

# Impacto de Materiales Dieléctricos en la Respuesta en Frecuencia de Superficies Selectivas Modelado Computacional

A. D. Morales Vite<sup>1</sup>, G. Hilario-Perez<sup>1</sup>, P. Córdova Morales<sup>1</sup>, L. T. Zúñiga Vasquez<sup>1</sup>, A. A. Duran-Ledezma<sup>2</sup>, J. D. Garcia-Aguilar<sup>3</sup>, D. Valdez-Pérez<sup>1</sup>, Lugo-Hernández E.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME-Zac, UPALM, Edif. Z-4 3er Piso, CP 07738, CDMX, México.

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, SEPI, ESIME-Tic., Av. Ticomán No. 600, San José Ticomán, 07340, México City, México.

<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos No 16 "Hidalgo", Actopan – Pachuca, San Agustín Tlaxiaca, Hgo.

<sup>4</sup>Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Barcelona, España  
amoralesv1704@alumno.ipn.mx, ghilariop1300@alumno.ipn.mx, pcordovam1800@alumno.ipn.mx, lzunigav1700@alumno.ipn.mx, aduran1@ipn.mx, dvaldez@ipn.mx, eduardo.telematica@upc.edu

URL ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4731-0694>

**Resumen**— El constante crecimiento de la industria de las telecomunicaciones está demandando dispositivos capaces de operar en diferentes bandas de frecuencia, como, por ejemplo, aquellos para el filtrado de ondas electromagnéticas. La tecnología emergente de Superficies Selectivas de Frecuencia (FSS, por sus siglas en inglés) es una excelente opción para lograr dichos dispositivos. El rendimiento de las FSS está determinado por propiedades geométricas como el tamaño, la periodicidad, el grosor y las propiedades eléctricas además de la sensibilidad al ángulo de incidencia. En este trabajo, hemos utilizado modelado computacional para estudiar cómo diferentes dieléctricos afectan su respuesta eléctrica. Obtuvimos los siguientes resultados. Los valores  $S(2,1)$  y sus correspondientes frecuencias de resonancia son: PDMS -38 dB a 69 GHz, SiO<sub>2</sub> -52 dB a 61 GHz y ROGERS 5880 -52 dB a 71 GHz.

**Palabras Clave** — dieléctricos, filtro electromagnético, GHz, modelado computacional, Superficies Selectivas en Frecuencia.

**Abstract**- The constant growth of the telecommunications industry is demanding devices capable of operating in different frequency bands, for instance, those for the filtering of electromagnetic waves. The emerging technology of Frequency Selective Surfaces (FSS) is an excellent option to achieve such devices. The performance of FSS is governed by the geometric properties such as size, periodicity, thickness, electrical properties and also the sensitivity to the angle of incidence. In this work, we have used computational modeling to study how different dielectrics affect their electrical response. We obtained the next results. The  $S(2,1)$  values and their corresponding resonance frequencies are PDMS -38 dB at 69 GHz, SiO<sub>2</sub> -52 dB at 61 GHz and ROGERS 5880 -52 dB at 71 GHz.

**Keywords** — dielectrics, electromagnetic filter, GHz, computational modeling, Frequency Selective Surfaces.

## I. INTRODUCCIÓN

Las superficies selectivas en frecuencias (SSF) prometen mejoras en aplicaciones para los ámbitos de seguridad, salud pública, biomedicina, defensa y

telecomunicaciones [1,2]. Sin embargo, estos dispositivos presentan problemáticas y desafíos que la comunidad científica está abordando y se están desarrollando dispositivos cada vez más sofisticados y con características particulares para que presenten un buen desempeño, por ejemplo, se han estado modelando con distintos materiales. Por ello, el modelado de esta tecnología es fundamental para determinar su comportamiento en el mundo real. Un factor clave es tener un recuento rápido y preciso para visualizar su respuesta. Y este modelado de diseño debería llevarse a cabo mucho antes de que exista un prototipo real.

