



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”



UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DE LA LUZ Y LA MATERIA

**Simulación de una metalente TIR para concentración
de luz.**

T E S I S

para obtener el grado de Maestro en Ciencias

PRESENTA:

Edgar Dávila Arévalo

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Iván Moreno Hernández, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz
y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Codirector de tesis:

Dr. José Carlos Basilio Ortiz, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz
y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Zacatecas, Zacatecas,

marzo 2024

Declaración de autenticidad

Manifiesto que el presente trabajo de tesis de Maestría es original y no ha sido presentado total o parcialmente para obtener otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo dentro de la Maestría en Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia y no contiene plagio o copia de ninguna naturaleza, dando el crédito correspondiente a otros documentos de investigación o similares tales como tesis, artículos o publicaciones de otros grupos o personas, reportando de manera puntual y adecuada las respectivas fuentes bibliográficas. Asimismo, declaro que soy plenamente consciente de que el incumplimiento de la presente declaración de autenticidad, dará lugar a sanciones universitarias y legales conforme a la normativa vigente.



Edgar Dávila Arévalo

Zacatecas, Zac., marzo 2024

Comité de seguimiento y evaluación

SINODALES:

Dr. Jesús Madrigal Melchor

Dr. Jaime Raúl Suarez López

Dr. Carlos Guerrero Méndez

Dr. Ulises Raúl Silva Avalos

COMITÉ DE SEGUIMIENTO

Dr. Jesús Madrigal Melchor

Dr. Jaime Raúl Suárez López

Dedicatoria

La vida me ha dado muchas vueltas y a elegir distintos caminos, pero, sin embargo, me ha regresado a lo que es mi pasión, que es el estudio de la física. En estos momentos, de quien más he recibido apoyo es de mi familia, mi mujer y mis hijos, pues a pesar de tantos inoportunos, me han apoyado para terminar con bien mi estudio.

Edgar Dávila Arévato

Agradecimientos

Nunca puede faltar el agradecimiento a esa persona que siempre ha estado ahí en las buenas y en las malas, que es mi madre. Ella me ha acompañado en toda mi vida académica, dándome ánimos y ayuda económica en todo momento, pero más que nada, me ha dado valores y principios.

También quiero agradecer a mis asesores, Dr. Iván y el Dr. Carlos, que siempre han estado ahí en todo momento, sin el apoyo de ellos, no sé qué hubiera pasado, ya que ellos han estado en todo momento ayudándome y asesorándome cada que flaqueaba en mi camino académico.

También quiero agradecer a todo el cuerpo académico de la institución que me formó, pues ellos fueron los cimientos en los que fueron fundados mis conocimientos.

No está de más, agradecer a muchos de mis amigos, que siempre creyeron en mí, dentro de los que están Carito, Javier, “hermano Gallo”...

Dar un gran agradecimiento a todo el pueblo de México, que, a través del pago de sus impuestos y la administración de los recursos del CONACYT, han hecho que yo pudiera obtener el grado de maestría.

“Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mí quiero agradecer por creer en mí, quiero agradecerme por hacer todo este trabajo duro, quiero agradecerme por no tener días libres. Quiero agradecerme por nunca renunciar, quiero agradecerme por ser siempre alguien que da y tratar de dar más de lo que recibo. Quiero agradecerme por tratar de hacer más bien que mal. Quiero agradecerme por ser yo en todo momento. Edgar Dávila, eres todo un ...”

Resumen

En la actualidad, las metalentes juegan un papel muy importante en el desarrollo de las nuevas y futuras tecnologías, debido a la versatilidad que tiene por su diminuto tamaño en comparación con los sistemas ópticos convencionales. Es por ello, que muchas investigaciones de frontera en óptica se han enfocado en el estudio y desarrollo de metasuperficies, con especial énfasis en las metalentes. Las investigaciones actuales se han centrado en el uso de metalentes para la formación de imágenes. Sin embargo, la investigación en esta tesis se centra en la aplicación de las metalentes a la óptica de concentración de luz. En esta tesis trabajamos, mediante el método de diferencias finitas en dominio de tiempo (FDTD, por sus siglas en inglés), la simulación óptica de una metalente de reflexión total interna (TIR, por sus siglas en inglés) para concentrar la luz en un detector. La metalente TIR simulada es un dispositivo óptico que integra una metalente que funciona en modo transmisión y un meta-espejo en anillo que refleja la luz y después de una reflexión total interna esta luz incide sobre un detector. Los resultados obtenidos por medio de simulaciones numéricas, muestran que es factible el uso de estos dispositivos ópticos para coleccionar y concentrar la luz en un detector. La principal ventaja de la metalente TIR es que es más compacta que una lente TIR tradicional.

Abstract

Currently, the metalens are very important in the development of new and future technologies, due to the versatility it has due to its tiny size compared to conventional optical systems. For this reason, that many frontier investigations in optics are focused on the study and development of metasurfaces, with special emphasis on metalens. The actual researches are focused on the use of metalens for imaging. However, this thesis is study on the application and use of metalens for light concentration. In this thesis we used of the finite difference method in time domain (FDTD) for the numerical simulation of a total internal reflection (TIR) metalens to concentrate light in a detector. The simulation's TIR metalens is an optical device make integrates a metalens in transmission mode with ring metamirror that reflects light for after have to do total internal reflection, we have light on a detector. We obtained results by numerical simulations (FDTD), show us that it is feasible to use these thin optical devices to collect and concentrate light in a focus point. The main advantage of the TIR lens is that it is more compact better than a traditional TIR lens.

Índice General

Declaratoria de autenticidad	II
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VII
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XVIII
Índice de anexos	XIV
Introducción.	1
1.1. Breve historia de las lentes.....	1
1.2. Antecedentes.	2
1.3. Planteamiento del problema y motivación.	3
1.4. Hipótesis.....	4
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos particulares.....	5
Marco Teórico	6
2.1. Óptica Clásica.	6
2.1.1. Concentradores de luz.....	6
2.1.2. Lentes tradicionales.	8
2.2. Metalentes.....	11
2.2.1. Óptica plana.	11
2.2.2. Meta-óptica.....	15
2.2.3. Metasuperficies.	17
2.2.4. Características de las metalentes.	19

2.3.	Reflexión total Interna (TIR).....	20
2.4.	Perfil de fase.....	22
2.5.	Celda unitaria.	25
2.6.	Simulaciones FDTD.	26
2.6.1.	¿Qué ecuaciones resuelve el método FDTD?.....	27
2.6.2.	Elección de la malla en el método FDTD.	28
2.7.	Simulaciones empleando un software de FDTD.	30
2.8.	El futuro de las metalentes.....	31
2.8.1.	Próximas aplicaciones de las metalentes:.....	32
	Resultados.....	34
3.1.	Metodología de la simulación.....	34
3.2.	Diseño y simulación de la celda unitaria.	36
3.2.1.	Definición geométrica del meta-átomo.....	36
3.2.2.	Condiciones iniciales de la celda unitaria.....	37
3.2.3.	Barrido de simulación de altura y radio del nano-elemento.....	39
3.2.4.	Simulación de altura elegida.....	42
3.3.	Diseño y simulación de la metalente central.....	44
3.3.1.	Comprobación de la de metalente.....	45
3.4.	Diseño y simulación del anillo de meta-espejo.....	50
3.4.1.	Celda unitaria de meta-espejo.....	50
3.4.2.	Geometría y especificaciones del meta-espejo.....	52
3.4.3.	Simulación del meta-espejo en anillo.	54
3.5.	Ensamble de la metalente TIR.....	59
3.5.1.	Configuración de metalente TIR.....	60
3.5.2.	Simulación de metalente TIR.....	62
	Conclusiones.....	66
	Bibliografía.....	68
	Anexos.....	70

Índice de Figuras.

Figura 2.1.- Imagen de una metalente dieléctrica con meta-átomos cilíndricos. Recuperado de Fuente https://www.notimerica.com/ tomada de la Universidad de Princeton.....	10
Figura 2.2.- Enfoque de luz por una metalente simple. El grosor d depende del sustrato y del tamaño de los meta-átomos que constituyen la metalente. Por simplicidad la imagen no muestra los meta-átomos.....	14
Figura 2.3.- Metasuperficies y metamateriales. Fuente: Libro Engineering Optics 2.0.	18
Figura 2.4. -Metasuperficie fabricada. Fotografía de una metalente simple y microscopio electrónico de barrido (SEM siglas en inglés) imagen de meta-átomos [10].	19
Figura 2.5.- Esquema de la refracción, ángulo crítico y Reflexión total interna en dos medios con distintos índices de refracción, donde $n_1 > n_2$	21
Figura 2.6. -Metalente con perfil de fase hiperbólico, enfocando la luz incidente en un punto focal.	24
Figura 2.7.- Celda unitaria, la cual muestra en gris la región correspondiente al sustrato y en azul el material del nano-cilindro (meta-átomo).	26
Figura 2.8.- Celda del mallado Yee.	29
Figura 3.1. -(a) Diagrama esquemático de una lente TIR clásica y (b) Diagrama esquemático de una metalente TIR. Imagen modificada[6].....	35
Figura 3.2.- Vista de 2D de la celda unitaria, constituida por un nano-cilindro y un sustrato.	37
Figura 3.3. -Viaje de la onda plana a través de la celda unitaria.	40
Figura 3.4.- Matriz de la fase con respecto a la altura hp y radio R	41
Figura 3.5.- Matriz de transmitancia normalizada tomando de variable altura hp y radios R	42
Figura 3.6.- Gráfica de fase vs radio vs fase en una altura definida de nanotubo...	43
Figura 3.7. -Gráfica de radio vs transmisión a una altura dada.	44
Figura 3.8.- Metalente central formada de nano-elementos cilíndricos de distintos radios R	45

Figura 3.9.- Intensidad de luz enfocada por la metalente central en el eje óptico Z.	46
Figura 3.10.- Gráfica de la intensidad de luz en el eje X, en el punto focal ($z = 0\mu m$) de la metalente central.	47
Figura 3.11.- Gráfica de la intensidad de luz en el eje Y, en el punto focal ($z = 0\mu m$) de la metalente central.	47
Figura 3.12.-Distribución espacial de la intensidad de luz del metalente central en el plano X-Z. en $y = 0$	48
Figura 3.13.-Intensidad de luz del metalente en el plano X-Y, en el punto focal....	48
Figura 3.14.- Simulación de corte transversal de la metalente mostrando el desvío del frente de onda plano.....	49
Figura 3.15.- QR de link del video de la simulación de la propagación de luz en la metalente central.....	50
Figura 3.16.- Geometría de la celda unitaria para meta-espejo sin el sustrato superior.	51
Figura 3.17.- Geometría final para simular celda unitaria de metaespejo.....	51
Figura 3.18. -Fase vs radio R de los nanotubos reflectores en metaespejo.....	52
Figura 3.19.- Vista superior de meta-espejo.....	53
Figura 3.20.- Estructura de meta-espejo en anillo.	54
Figura 3.21.- Vista lateral de meta-espejo en anillo.....	54
Figura 3.22.- Vista del meta-espejo dentro del sustrato, mostrando dirección de la fuente de luz (flecha rosa).	55
Figura 3.23.- Vista lateral de simulación de metalente, mostrando dirección de la fuente de luz.....	55
Figura 3.24.- Gráfica de la intensidad de luz en el meta-espejo en el eje Z, en el punto focal.....	56
Figura 3.25.- Gráfica de la intensidad de luz en el meta-espejo en el eje y, en el punto focal.....	57
Figura 3.26.- Patrón de intensidad de luz enfocada por el meta-espejo en el plano X- Z (en $y = 0$).	58
Figura 3.27.- Intensidad de luz del meta-espejo en el plano X-Y.....	59
Figura 3.28.- Esquema de simulación de metalente TIR.	60
Figura 3.29. -Esquema del trazado de rayos de la metalente TIR.....	61
Figura 3.30.- Esquema lateral de la Metalente TIR simulada.	62

Figura 3.31.- Gráfica de la intensidad de la luz enfocada por la metalente TIR a lo largo del eje Z.....63

Figura 3.32.- Intensidad de luz del metalente TIR en el plano X-Z.63

Figura 3.33.- Gráfica de la intensidad de luz en el eje y, en el punto focal producida por la metalente TIR.....64

Figura 3.34.- Intensidad de luz del metalente TIR en el plano x-y en el punto focal.65

Figura 3.35.- QR de link del video de la simulación de la propagación de luz en la metalente TIR.....65

Índice de Tablas.

Tabla 3.1.- Valores constantes de los parámetros de la simulación de celda unitaria.	38
Tabla 3.2.- Valores constantes de los parámetros de la simulación de celda unitaria.	39

Índice de Anexos

Anexo 1.- Requerimientos del sistema para simular con Lumerical.....	70
Anexo 2.- Código de programación para formación de metalente.....	74

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Breve historia de las lentes.

El registro del uso de las lentes y espejos, data desde el 1200 a.C. donde hay menciones donde ya se hacían éstos puliendo cobre. Después en la época de Platón, Pitágoras y demás filósofos, se hacen los primeros estudios sobre la naturaleza de la luz. Cerca del 300 a.C. Euclides enuncia la Ley de Reflexión de la Luz. Más tarde Claudio de Tolomeo en el 130 d.C. realizó experimentos donde registró los ángulos de refracción de la luz en distintos materiales. Y fue hasta el año 1621, que Snell enuncia la Ley de refracción [1].

En nuestra época, las lentes juegan un papel muy importante en nuestra vida cotidiana. Sus usos son variados, desde usar gafas correctivas de la vista, así como grandes telescopios en el espacio que nos ayudan a entender el universo. Es por ello que la importancia de nuevos estudios en la fabricación y mejoramiento de las lentes, puede generar un gran cambio en la humanidad.

En la actualidad, los avances en el descubrimiento y caracterización de nuevos materiales, han hecho que la ciencia y tecnología evolucione día a día. En óptica, los recientes descubrimientos han logrado que los dispositivos ópticos sean cada día más delgados y ligeros y con la llegada de las metalentes, las cosas mejorarían enormemente.

1.2. Antecedentes.

Un área de la óptica que está aportando nuevos descubrimientos al explorar los fenómenos que pasan con la luz en nuevos materiales es la metaóptica basada en metasuperficies. Las metasuperficies tienen propiedades ópticas que dependen de la frecuencia de la radiación electromagnética, los materiales y la geometría de los elementos que forman las metasuperficies [3]. Una de las aplicaciones más prometedoras de las metasuperficies son las metalentes, las cuales tienen propiedades ópticas interesantes y la facilidad de fabricación en masa [5].

Estudios recientes han mostrado la importancia que tiene en un futuro próximo el uso de las metalentes en los nuevos componentes miniaturizados. Por ser una tecnología muy reciente y en desarrollo, actualmente las técnicas de fabricación de las metalentes son muy complicadas y costosas. Por esta razón en el presente trabajo, se realiza un estudio mediante simulaciones computacionales de la propagación de la luz a través de metalentes, en específico a través de una metalente TIR.

Las lentes convencionales, son utilizadas ya sea para enfocar la luz o formar imágenes. Pero las lentes convencionales tienen limitaciones de tamaño, no son planas, y, además, si se quiere eliminar la aberración de una imagen, se deben usar muchas lentes, lo que hace que los dispositivos ópticos de alta resolución de imagen sean de un gran tamaño. Es aquí la importancia del estudio de las metalentes, en consecuencia, son planas y ultradelgadas. Además, el desempeño de las metalentes se puede determinar a partir del perfil de fase de su superficie, y así poder dirigir la luz como deseamos.

En el presente trabajo realizamos un diseño especial de una metalente TIR. La cual es una metalente compuesta, con aplicaciones en iluminación y concentración

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

de luz, que usa el conocido efecto de reflexión total interna para minimizar el tamaño de un dispositivo óptico concentrador de luz. Los cuales pueden tener un uso práctico inmediato, en la fabricación de un detector de radiación electromagnética miniaturizado.

En el siguiente trabajo, nos enfocaremos en explorar el potencial de las metasuperficies y metalentes como una solución innovadora en el campo de la óptica, en la cual se diseñará y simulará por medio del método de diferencias finitas en el dominio del tiempo una metalente compuesta para la concentración de luz, en la cual se empleará el efecto de reflexión total interna, para reducir el tamaño de un dispositivo óptico para la concentración de luz. Investigaremos su funcionamiento, propiedades y capacidades, así como su aplicación en la concentración de luz. Además, utilizaremos simulaciones computacionales para estudiar la propagación de la luz a través de metalentes, brindando una visión más detallada de su rendimiento y su viabilidad en dispositivos miniaturizados.

Mediante este estudio, esperamos contribuir al avance de la óptica moderna y proporcionar nuevas herramientas para el diseño y análisis de dispositivos ópticos compactos, eficientes y de alta resolución.

1.3. Planteamiento del problema y motivación.

La simulación óptica de una metalente simple representa una tarea intrincada que demanda la aplicación de métodos numéricos basados en la técnica de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, por sus siglas en inglés). Sin embargo, simular un sistema compuesto como una metalente de reflexión total interna (TIR) no es una tarea sencilla. Para lograrlo, es necesario modelar de manera simultánea una metalente, un meta-espejo y que, en la configuración del sistema, tengamos una

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

reflexión total interna dentro del mismo. Hasta la fecha, este enfoque no ha sido documentado en la literatura científica.

Por otro lado, las lentes TIR tradicionales son muy útiles en aplicaciones de iluminación y concentración de luz. Y las metalentes TIR ofrecen una alternativa moderna que promete hacer más compactos y ligeros los sistemas ópticos de concentración de luz.

La siguiente tesis, está apuntada a dar un enfoque de una primera utilidad al uso de metalentes en la óptica de concentradores y detectores de luz miniaturizados, mostrando un estudio que ayude a que se desarrolle un meta-concentrador de luz, para el desarrollo futuro de nano-sensores o nano-detectores, que ayuden a la miniaturización de aditamentos electrónicos. En los últimos años, hemos visto que el desarrollo tecnológico avanza rápidamente y en un futuro podría ser viable la construcción de la metalente TIR que simularemos. En consecuencia, nuestro objetivo es aportar a la investigación mediante un estudio que exponga de manera detallada las características y capacidades ópticas del sistema en cuestión.

1.4. Hipótesis.

La premisa de este trabajo es que una metalente TIR puede ser un buen concentrador de luz ultra compacto. Más, sin embargo, no se han reportado en la literatura estudios sobre el desempeño óptico de metalentes TIR. Nuestra hipótesis central es que se pueden realizar simulaciones, mediante el método de diferencias finitas en dominio de tiempo (FDTD, por sus siglas en ingles), con las cuales se determinará la distribución espacial de luz concentrada por una metalente TIR para su posible aplicación como concentrador de luz en un detector o receptor.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Diseñar y simular la simulación óptica de una metalente TIR mediante el método FDTD.

1.5.2. Objetivos particulares

- Estudiar los principios ópticos de las metalentes y los fundamentos de la óptica de iluminación y concentración de luz.
- Adquirir competencias en el manejo de un software especializado que emplee la técnica de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) para el análisis y simulación de sistemas fotónicos complejos, como los metalentes.
- Realizar la simulación óptica de una metalente simple en modo de transmisión.
- Realizar la simulación óptica de un meta-espejo en anillo en modo reflexión.
- Realizar la simulación óptica de una metalente TIR ensamblada con una metalente simple y un meta-espejo en anillo, ambos integrados en una placa delgada transparente.
- Obtener resultados de las simulaciones realizadas en particular los patrones espaciales de campo eléctrico (\vec{E}) irradiancia en el plano de detección.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Óptica Clásica.

2.1.1. Concentradores de luz.

Los concentradores de luz son sistemas ópticos diseñados para direccionar y enfocar la luz a un punto o región específica de manera eficiente. A lo largo de la historia se han hecho diseños que involucran de distintas geometrías y distintos materiales. Los usos para los concentradores de luz son variados. Dependiendo de su aplicación en la cual requiera, los materiales que se emplean pueden ser metales o dieléctricos y en todos éstos involucra su geometría.

Para un concentrador formado por un lente, se utilizan lentes de un material transparente y geometría específica, donde la luz pasa por el material y éste a su vez refracta los rayos de luz, direccionándolos a un foco o punto focal, donde concentra la luz. Este fenómeno de refracción se presenta, cuando la luz pasa de un material de una densidad específica a otra de mayor o menor densidad (índice de refracción).

Entre los concentradores de luz más comunes se encuentran aquellos basados en lentes y espejos. Los lentes son elementos ópticos transparentes con una superficie curva que permite la refracción de la luz a medida que pasa a través de ellos. Dependiendo de la geometría y el material del lente, así como del índice de refracción, se puede lograr un enfoque preciso de la luz hacia un punto focal. Estos concentradores basados en lentes son utilizados en numerosas aplicaciones, como

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

sistemas de iluminación focalizada, microscopía, sistemas de detección óptica, y tecnologías de imagen y comunicación.

Por otro lado, los concentradores basados en espejos aprovechan el fenómeno de reflexión de la luz para dirigir y enfocar los rayos luminosos. Los espejos, en particular los espejos parabólicos, son utilizados con frecuencia en concentradores solares, donde la luz solar incide en la superficie del espejo y se refleja hacia un punto focal, generando altas concentraciones de energía térmica. Estos concentradores solares tienen aplicaciones en la generación de energía solar, calefacción solar y sistemas de iluminación solar. Para poder concentrar la luz en un punto focal, se utiliza la geometría del espejo, donde el más común para concentrar la luz es la de un espejo parabólico, pues al incidir la luz en la superficie del espejo, es reflejada hacia el punto focal.

Además de las aplicaciones mencionadas, los concentradores de luz también desempeñan un papel crucial en la astronomía, permitiendo recopilar y enfocar la luz proveniente de fuentes celestes distantes. Los telescopios y otros instrumentos astronómicos utilizan concentradores de luz para mejorar la sensibilidad y resolución de las observaciones, permitiendo el estudio detallado de estrellas, planetas, galaxias y otros objetos astronómicos.

En el ámbito de la tecnología nanoscópica, los concentradores de luz se han convertido en herramientas indispensables. Al enfocar la luz en escalas nanométricas, se pueden realizar mediciones precisas, manipulación de partículas y estudios de fenómenos a nivel molecular. Estos concentradores de luz a nano-escala encuentran aplicaciones en áreas como la nano-fotónica, la nanomedicina y la fabricación de dispositivos y sensores de alta precisión.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1.2. Lentes tradicionales.

Las lentes tradicionales o refractivas consisten de un material transparente cuyas superficies pueden ser planas, cóncavas o convexas. En la historia, han sido de gran utilidad, pues se han fabricado muchísimos sistemas ópticos que han ayudado al ser humano, desde los lentes que ayudan a mejorar la visión, hasta dispositivos que nos han ayudado a entender nuestro entorno y la naturaleza.

Recientemente, la importancia del desarrollo de las lentes, ha recaído en la fabricación de aparatos que usamos en la vida cotidiana, como lo son: cámaras fotográficas, microscopios, telescopios, máquinas litográficas, espectrómetros, etc.

Las lentes tradicionales, tienen limitaciones entre las más importantes se encuentran:

- **Tamaño y forma:** Las lentes refractivas convencionales suelen ser voluminosas y tienen una forma curva, lo que dificulta su integración en dispositivos compactos y planos. Esto limita su aplicabilidad en campos donde el espacio y el tamaño son factores críticos, como la microscopía portátil, la fotografía móvil y los dispositivos electrónicos.
- **Aberraciones ópticas:** Las lentes refractivas tradicionales pueden introducir diversas aberraciones ópticas, como la aberración esférica, la coma, el astigmatismo y la distorsión. Estas aberraciones causan imperfecciones en las imágenes formadas y afectan la calidad y la nitidez de la imagen resultante. Para corregir estas aberraciones, se requiere el uso de múltiples lentes en una configuración óptica, lo que aumenta la complejidad y el tamaño del sistema.
- **Dispersión cromática:** La dispersión cromática es una propiedad de los materiales ópticos que hace que la luz se descomponga en diferentes longitudes

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

de onda al pasar a través de una lente. Esto puede resultar en efectos no deseados, como halos de color alrededor de los objetos y una reducción en la calidad de la imagen. Para mitigar la dispersión cromática, se utilizan combinaciones de lentes con diferentes características de dispersión, lo que nuevamente aumenta la complejidad y el tamaño del sistema.

- Limitaciones en la corrección de aberraciones: A medida que se busca lograr una mayor resolución y calidad de imagen, la corrección de aberraciones ópticas se vuelve más desafiante. Las lentes refractivas tradicionales tienen limitaciones en términos de su capacidad para corregir ciertas aberraciones, especialmente a medida que se reduce el tamaño del sistema óptico. Esto puede limitar la calidad de imagen en aplicaciones que requieren una alta resolución y una precisión óptica excepcional.
- Dificultad en la fabricación: La fabricación de lentes refractivas tradicionales con una alta precisión y calidad óptica puede ser un proceso complejo y costoso. La forma curva de las lentes requiere técnicas de mecanizado y pulido meticulosas para lograr la forma deseada, lo que puede aumentar los costos de producción y limitar su accesibilidad en ciertos contextos.

Mas, sin embargo, los estudios recientes en metasuperficies han descubierto importantes fenómenos ópticos, que han conducido al desarrollo de las lentes ultradelgadas basadas en metasuperficies, que por su naturaleza son llamadas *metalentes* (Figura 2.1).

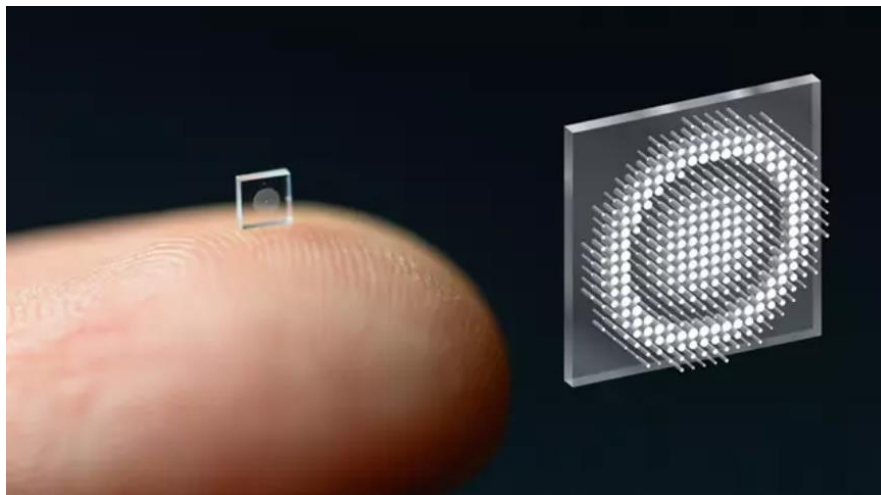
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Figura 2.1.- Imagen de una metalente dieléctrica con meta-átomos cilíndricos. Recuperado de Fuente <https://www.notimerica.com/> tomada de la Universidad de Princeton.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.2. