy grande en comparación a la anchura de la estructura, por lo que debe tomarse como un objeto volumétrico y no en dos dimensiones. Por tanto, dejará de ser una capa fina, y no será posible modelarlo por su impedancia de superficie  $Z_s$ . De hecho, se comprueba que la absorción de la estructura varía con el grosor de esta capa de oro, siendo que este aspecto no aparece contemplado por las ecuaciones presentadas en la Sección 2.1.3. Así pues, no es posible utilizar dichas ecuaciones, por lo que se propone partir de una estructura como la mostrada en la Figura 23, y realizar un barrido paramétrico sobre el ancho del bloque de oro  $w_{in}$  y el grosor *thick*, buscando una combinación de ambos parámetros estructurales que proporcione absorción total. Se ha elegido esta estructura por poseer carácter inductivo. El periodo  $D$  se ha seleccionado como  $\lambda/6$ , siendo  $\lambda = 1,554$  nm.

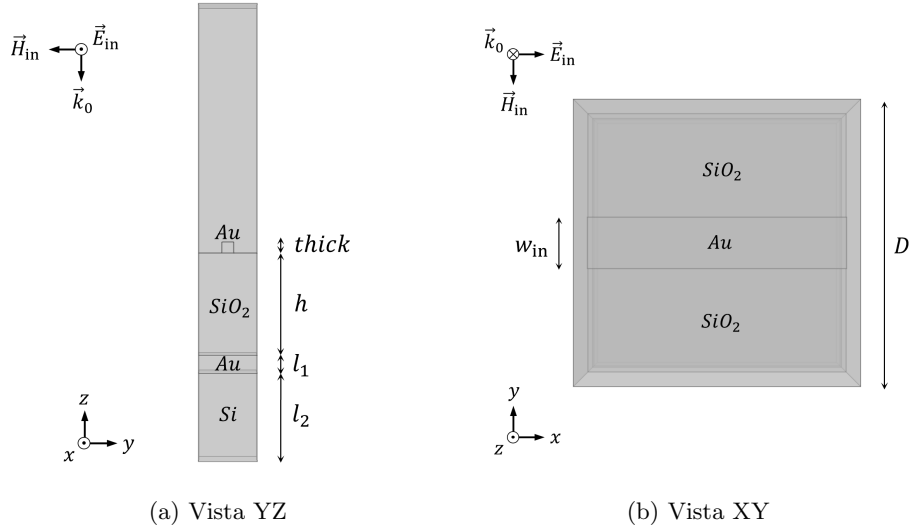


Figura 23: Esquemático de la metasuperficie absorbente con oro.

La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de oro de ancho  $w_{in}$  y grosor *thick*, una capa de  $SiO_2$  de grosor  $h = 450$  nm, una capa de oro de grosor  $l_1 = 80$  nm y un bloque de silicio de grosor  $l_2 = \lambda/4$  que modeliza la base sobre la que se depositará la muestra.

Para elegir los rangos de valores sobre los que se realiza el barrido paramétrico, es claramente necesario que se encuentren dentro de lo posible físicamente y a nivel de fabricación. Para el ancho  $w_{in}$ , se ha barrido desde  $0,3D$  hasta  $0,5D$ , con un paso de  $0,05D$ . En el caso del grosor *thick*, se ha barrido desde 30 nm hasta 70 nm con un paso de 10 nm. Los resultados de este barrido paramétrico quedan recogidos en la Figura 24, donde se han seleccionado las diez combinaciones de  $w_{in}$  y *thick* que mayor absorción proporcionan.

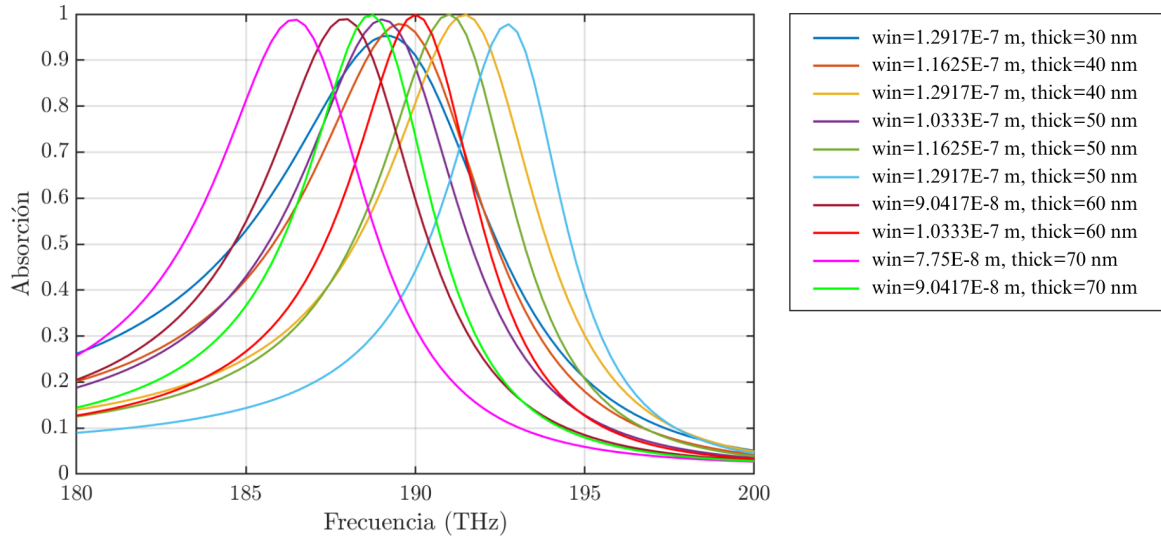


Figura 24: Absorción obtenida con el diseño con oro.

### 2.2.5. Modelo con Aluminio

Una vez conseguida la absorción total usando oro como material metálico, se realiza un proceso similar sustituyendo el oro por aluminio. El aluminio es un material con más pérdidas que el oro, pero que no suponen un problema en este caso al estar diseñándose absorbentes que, por su propia definición, introducen pérdidas. De esta forma, es posible diseñar absorbentes con unos costes menores.

Así pues, se parte de una estructura muy similar a la anterior, pero donde tanto la capa de grosor  $thick$  y ancho  $w_{in}$  como la capa de grosor  $l_1$  serán de aluminio. De nuevo, se debe garantizar que el grosor  $l_1$  sea superior al  $skin\ depth$  del material, para asegurar que la onda no se propague. En este caso, haciendo uso de la Ecuación (17), con  $\rho^{Al} = 2,6548 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ,  $f = 193$  THz,  $\mu_r^{Al} = 1$  y  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ , se deriva que  $\delta^{Al} = 5,91$  nm. Por tanto, la capa de aluminio de 80 nm tiene un grosor muy superior al  $skin\ depth$ , y la onda no se propagará.

Por otro lado, para la elección de  $h$  se realiza un proceso análogo al del caso del oro. En la Figura 25, se muestran las partes real e imaginaria de  $Z_s^{Al}$  y  $Z_g$ , en función del



grosor del dieléctrico  $h$ . De esta forma, se elige el grosor  $h$  para el que ambas impedancias sean más cercanas, facilitando así la optimización. De la misma forma que en el caso del oro, se selecciona un grosor de 450 nm. La impedancia de superficie del aluminio  $Z_s^{Al}$  se ha determinado de la misma forma que en las Ecuaciones (14) y (15), sabiendo que  $n^{Al} = 1,578$  y  $k^{Al} = 15,656$ . De esta forma, se obtiene  $\varepsilon_r^{Al} = -242,62 - 49,42j$  y  $Z_s^{Al} = 2,4 + 23,84j \Omega$ .

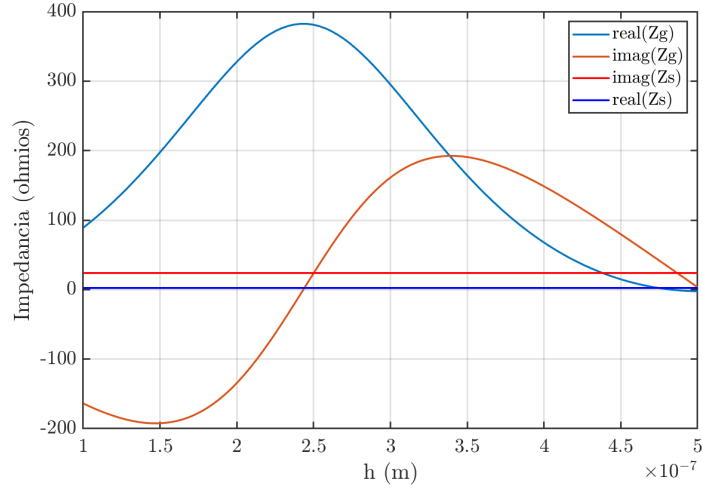


Figura 25:  $Z_s^{Al}$  y  $Z_g$  en función del grosor del dieléctrico  $h$ .

La Figura 26 muestra el esquemático de la estructura propuesta, donde los parámetros  $w_{in}$  y  $thick$  se optimizarán realizando un barrido paramétrico.

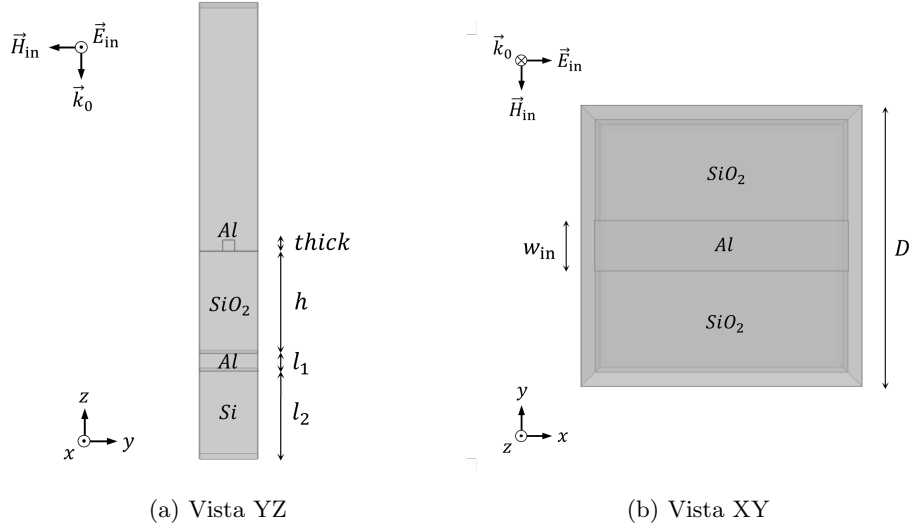


Figura 26: Esquemático de la metasuperficie absorbente con aluminio.

La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de aluminio de ancho  $w_{in}$  y grosor *thick*, una capa de  $SiO_2$  de grosor  $h = 450$  nm, una capa de aluminio de grosor  $l_1 = 80$  nm y un bloque de silicio de grosor  $l_2 = \lambda/4$  que modeliza la base sobre la que se depositará la muestra.

Para esta estructura, los resultados de la simulación quedan recogidos en la Figura 27. Para el parámetro  $w_{in}$ , se ha barrido desde  $0,1D$  hasta  $0,9D$ , con un paso de  $0,08D$ , siendo  $D = \lambda/6$ . En cuanto al parámetro *thick*, se ha barrido desde 30 nm hasta 70 nm, con un paso de 10 nm. De la misma forma que para el diseño en oro, en la gráfica se recogen las diez combinaciones de ambos parámetros que proporcionan mayor absorción.

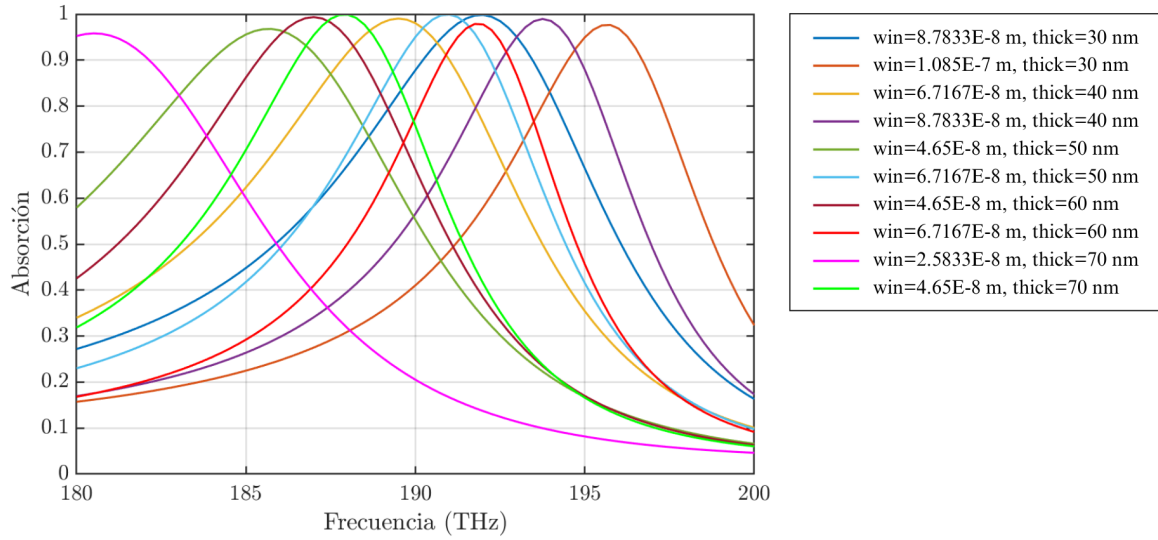
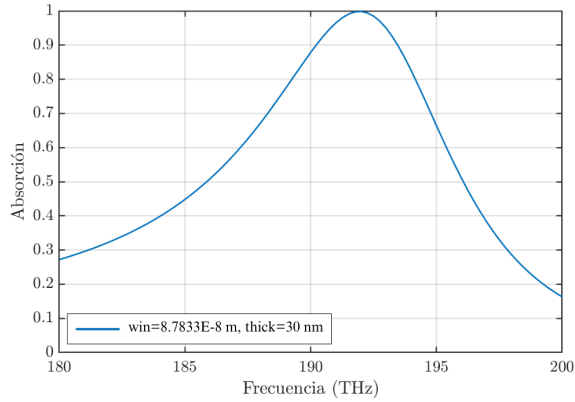
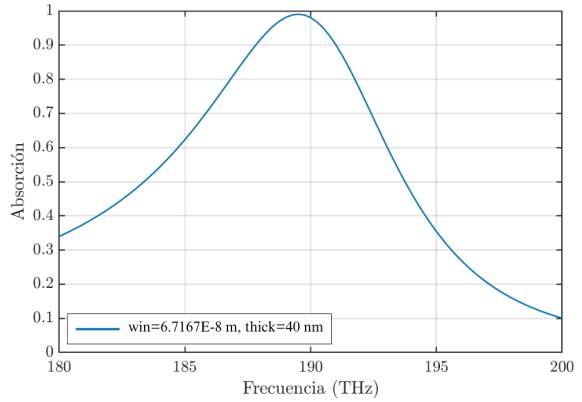


Figura 27: Absorción obtenida con el diseño con aluminio.

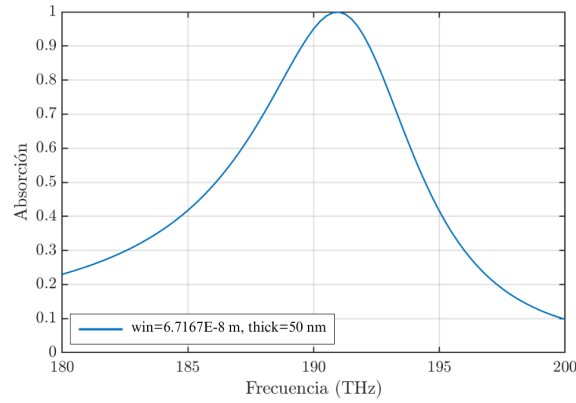
De entre todos estos diseños, se seleccionan tres para ser fabricados. En concreto, se selecciona uno con  $thick = 30$  nm, otro con  $thick = 40$  nm y un último con  $thick = 50$  nm. Para cada uno de estos grosores, se elige el ancho  $w_{in}$  que proporciona mayor absorción, de entre todos los calculados, con tal de disponer de tres estructuras con diferentes dimensiones que proporcionen absorción total en el infrarrojo cercano. Así pues, las absorciones y las dimensiones de los tres diseños seleccionados para fabricación se muestran en la Figura 28. En concreto, el primer diseño, con  $w_{in} = 87,833$  nm y  $thick = 30$  nm presenta un pico de absorción de 0,9982 a 192 THz, el segundo, con  $w_{in} = 67,167$  nm y  $thick = 40$  nm presenta una absorción máxima de 0,9904 a 189,5 THz, y la última, con  $w_{in} = 67,167$  nm y  $thick = 50$  nm, permite obtener una absorción máxima de 0,9993 a 191 THz.



(a) Absorción de la primera muestra, con  $w_{in} = 87,833 \text{ nm}$  y  $thick = 30 \text{ nm}$ .



(b) Absorción de la segunda muestra, con  $w_{in} = 67,167 \text{ nm}$  y  $thick = 40 \text{ nm}$ .



(c) Absorción de la tercera muestra, con  $w_{in} = 67,167 \text{ nm}$  y  $thick = 50 \text{ nm}$ .

Figura 28: Absorción de las muestras seleccionadas para fabricación.

### 2.3. Reconfiguración de metasuperficies absorbentes

Una vez determinada la estructura básica para diseñar metasuperficies absorbentes a una frecuencia dada, el siguiente objetivo es hacer dichas metasuperficies reconfigurables. La reconfigurabilidad es una característica altamente perseguida actualmente en el campo de la fotónica, pues permite modificar el comportamiento de la estructura ante un estímulo externo.

Así pues, partiendo de una estructura con propiedades fijas, es posible hacerla reconfigurable si se utilizan materiales que cambien sus propiedades. Como se menciona en la Sección 1.1, los materiales alterarán su comportamiento o sus dimensiones ante distintos tipos de estímulo – cambios de temperatura, iluminar con luz, inducir deformaciones mecánicas o aplicar campos electromagnéticos [13]. Por tanto, conociendo la estructura básica estudiada en las secciones anteriores para el diseño de absorbentes, es posible sustituir alguno de sus componentes por otro material, permitiendo así cambiar el modo de operación. A continuación se identifica una serie de opciones para convertir la metasuperficie en reconfigurable.

- Modificar el grosor del sustrato. Para ello, podría hacerse uso de algún material que cambie su volumen a partir de una deformación mecánica. Estas deformaciones pueden darse por cambios en la temperatura o por la aplicación de un campo eléctrico externo [14] [15] [16].
- Configurar el índice de refracción del sustrato. Así pues, se sustituiría la capa de  $SiO_2$  por otra de un material con índice controlable, pudiendo modificar la respuesta de la estructura. Algunos ejemplos son cristales líquidos [17] [18] o materiales de cambio de fase [19] [20].
- Configurar el índice de refracción de la capa conductora, cambiando así su comportamiento. Esta estrategia presenta un gran potencial, ya que la conductividad que presente esta capa puede afectar sustancialmente a la respuesta de la estructura, permitiendo un alto nivel de reconfigurabilidad. Un material que permite este tipo de ajuste es el ITO (siglas de *Indium Tin Oxide*), que varía su índice de refracción al aplicar un voltaje externo [21]. Por tanto, se tratará de una superficie eléctricamente sintonizable.

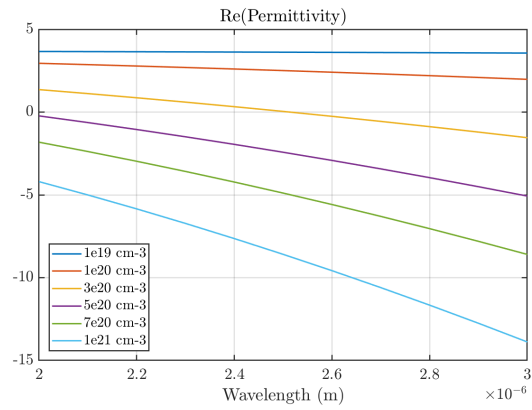
De entre estas estrategias, se ha seleccionado esta última y se ha llevado a cabo un estudio más profundo. El ITO presenta numerosas ventajas. En primer lugar, la reconfiguración eléctrica de metasuperficies resulta muy prometedora, ya que es compatible con la tecnología

CMOS. Los materiales típicamente usados son ITO, GaAs y grafeno, de entre los que destaca el primero de ellos por ser económico y sencillo de depositar [7]. Además, la concentración de portadores del ITO puede ser controlada desde  $10^{19}$  hasta  $10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$  al aplicar un voltaje externo. La permitividad de este material es función de la concentración de portadores, por lo que la aplicación de un campo eléctrico externo posibilitará el control de su permitividad. En concreto, su capacidad de sintonización es tal que se encuentra entre los materiales conocidos como ENZ (*epsilon-near-zero*), esto es, existe una frecuencia para la que la parte real de la permitividad es muy cercana a cero [22]. Cabe tener en cuenta que, si  $\Re(\varepsilon) < 0$ , un material se comporta como un metal a esa frecuencia, mientras que para  $\Re(\varepsilon) > 0$ , se tratará de un semiconductor. Por tanto, el hecho de que el ITO pueda alterar su permitividad de positiva a negativa presenta un gran potencial en la reconfiguración de metasuperficies [23].

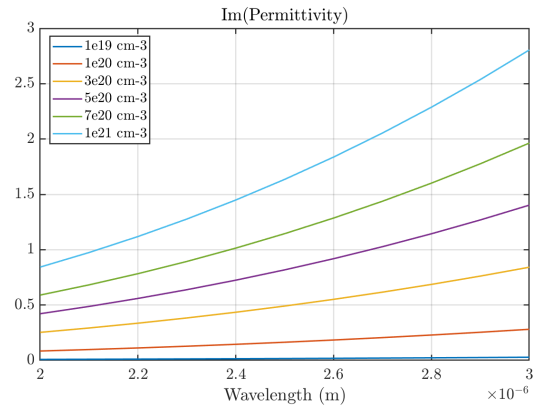
En concreto, la permitividad compleja del ITO puede calcularse según la Ecuación (18), donde el ITO se ha modelado como un metal Drude [7].  $\varepsilon_{\text{inf}}$  es la permitividad a frecuencia infinita,  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda incidente,  $\gamma$  es la frecuencia de colisión, y  $\omega_p$  es la frecuencia del plasma. Se verifica que  $\omega_p^2 = \frac{Nq^2}{m_e^*\varepsilon_0}$ , siendo  $N$  la concentración de portadores,  $q$  la carga del electrón,  $\varepsilon_0$  la permitividad eléctrica del vacío y  $m_e^*$  la masa efectiva de los electrones, que para el ITO es  $m_e^* = 0,45m_e$ , con  $m_e$  siendo la masa del electrón en el vacío.

$$\varepsilon^{ITO}(\omega) = \varepsilon_{\text{inf}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \quad (18)$$

Las Figuras 29a y 29b muestran respectivamente la parte real y la imaginaria de la permitividad compleja del ITO calculada a partir de dicha ecuación. Se ha tomado  $\varepsilon_{\text{inf}} = 3,74$  y  $\gamma = 10^{14}$  rad/s, conociendo que  $q = 1,609 \times 10^{-19}$  C,  $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$  kg y  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-14}$  F/m [7].



(a) Parte real de la permitividad compleja del ITO.



(b) Parte imaginaria de la permitividad compleja del ITO.

Figura 29: Permitividad calculada del ITO según el modelo de Drude, para concentraciones de portadores  $N$  de  $10^{19}$  a  $10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$ .

La Figura 30 muestra el diagrama de flujo seguido para el diseño de la metasuperficie reconfigurable a partir de ITO. A lo largo de esta sección, se detalla cada uno de los procesos y los resultados obtenidos.

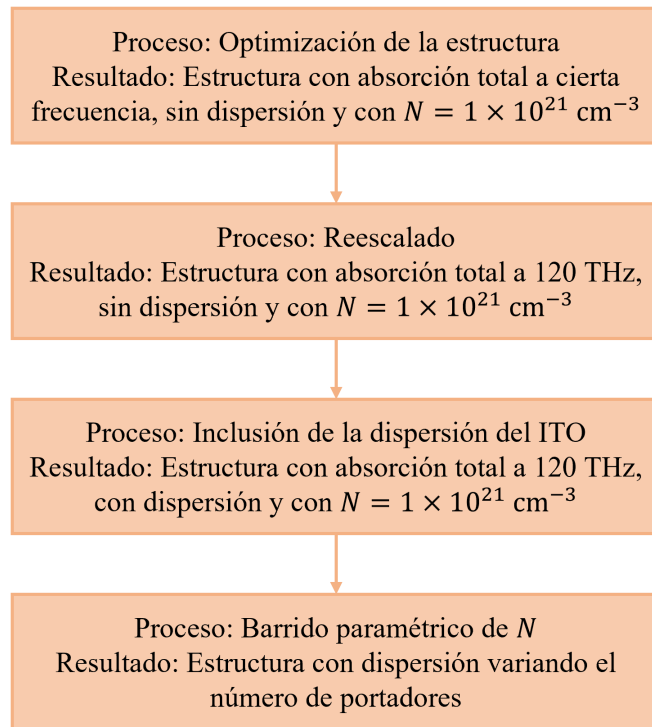


Figura 30: Diagrama de flujo seguido para el diseño de la metasuperficie reconfigurable con ITO.

Teniendo en cuenta los valores presentados de la permitividad relativa del ITO en función de la frecuencia, se establece la frecuencia de 120 THz – equivalente a una longitud de onda de  $2,5 \mu\text{m}$  – como nueva frecuencia de operación. Así pues, el objetivo será diseñar una metasuperficie que presente absorción total a 120 THz a partir de la misma estructura planteada en la Sección 2.2.5, donde la capa conductora de aluminio de ancho  $w_{\text{in}}$  y grosor *thick* se sustituye por ITO. El diseño del absorbente perfecto se realiza para una concentración de portadores de  $N = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , dado que es la concentración para la que el ITO presenta un comportamiento más conductivo, al ser la parte real de la permitividad la más negativa, como muestra la Figura 29. Una vez determinadas las dimensiones de esa estructura, se realiza un barrido de las diferentes concentraciones de portadores presentadas, estudiando así el comportamiento de la estructura ante variaciones en el voltaje aplicado.

Como se ha visto en secciones anteriores, el aspecto fundamental a la hora de diseñar



metasuperficies absorbentes es encontrar un pico de absorción, sin importar la frecuencia a la que este aparezca, ya que siempre es posible reescalar la estructura y desplazar así el pico de absorción a la frecuencia de operación deseada. Por tanto, a partir de la estructura mostrada en la Figura 31, se realiza un barrido paramétrico con el objetivo de optimizar la estructura. En este caso, los parámetros estructurales a optimizar son el ancho de la capa de ITO  $w_{in}$ , el grosor *thick* y el grosor del dieléctrico  $h$ . Resulta necesario añadir este nuevo grado de libertad ante la imposibilidad de encontrar una resonancia variando tan solo el ancho y el grosor del ITO.

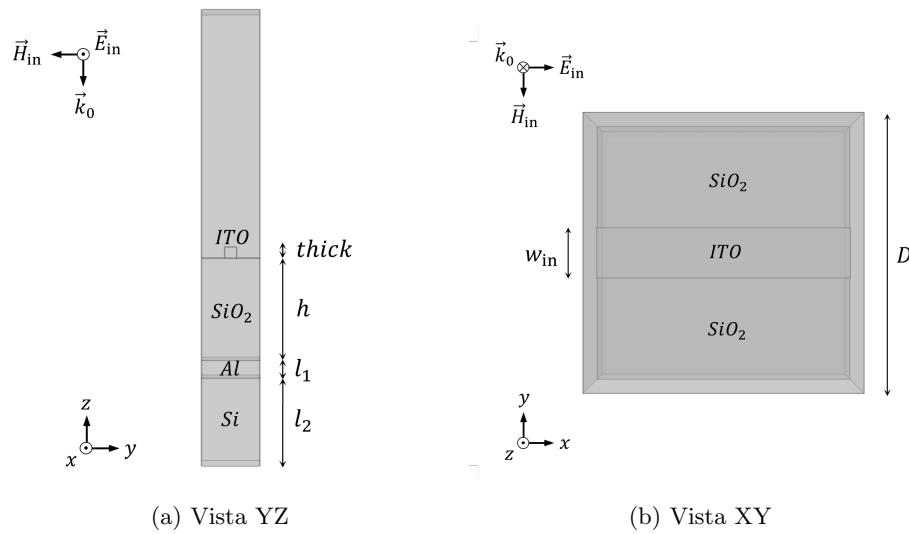


Figura 31: Esquemático de la metasuperficie absorbente inductiva con ITO.

La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de ITO de ancho  $w_{in}$  y grosor *thick*, una capa de  $SiO_2$  de grosor  $h$ , una capa de aluminio de grosor  $l_1 = 129,03$  nm y un bloque de silicio de grosor  $l_2 = \lambda/4$  que modeliza la base sobre la que se depositará la muestra. El periodo  $D$  es de 416,67 nm.

Con tal de facilitar el proceso de optimización, esta se realiza tomando el ITO como un material sin dispersión, es decir, con índice de refracción y permitividad constantes. Así pues, se considera que el índice de refracción del ITO para cualquier frecuencia es igual al que realmente presenta a 120 THz, o 2,5 nm, y para una concentración de portadores

$N = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ . Por tanto, atendiendo a la Figura 32, se toma  $n = 0,278$  y  $k = 2,94$ . De esta forma, cuando se reescale la estructura para situar el pico de absorción en 120 THz, el diseño seguirá siendo válido ya que su índice de refracción se mantendrá constante para esa frecuencia.

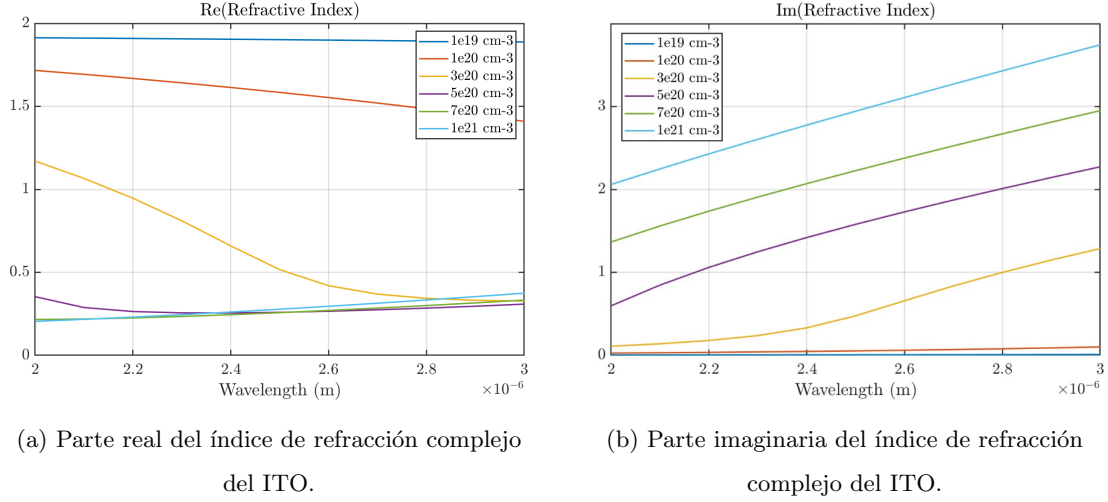


Figura 32: Índice de refracción del ITO según el modelo de Drude, para concentraciones de portadores  $N$  de  $10^{19}$  a  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ .

Sin embargo, tras realizar una serie de barridos paramétricos para la estructura con las características especificadas, se determina que no es posible optimizarla, no pudiendo encontrar unas dimensiones para las que presente absorción total. Por tanto, se decide modificar la orientación del campo eléctrico, de forma que se alinee paralelamente al eje  $y$ , como muestra la Figura 33.

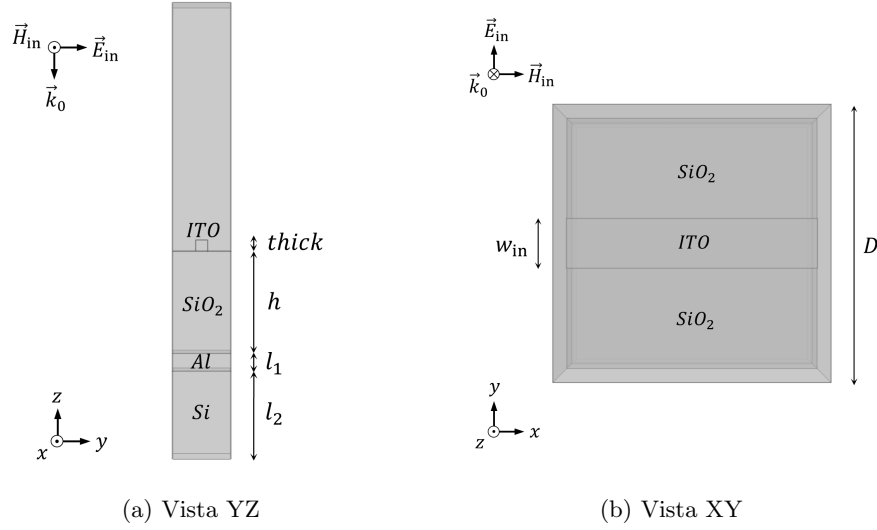


Figura 33: Esquemático de la metasuperficie absorbente capacitiva con ITO.

La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de ITO de ancho  $w_{in}$  y grosor *thick*, una capa de  $SiO_2$  de grosor  $h$ , una capa de aluminio de grosor  $l_1 = 129,03$  nm y un bloque de silicio de grosor  $l_2 = \lambda/4$  que modeliza la base sobre la que se depositará la muestra. El periodo  $D$  es de 416,67 nm.

Para esta estructura, la absorción obtenida tras la simulación queda reflejada en la Figura 34. El parámetro  $w_{in}$  se ha barrido desde  $0,1D$  hasta  $0,9D$  con paso de  $0,08D$  y siendo  $D = 416,67$  nm. Respecto al parámetro *thick*, se ha barrido desde los 30 nm hasta 70 nm con un paso de 10 nm, y el parámetro  $h$  se ha barrido desde los 250 nm hasta los 750 nm, con un paso de 55,556 nm. Se han seleccionado las doce combinaciones de parámetros que proporcionan mayor absorción, de entre todas las simuladas.

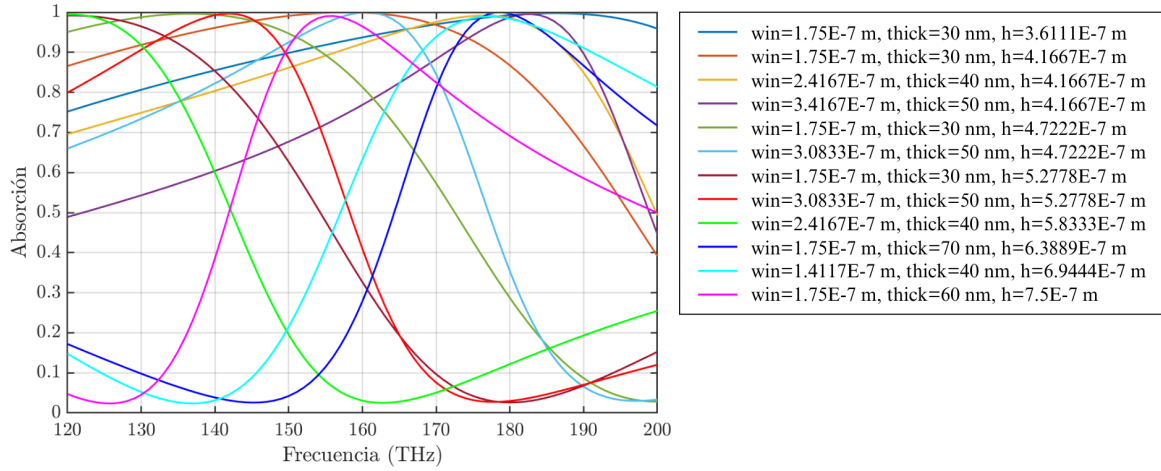


Figura 34: Absorción obtenida con el diseño con ITO.

Por tanto, puede comprobarse que a partir de esta diseño es posible encontrar una combinación de dimensiones que hace que la estructura proporcione absorción total. De entre todas ellas, se ha seleccionado aquella cuyos parámetros estructurales son  $w_{in} = 308,33$  nm,  $thick = 50$  nm y  $h = 472,22$  nm. De esta forma, se consigue una absorción de 0,998, como muestra la Figura 35.

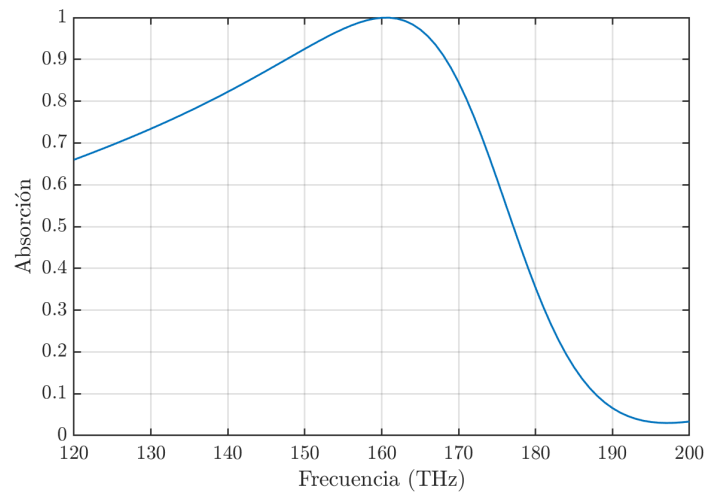


Figura 35: Absorción obtenida con el diseño con ITO con  $w_{in} = 308,33$  nm,  $thick = 50$  nm y  $h = 472,22$  nm.

Así pues, se reescala esta estructura con tal de desplazar el pico de absorción a 120 THz, de la misma forma que en secciones anteriores. Por tanto, para una longitud de onda inicial de  $1,8518 \mu\text{m}$  (162 THz) y una final de  $2,5 \mu\text{m}$  (120 THz), el factor de reescalado es de  $\frac{2,5 \mu\text{m}}{1,8518 \mu\text{m}} = 1,35$ . Las dimensiones finales de la estructura quedan detalladas en la Figura 36, tras el reescalado. Por otro lado, la Figura 37 recoge la absorción proporcionada por dicha estructura, donde se puede comprobar que el pico de absorción ha sido desplazado a la frecuencia de operación deseada.

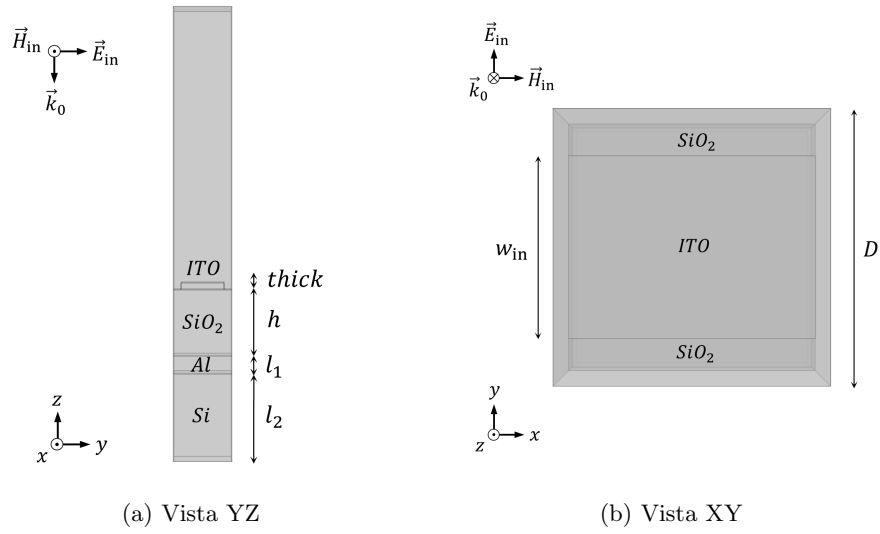


Figura 36: Esquemático de la metasuperficie absorbente con ITO.

La estructura y sus características son, de arriba abajo: Un dieléctrico con una permitividad relativa  $\epsilon_b = 1$  que modeliza el aire, una capa de ITO de ancho  $w_{\text{in}} = 416,25 \text{ nm}$  y grosor  $\text{thick} = 67,5 \text{ nm}$ , una capa de  $\text{SiO}_2$  de grosor  $h = 637,5 \text{ nm}$ , una capa de aluminio de grosor  $l_1 = 174,19 \text{ nm}$  y un bloque de silicio de grosor  $l_2 = \lambda/4$  que modeliza la base sobre la que se depositará la muestra. El periodo  $D$  es de  $562,5 \text{ nm}$ .

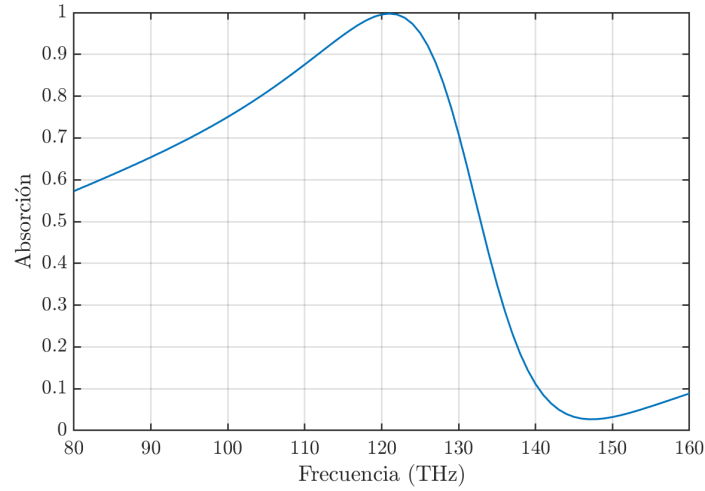


Figura 37: Absorción obtenida con el diseño con ITO tras el reescalado, sin incorporar la dispersión.

Por tanto, se cuenta ya con una estructura que, haciendo uso de ITO como conductor, proporciona absorción total a la frecuencia deseada de 120 THz. Sin embargo, las simulaciones hechas hasta el momento no incluyen la dispersión de este material, para facilitar la búsqueda de la resonancia. La realidad es que el ITO es un material dispersivo y, como se ha explicado anteriormente, su permitividad relativa es dependiente de la frecuencia según la relación indicada en la Ecuación (18). Al haberse realizado el diseño sin contemplar la dispersión, atribuyendo las propiedades del ITO a 120 THz como constantes a todas las frecuencias, el comportamiento para la frecuencia de operación se mantiene invariable. Como se muestra en la Figura 38, la estructura continúa proporcionando absorción total a 120 THz, pese a que el comportamiento a otras frecuencias varía por el efecto de la dispersión.

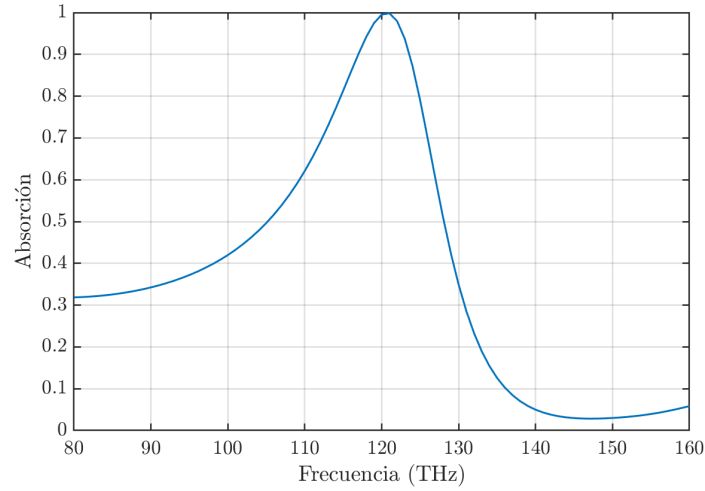


Figura 38: Absorción obtenida con el diseño con ITO tras incorporar la dispersión.

De esta forma, se dispone de una estructura basada en ITO para la que se obtiene absorción total a 120 THz, y con una concentración de portadores de  $N = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , para la que la parte real de la permitividad del ITO es negativa, presentando así comportamiento metálico. A partir de dicha estructura, en la Figura 39 se muestra su respuesta en función de la concentración de portadores, que a su vez depende del voltaje externo aplicado. Las distintas concentraciones de portadores estudiadas son  $N = 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N = 7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  y  $N = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , para las que el ITO presenta un comportamiento metálico,  $N = 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , para la que la parte real de la permitividad compleja cruza por un cero, y  $N = 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  y  $N = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , para las que se comporta como un semiconductor. Así pues, el potencial de reconfigurabilidad es mayor, ya que se trabaja en la zona ENZ (*epsilon-near-zero*), como se menciona previamente.

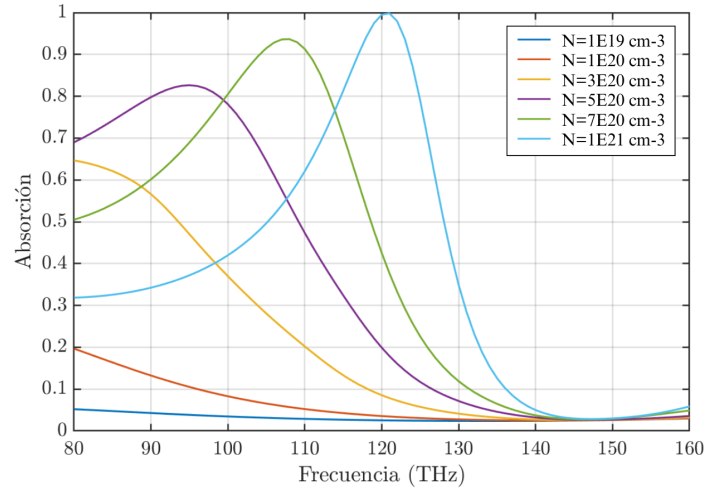


Figura 39: Absorción obtenida con el diseño con ITO en función de la concentración de portadores  $N$ .

De esta forma, es posible determinar la forma en la que la metasuperficie se ve afectada ante una variación en la concentración de portadores. A nivel físico, con la disminución de la concentración de portadores  $N$ , se observa un doble efecto: un desplazamiento de la resonancia hacia frecuencias más bajas, junto con una disminución de la absorción.

Otro posible enfoque para interpretar la reconfigurabilidad de la metasuperficie es entendiéndola como un dispositivo que trabaja a 120 THz. Por tanto, en la Tabla 1 se recogen las absorciones que presenta a esta frecuencia, en función de la concentración de portadores.

$N$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	1E21	7E20	5E20	3E20	1E20	1E19
<b>Absorción</b>	0.998	0.425	0.199	0.085	0.036	0.025

Tabla 1: Absorción a 120 THz en función de la concentración de portadores.



### 3. Fabricación

La fabricación de las muestras de aluminio seleccionadas ha sido llevada a cabo en las instalaciones del Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC). Este cuenta con una sala limpia, operada por un equipo de ingenieros de procesos y de equipos, que cuenta con una línea completa de micro y nanofabricación. La sala limpia del NTC es de tipo 100, lo que significa que se asegura que no hay más de 100 partículas por cada pie cúbico de aire. Esto resulta de vital importancia para la fabricación a escala nanométrica, donde cualquier perturbación puede causar un mal funcionamiento del diseño. A lo largo de esta sección, se resume de manera general el proceso seguido para la fabricación de las muestras seleccionadas. La Figura 40 muestra visualmente las etapas de fabricación descritas a continuación.

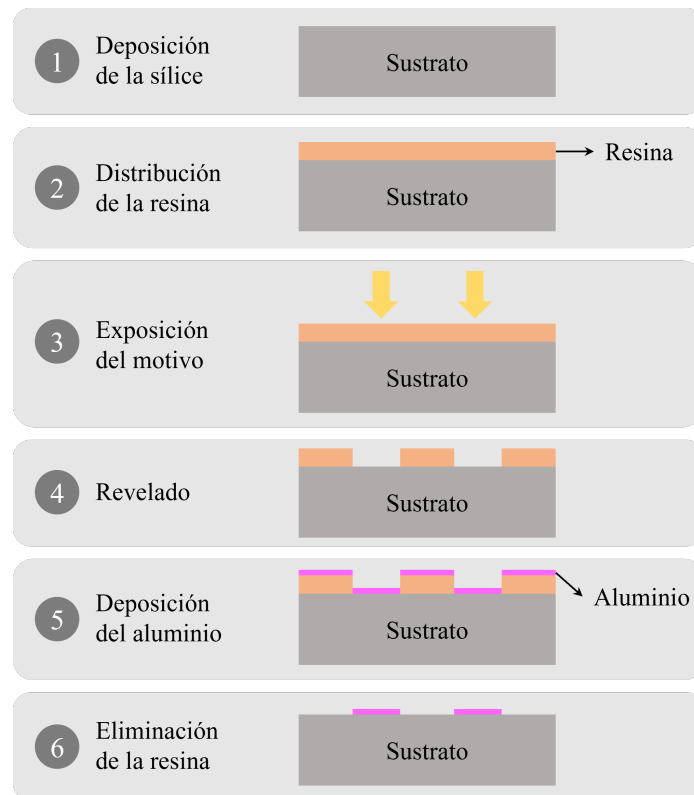


Figura 40: Pasos del proceso de fabricación de las muestras.

1. En primer lugar, se **deposita la capa de sílice** que servirá como base para la muestra. Este depósito se realiza mediante un proceso denominado PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*), y se realiza sobre una oblea de vidrio o de silicio, dependiendo de la aplicación.
2. A continuación, se realiza el **depósito de la resina**. En esta etapa, el objetivo es crear sobre la base de sílice una película de resina uniforme, adherente, libre de defectos y con un grosor adecuado – de en torno a 100 nm. Para ello, se hace uso de una técnica denominada *spincoating*, por la que se deposita la resina en el centro de la base, y se le hace girar rápidamente para que la mezcla se distribuya de la forma más uniforme posible. Este proceso se realiza con un equipo llamado EVG 101. La Figura 41 muestra este equipo.

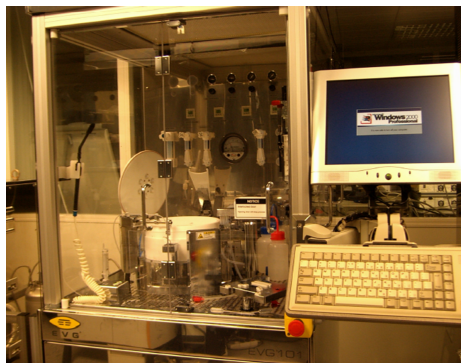


Figura 41: Coater EVG 101 utilizado para el depósito de la resina.

3. Una vez que la base de sílice está cubierta con la resina, se realiza el **proceso de exposición**. Para la exposición de la resina, existen varios métodos: litografía óptica, impresión por contacto y litografía por haz de electrones. En el NTC, el más utilizado es este último, por lo que ha sido el utilizado para la fabricación de las muestras. En particular, se ha hecho uso de la litografía por haz de electrones EBL (*Electron Beam Litography*). Para ello, el equipo utilizado es el Raith 150, mostrado en la Figura 42.



Figura 42: Raith 150 utilizado para la exposición de la resina.

En esta etapa, cabe tener en cuenta que el proceso será distinto según el tipo de resina que se haya depositado en la etapa anterior. Existen dos tipos de resina: positiva y negativa. La diferencia entre ambas está en su respuesta al posterior revelado, ya que con la resina positiva será la parte expuesta al haz de electrones la que sea eliminada, mientras que con la resina negativa será la parte no expuesta la eliminada. En este caso, se ha hecho uso de resina positiva, concretamente resina PMMA. Por tanto, se deben exponer las zonas que se desea eliminar.

4. El siguiente paso es el **revelado**. De esta forma, se elimina la resina que se ha hecho soluble tras el proceso de litografía – en este caso, la parte soluble es la que ha sido expuesta al haz de electrones, al tratarse de resina positiva. Así, se consigue disponer del dibujo deseado en la resina. En esta etapa, el equipo utilizado es el Tel Reve 20 Hot Plate mostrado en la Figura 43.



Figura 43: Brewer Science CEE 100CB utilizado para el revelado.

5. A continuación, se realiza el **depósito del metal**. Para ello, se evapora el aluminio con una evaporadora de cañón de electrones, que calienta el metal y lo evapora hacia la muestra. de esta forma, el aluminio se deposita tanto en las zonas con resina como en las zonas en las que la sílice está expuesta. Para ello, se hace uso del equipo PFEIFFER Vacuum Classic 500 mostrado en la Figura 44.



Figura 44: PFEIFFER Vacuum Classic 500 utilizado para el depósito del metal.

6. Por último, se **elimina la resina** (y el aluminio sobrante depositado sobre ella) mediante un proceso denominado *lift-off* con TMAH a presión. Así, sobre la sílice quedan únicamente las tiras de aluminio siguiendo el diseño deseado.

Cabe tener en cuenta que existe una limitación tecnológica con respecto a las dimensiones de las muestras, que viene dada por el límite de resolución del equipo que realiza la litografía por haz de electrones. Es por ello que las dimensiones de la capa de aluminio de las muestras deben redondearse a múltiplos de 2 nm. Las Tablas 2, 3 y 4 recogen la comparación entre los valores de diseño y las especificaciones enviadas a fabricación para la primera, segunda y tercera muestra, respectivamente.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>Especificación de fabricación</b>
$D$	258,33 nm	258 nm
$w_{in}$	87,833 nm	88 nm
$thick$	30 nm	30 nm

Tabla 2: Comparativa entre valor de diseño y especificación de fabricación para los parámetros de la primera muestra.

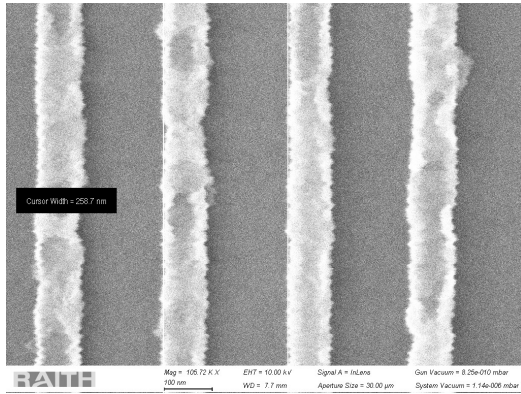
<b>Parámetro</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>Especificación de fabricación</b>
$D$	258,33 nm	258 nm
$w_{in}$	67,167 nm	68 nm
$thick$	40 nm	40 nm

Tabla 3: Comparativa entre valor de diseño y especificación de fabricación para los parámetros de la segunda muestra.

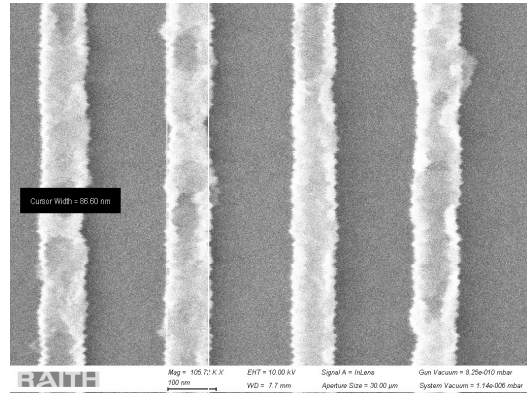
<b>Parámetro</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>Especificación de fabricación</b>
$D$	258,33 nm	258 nm
$w_{in}$	67,167 nm	68 nm
$thick$	50 nm	50 nm

Tabla 4: Comparativa entre valor de diseño y especificación de fabricación para los parámetros de la tercera muestra.

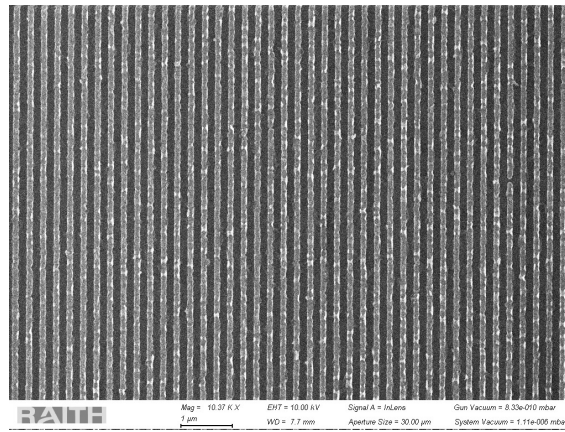
La Figura 45 recoge las imágenes de la primera muestra, una vez fabricada, donde se puede comprobar que el proceso de fabricación ha conseguido proporcionar unos valores de  $D = 258,7$  nm (Figura 45a) y  $w_{in} = 86,6$  nm (Figura 45b), muy cercanos a las especificaciones.



(a) Fotografía a escala nanométrica de la primera muestra. Los cursores indican el tamaño obtenido para el periodo  $D$ .



(b) Fotografía a escala nanométrica de la primera muestra. Los cursores indican el tamaño obtenido para el ancho  $w_{in}$ .



(c) Fotografía a escala micrométrica de la primera muestra.

Figura 45: Fotografías de la primera muestra tras su fabricación.

## 4. Conclusiones

A lo largo de este Trabajo Final de Grado, se han llevado a cabo todas las fases del proceso de diseño de metasuperficies absorbentes en el infrarrojo cercano, partiendo desde las bases más teóricas para acabar finalmente realizando un diseño apto para fabricación.

Partiendo del equivalente circuital de una estructura con una configuración metal – dieléctrico – metal, se han estudiado las condiciones que debe cumplir para proporcionar absorción total. A partir del modelo de homogeneización de impedancia de superficie, se determina el valor que debe presentar la impedancia compleja de la capa metálica para conseguir adaptar la impedancia de la estructura a la del medio, consiguiendo así la reflexión nula deseada. Para modificar esta impedancia de la capa metálica, se han estudiado diversos patrones que permiten el control de las partes resistiva y reactiva, tanto para impedancias capacitivas como inductivas.

Una vez sentadas las bases teóricas, se ha llevado a cabo un proceso de diseño incremental para obtener un diseño de metasuperficie absorbente listo para ser fabricado. Se han propuesto tres modelos simplificados que han permitido progresar a un plano más realista, realizando así dos diseños basados en oro y en aluminio.

A continuación, se ha llevado a cabo un estudio de una serie de técnicas de reconfiguración aplicables a la estructura, seleccionando de entre ellas una basada en la configuración del índice de refracción de la capa conductora haciendo uso de ITO. Se ha realizado un diseño de una metasuperficie absorbente cuya respuesta es dependiente de un campo eléctrico externo, y se ha estudiado su comportamiento ante distintos voltajes.

Por último, se ha realizado un análisis de las técnicas de fabricación utilizadas para la producción del último de los diseños propuestos, basado en aluminio. Así, puede concluirse que se ha analizado y realizado todo el proceso de diseño y fabricación de metasuperficies que presentan absorción perfecta en el infrarrojo cercano.

## 5. Trabajo Futuro

Una vez realizada la fabricación de la muestra, el siguiente paso sería proceder a su caracterización. Para ello, se emplearía un instrumento denominado espectrómetro FTIR (*Fourier Transform Infrared*). Con este equipo, se envía una señal electromagnética a la muestra y se analiza la señal recibida, pudiendo determinar así la radiación reflejada, absorbida o transmitida. De esta forma, resulta posible caracterizar la metasuperficie absorbente fabricada, y verificar así su correcto funcionamiento. Para la caracterización de la muestra en particular, se requiere de un espectro amplio de medida. El espectrómetro FTIR del NTC es capaz de medir en un rango espectral de  $0,25 \mu\text{m}$  a  $200 \mu\text{m}$  [24], por lo que resulta idóneo para la caracterización.



## Referencias

- [1] Edmund Optics. (2023). “The Correct Material for Infrared Applications.” URL: <https://www.edmundoptics.es/knowledge-center/application-notes/optics/the-correct-material-for-infrared-applications/>
- [2] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats et al., “Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction,” Science, vol. 334, n.º 6054, págs. 333-337, 2011. DOI: 10.1126/science.1210713.
- [3] X. Wang, “Metasurface-impedance engineering for advanced wave transformations,” Tesis doct., Aalto University. Department of Electronics y Nanoengineering, 2020.
- [4] S. B. Glybovski, S. A. Tretyakov, P. A. Belov y C. R. Simovski, “Metasurfaces: From Microwaves to Visible,” Physics Reports, vol. 634, págs. 1-72, 2016. DOI: 10.1016/j.physrep.2016.04.004.
- [5] C. Simovski y S. Tretyakov, An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics, 1.ª ed. Cambridge University Press, 2020.
- [6] R. Alaei, M. Albooyeh y C. Rockstuhl, “Theory of metasurface based perfect absorbers,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 50, pág. 503 002, dic. de 2017. DOI: 10.1088/1361-6463/aa94a8.
- [7] G. Yoon, S. So, M. Kim, J. Mun, R. Ma y J. Rho, “Electrically tunable metasurface perfect absorber for infrared frequencies,” Nano Convergence, vol. 4, dic. de 2017. DOI: 10.1186/s40580-017-0131-0.
- [8] Naciones Unidas. (2015). “Objetivos de Desarrollo Sostenible.” URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [9] A. D. Khan, A. D. Khan, S. D. Khan y M. Noman, “Light absorption enhancement in tri-layered composite metasurface absorber for solar cell applications,” Optical Materials, vol. 84, págs. 195-198, 2018, ISSN: 0925-3467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.07.009>.

- [10] D. Wu, Y. Meng y C. Liu, “Design of Transparent Metasurfaces Based on Asymmetric Nanostructures for Directional and Selective Absorption,” Materials, vol. 13, n.º 17, 2020, ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma13173751.
- [11] X.-c. Wang, A. Díaz-Rubio, A. Sneek et al., “Systematic Design of Printable Metasurfaces: Validation Through Reverse-Offset Printed Millimeter-Wave Absorbers,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, n.º 3, págs. 1340-1351, 2018. DOI: 10.1109/TAP.2017.2783324.
- [12] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4.<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [13] A. M. Shaltout, V. M. Shalaev y M. L. Brongersma, “Spatiotemporal Light Control with Active Metasurfaces,” Science, vol. 364, n.º 6441, eaat3100, 2019. DOI: 10.1126/science.aat3100.
- [14] E. Arbabi, A. Arbabi, S. M. Kamali, Y. Horie, S. Han y A. Faraon, “MEMS-tunable dielectric metasurface lens,” Nature Communications, vol. 9, n.º 1, pág. 812, 2018. DOI: 10.1038/s41467-018-03155-6.
- [15] J.-Y. Ou, E. Plum, L. Jiang y N. I. Zheludev, “Reconfigurable Photonic Metamaterials,” Nano Letters, vol. 11, n.º 5, págs. 2142-2144, 2011. DOI: 10.1021/nl200791r.
- [16] A. L. Holsteen, S. Raza, P. Fan, P. G. Kik y M. L. Brongersma, “Purcell effect for active tuning of light scattering from semiconductor optical antennas,” Science, vol. 358, n.º 6369, págs. 1407-1410, 2017. DOI: 10.1126/science.aao5371.
- [17] A. Komar, A. M. Shaltout, S. M. Kamali, E. Arbabi, A. Arbabi y A. Faraon, “Dynamic Beam Switching by Liquid Crystal Tunable Dielectric Metasurfaces,” ACS Photonics, vol. 5, n.º 5, págs. 1742-1748, 2018. DOI: 10.1021/acsp Photonics.7b01343.
- [18] A. Komar, A. M. Shaltout, X. Ni, A. B. Khanikaev y A. Faraon, “Electrically tunable all-dielectric optical metasurfaces based on liquid crystals,” Applied Physics Letters, vol. 110, n.º 7, pág. 071109, 2017. DOI: 10.1063/1.4976504.

- [19] L. Li, S. Chen, J. Zhang et al., “Electromagnetic Reprogrammable Coding Metasurface Holograms,” Nature Communications, vol. 8, n.º 1, pág. 197, 2017. DOI: 10.1038/s41467-017-00164-9.
- [20] B. Gholipour, J. Zhang, K. F. MacDonald, D. W. Hewak y N. I. Zheludev, “An All-Optical, Non-Volatile, Bidirectional, Phase-Change Meta-Switch,” Advanced Materials, vol. 25, n.º 21, págs. 3050-3054, 2013. DOI: 10.1002/adma.201300588.
- [21] M. Abb, P. Albella, J. Aizpurua y O. L. Muskens, “All-Optical Control of a Single Plasmonic Nanoantenna-ITO Hybrid,” Nano Letters, vol. 11, n.º 6, págs. 2457-2463, 2011. DOI: 10.1021/nl200901w.
- [22] J. Park, J. Kang, X. Liu y M. Brongersma, “Electrically Tunable Epsilon-Near-Zero (ENZ) Metafilm Absorbers,” Scientific Reports, vol. 5, pág. 15 754, nov. de 2015. DOI: 10.1038/srep15754.
- [23] A. Forouzmand, M. M. Salary, G. K. Shirmanesh, R. Sokhoyan, H. A. Atwater y H. Mosallaei, “Tunable all-dielectric metasurface for phase modulation of the reflected and transmitted light via permittivity tuning of indium tin oxide,” Nanophotonics, vol. 8, n.º 3, págs. 415-427, 2019. DOI: 10.1515/nanoph-2018-0176.
- [24] Nanophotonics Technology Center. (2023). “FTIR Equipment.” URL: <https://ntc.webs.upv.es/ftir/>