Una superficie periódica es básicamente un conjunto de elementos dispuestos en una matriz infinita unidimensional o bidimensional [1, 2]. Puede decirse que una superficie periódica en el ámbito de las SSF, es una superficie que exhibe un patrón o geometrías repetitivas en su estructura, que se extienden de manera regular en una o mas direcciones espaciales, lo que genera una simetría regular. La naturaleza periódica de las estructuras SSF permite una enorme simplificación para su análisis electromagnético computacional, ya que podemos restringir a un solo periodo de la geometría de la estructura (celda unitaria) al aplicar las condiciones de contorno [15].

Una de las operaciones mas comunes en las redes, tanto en rangos de microondas como ópticos, es el filtrado espectral. Para las ondas electromagnéticas que se propagan en medios homogéneos, dicho filtrado lo pueden proporcionar las SSF que tienen propiedades de reflexión o transmisión [3,4,6,12].

Las SSF, son estructuras periódicas bidimensionales que tienen elementos de matriz metálica plana (en los que se pueden considerar parches o aperturas) sobre un sustrato dieléctrico (véase Figura 1), que exhiben transmisión y reflexión a frecuencias en las que presentan una resonancia. Dependiendo del diseño utilizado para la creación de la matriz, una onda plana entrante u onda electromagnética será transmitida o reflejada, total o parcialmente.

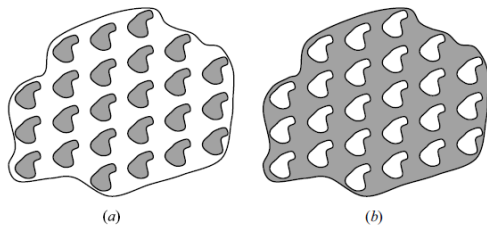


Figura 1. Ejemplo de estructuras de matrices SSF de elementos metálicos tipo parche (a) y de apertura (b). [15]

En la mayoría de los casos en los que se busca un comportamiento resonante, las SSF se implementan como estructuras periódicas de parches metálicos o aberturas sobre una lamina metálica. La correcta elección de una forma de parche/abertura, sus tamaños y posiblemente un material de sustrato es la parte más importante en el diseño [2,15].

Los elementos para las SSF se han clasificado en cuatro tipos básicos, como se ilustran en la Figura 2. El grupo 1 (Elementos conectados al centro o polos N, como dipolo, tripolo, espiral cuadrada, cruces de Jerusalén), el grupo 2 (elementos tipo bucle, como bucles circulares, cuadrados y hexagonales), el grupo 3 (interiores sólidos o formas de parche de diferentes formas) y el grupo 4 (combinaciones de todas las figuras anteriores). Según la aplicación, se hace la elección de un elemento de cualquiera de estos grupos o realizando combinaciones entre ellos, se ha analizado que elegir elementos del grupo 2 (tipo bucle) incrementa el ancho de banda de operación [2,6-8,15].

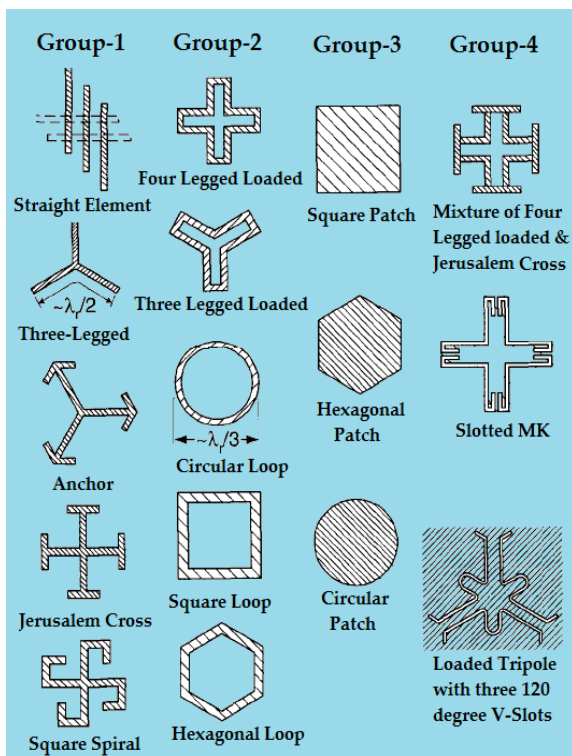


Figura 2. Clasificación y formas típicas de los elementos para SSF [2,15].

Las FSS son actualmente un área activa de investigación debido a su capacidad para manipular las ondas electromagnéticas además de sus características (control en la propagación de ondas, aislamiento y absorción selectiva) sin precedentes. Estos dispositivos pueden actuar como filtros, es decir, una determinada banda de frecuencia se transmite y otras se reflejan. Las aplicaciones para estos filtros son variadas, por ejemplo, en comunicaciones sistemas de radar y detección para variedad de situaciones (por ejemplo, en aeronaves para conflictos bélicos) [2,4,7,9-11,13,14].

#### A. Materiales para el diseño de SSF

Los materiales dieléctricos y los metales son fundamentales en el diseño y fabricación de SSF. Ya que, desempeñan un papel crucial en la modificación de la resonancia de la estructura y en la alteración de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (OEM) en diferentes frecuencias. La interacción de la OEM con estos materiales depende de sus propiedades como la permitividad ( $\epsilon_r$ ) y permeabilidad. En este proceso la OEM puede ser absorbida por algunos electrones o moléculas del material, lo que genera pérdidas de energía que afectan la velocidad de propagación a través de la estructura. Por ello, los dieléctricos son elementos esenciales para optimizar el comportamiento de las SSF, permitiendo el control preciso de las frecuencias y la eficiencia de las ondas electromagnéticas [10,11].

## II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

Una superficie selectiva en frecuencia es un tipo de estructura diseñada a partir de diferentes materiales de forma periódica. Podemos tomar una celda unitaria para aproximar su comportamiento general. Algo que se lleva mencionando en la literatura es que esta estructura debe ser más pequeña que la longitud de onda con la que se plantea que interactúe (aproximadamente,  $\lambda/4$ ). Nuestra celda unitaria se puede ver en la Figura 3.

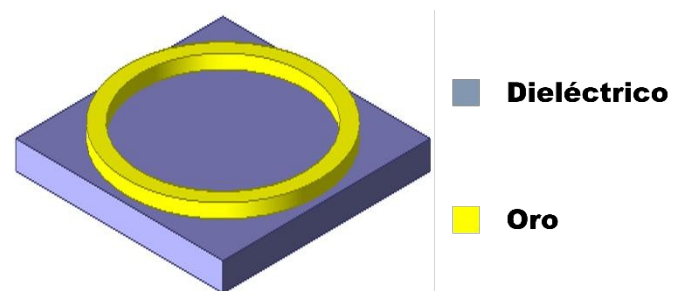


Figura 3. Representación gráfica de la celda unitaria propuesta en este trabajo para analizar el comportamiento de la SSF, donde el color azul corresponde al dieléctrico y el color amarillo a la geometría tipo anillo de oro.

Nuestro diseño de SSF hará uso de una geometría del grupo 2, un tipo bucle en forma de anillo utilizando como material el oro y como dieléctrico se ha hecho la selección de 3 sustratos fundamentales debido a que son capaces de operar en altas frecuencias. Los materiales son: 1) Polidimetilsiloxano

(PDMS), 2) Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y, 3) ROGERS RT/DUROID 5880. Los parámetros de diseño se pueden observar en la Figura 4.

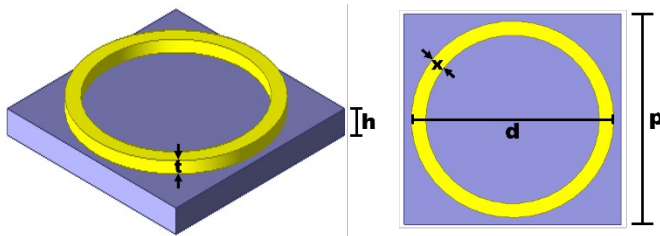


Figura 4. Parámetros de diseño para la SSF como los espesores (h y t), la periodicidad (p) y el diámetro del anillo(d).

Los valores de nuestras entradas o parámetros de diseño se muestran en la Tabla 1. En la Figura 4. se muestran los parámetros de la celda unitaria. Donde t corresponde al espesor del anillo, h es el espesor del dieléctrico, x es el ancho del anillo, d es el diámetro del anillo y p la periodicidad de la celda unitaria, todas las unidades de estos parámetros están en mm

Tabla 1. Parametros de diseño de la SSF y sus dimensiones en milímetros

Variable	Valor [mm]
t	0.005
h	0.1
x	0.1
d	0.7
p	1.5

Como se mencionó anteriormente se utilizaron tres diferentes dieléctricos en los que se destacan su permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) y su tangente de pérdidas ( $\gamma$ ), se pueden observar sus valores en la Tabla 2. Con respecto a la estructura sobre el dieléctrico hay una película delgada de oro en forma de anillo con una conductividad eléctrica  $\sigma = 4.1 \times 10^7$  S/m.

Tabla 2.- Valores de permitividad relativa y tangente de pérdida de cada tipo de dieléctrico utilizado para el modelado

Dieléctrico	Permitividad relativa ( $\epsilon_r$ )	Tangente de pérdida ( $\gamma$ )
(PDMS)	2.35	0.03
(SiO <sub>2</sub> )	4	0.0001
ROGERS RT/DUROID 5880	2.2	0.0009

Proponemos realizar el modelado computacional con una incidencia directa (sin usar ángulos de incidencia, la onda electromagnética atraviesa a la SSF de arriba hacia abajo) y tratar de observar el comportamiento de la SSF manteniendo

los parámetros de diseño y la geometría propuesta hecha de oro, por lo tanto, solo se harán cambios para el sustrato iniciando con el polímero PDMS, cambiando al ROGERS RT/DUROID 5880 y finalmente el SiO<sub>2</sub>. Como se analizó el uso del metal (oro y los dieléctricos que funcionan de manera óptima en altas frecuencias, se propone el análisis de la SSF desde 20 hasta 100 GHz, se espera obtener un amplio ancho de banda de operación. Para el estudio de la SSF se propone graficar los parámetros de dispersión (Parámetros S), en este caso la reflexión S(1,1) y la transmisión S(2,1). El objetivo es observar en qué valor de frecuencia nuestro dispositivo presenta una resonancia importante. Por ello, se obtendrá de manera individual cada resultado y tratar de comprender cómo el cambio en el dieléctrico afecta el rendimiento y eficiencia de la SSF en cuanto a la selectividad de frecuencias.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como primer punto, se analiza la celda unitaria como en la figura 5. donde el dieléctrico es el PDMS y la geometría tipo anillo modelada en oro. Se obtienen los parámetros de dispersión como se muestra en la Figura 5.

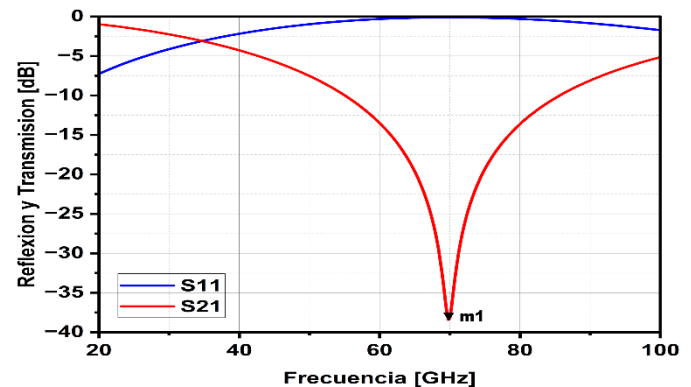


Figura 5. Reflexión y transmisión de la SSF utilizando como dieléctrico el polímero polidimetilsiloxano (PDMS) y la geometría tipo anillo

Podemos observar la frecuencia de resonancia si observamos el parámetro S(2,1) la curva roja. Vemos que se presenta aproximadamente en donde se muestra en marker 1 a 69.84 GHz con una amplitud de -38.41 dB y presenta una buena selectividad, ya que nuestro dispositivo al ser una SSF, actúa como un filtro espectral capaz de atenuar la señal u onda electromagnética, específicamente diseñado para altas frecuencias.

A continuación, manteniendo los mismos parámetros de diseño como las dimensiones de la celda unitaria y la misma geometría para formar la SSF, se procede a cambiar de material dieléctrico, para esto se utiliza SiO<sub>2</sub> y se procede a realizar el modelado. La Figura 6 muestra los resultados obtenidos.

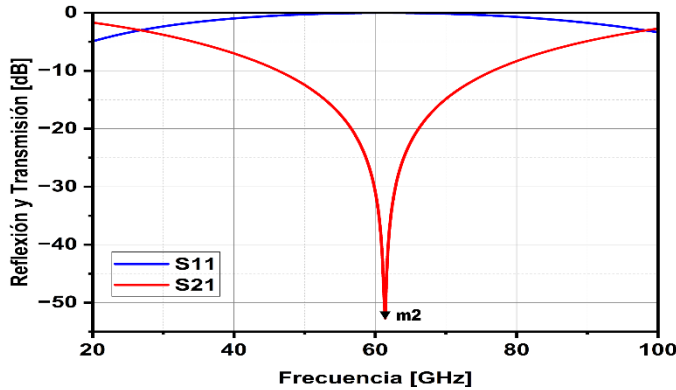


Figura 6. Transmisión y reflexiones correspondientes al cambio de dieléctrico, utilizando dióxido de silicio manteniendo la misma SSF.

Con este cambio ahora se presenta un pico de resonancia denotado por el marcador 2 en 61.38 GHz, el cual es menor en términos de potencia en comparación con el PDMS, con el dióxido de silicio se presenta un corrimiento en frecuencia hacia valores menores. Sin embargo, la atenuación en frecuencia ahora se ha incrementado ya que la resonancia llega hasta -52.69 dB por lo que las señales en ese punto se atenúan o discriminan de una manera muy considerable y efectiva. Finalmente, utilizando el ROGERS RT/DUROID 5880 para la SSF, de igual manera manteniendo las dimensiones y geometría de diseño, se realiza su análisis y respuesta mostrada como se observa en la Figura 7.

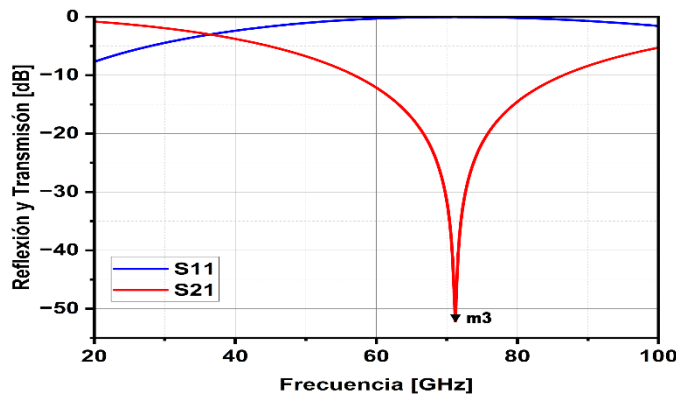


Figura 7. Parámetros de dispersión (Transmisión y reflexión) de la SSF utilizando como sustrato dieléctrico el material ROGERS RT/DUROID 5880

En este caso, se presenta un pico de resonancia mostrado por el marker 3 en 71.2 GHz en -52.15 dB, un comportamiento algo similar al utilizar dióxido de silicio, pero presentando un pequeño corrimiento en frecuencia hacia valores positivos y se ve una mínima atenuación en comparación a la anterior conformada por el dióxido de silicio. Sin embargo, se puede comprobar que el filtro sigue funcionando de manera adecuada y evidentemente para la atenuación de frecuencias altas en GHz.

En la Tabla 3, se muestra una síntesis de los tres dieléctricos para un diseño de SSF basada en un anillo. El realizar

comparaciones nos ayuda a determinar los cambios en la respuesta presentados con modificaciones controladas y como afectan en el rendimiento para filtrar o seleccionar frecuencias GHz.

Tabla 3. Comparación de los picos de resonancia que presenta cada celda unitaria al realizar un cambio de material del dielectrico mostrando sus valores en frecuencia y en transmisión.

Resultados por cada tipo de dieléctrico		
Dieléctrico	Frecuencia (GHz)	Transmisión S21 (dB)
Polidimetilsiloxano (PDMS)	69.84	-38.41
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	61.38	-52.69
ROGERS RT/DUROID 5880	71.2	-52.15

Para una mejor visualización de los resultados, se presenta la Figura 8, en la que se muestran las resonancias de la SSF por cada tipo de dieléctrico utilizado.

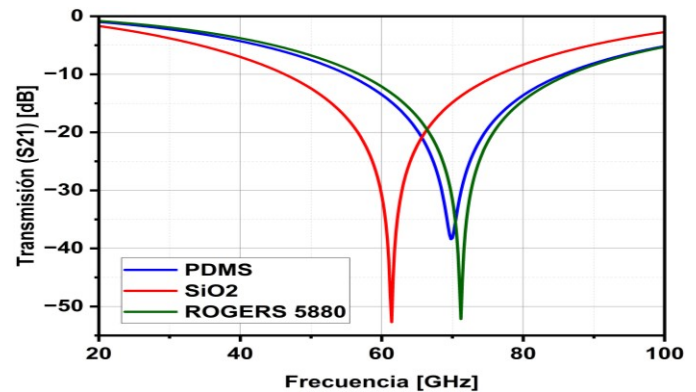


Figura 8. comparación de resonancias presentes en modo de transmisión para la superficie selectiva con geometría tipo anillo, la resonancia en color azul corresponde a la celda unitaria con dieléctrico de PDMS, la de color rojo a la celda unitaria con dióxido de silicio y la de color verde a la SSF con dieléctrico usando ROGERS RT/DUROID 5880.

Podemos observar que el PDMS presenta una atenuación en términos de potencia en comparación del SiO<sub>2</sub> y el ROGERS, además para cada dieléctrico hay un corrimiento en frecuencia pero manteniendo la selección y discriminación de frecuencias por lo que el filtro presenta un buen rendimiento en este rango de frecuencias GHz.

#### IV. CONCLUSIONES

El modelado computacional es una herramienta de suma importancia para predecir el comportamiento de un dispositivo en la vida real. Las SSF son un área de investigación en constante desarrollo, especialmente para aplicaciones en altas frecuencias. Por lo tanto, la elección adecuada de los materiales

para su elaboración es esencial, dependiendo del desempeño y rango de operación del dispositivo. En este estudio se realizó un análisis de una geometría específica de tipo bucle en forma de anillo de oro, utilizando tres distintos materiales como sustrato dieléctrico. Los resultados obtenidos muestran que aunque estos materiales están bien documentados en la literatura como opciones eficientes, presentan diferencias notables en cuanto a las resonancias presentes en la SSF, tales como desplazamientos en frecuencia y atenuación de la señal y nos permite considerar que fenómenos evitar para el diseño de filtros electromagnéticos. Esto resalta la importancia de parámetros como la permitividad y la tangente de pérdidas, los cuales son fundamentales ya que nos permitirán determinar si algún dieléctrico presentara pérdidas significativas, atenuación de la señal y si el dispositivo mantendrá estabilidad térmica en su funcionamiento.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONHACYT (Número 1223851), SIP-IPN Número de proyecto 20250096 y 20250035 por el apoyo brindado.

#### REFERENCIAS

- [1] Tian, J., & Cao, W. (2024). Reconfigurable flexible metasurfaces: from fundamentals towards biomedical applications. *Photonix*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s43074-023-00116-1>
- [2] Munk, B. A. (2000). *Frequency selective surfaces: Theory and design*. John Wiley & Sons.
- [3] Chen, Z., Li, Y., Li, Z., Guo, C., Li, Z., Bing, P., Wang, S., Xu, J., Zhang, H., & Yao, J. (2025). Multi-stopband filter based on frequency selective surface. *Optics Communications*, 574(131064), 131064. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131064>
- [4] Chen, J., Zhang, Y., Zhang, H., Ji, H., Guan, F., Wang, F., & Xiao, H. (2022). Stretchable tunable frequency selective fabrics and their electromagnetic response mechanism. *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, 161(107065), 107065. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107065>
- [5] Hasan, M. S., Islam, M. T., Samsuzzaman, M., Alorifi, F., Shamsan, Z. A., Almuhan, K., Rahim, S. K. A., & Soliman, M. S. (2024). Tunable asymmetric square split ring resonator based triple band metamaterial absorber for wireless communication system. *Optical Materials*, 147(114746), 114746. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114746>
- [6] Liang, J., Yang, H., Fu, Y., Zhou, X., Zhao, R., & Jin, J. (2024). A high Q factor sensor to measure the complex permittivity and effective permittivity based on a band stop frequency-selective surface. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 237(115279), 115279. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115279>
- [7] Shao, L., Zhang, Y., Chen, W., & He, J. (2024). Study of flexible metasurface with gold rod resonators on ployimide substrate in terahertz waveband. *Optics Communications*, 550(129951), 129951. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2023.129951>
- [8] Zheludev, N. I. (2010). The road ahead for metamaterials. *Science (New York, N.Y.)*, 328(5978), 582–583. <https://doi.org/10.1126/science.1186756>
- [9] Jaiswal, R. K., Pandit, N., & Pathak, N. P. (2022). Metamaterial-FSS for THz applications. En *Metamaterials Science and Technology* (pp. 1–23). Springer Nature Singapore.
- [10] Zhu, W., & Liu, A.-Q. (2022). *Metasurfaces: Towards tunable and reconfigurable meta-devices* (1a ed.). Springer.
- [11] Hu, J., Bandyopadhyay, S., Liu, Y.-H., & Shao, L.-Y. (2021). A review on metasurface: From principle to smart metadevices. *Frontiers in physics*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.586087>
- [12] Glybovski, S. B., Tretyakov, S. A., Belov, P. A., Kivshar, Y. S., & Simovski, C. R. (2016). Metasurfaces: From microwaves to visible. *Physics Reports*, 634, 1–72. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.04.004>
- [13] Kapoor, A., Mishra, R., & Kumar, P. (2022). Frequency selective surfaces as spatial filters: Fundamentals, analysis and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4263–4293. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.046>
- [14] Afzal, W., Baig, M. Z., Ebrahimi, A., Robel, M. R., Rana, M. T. A., & Rowe, W. (2024). Frequency selective surfaces: Design, analysis, and applications. *Telecom*, 5(4), 1102–1128. <https://doi.org/10.3390/telecom5040056>
- [15] Celozzi, S., Araneo, R., Burghignoli, P., & Lovat, G. (2022). *Electromagnetic shielding: Theory and applications*. Wiley.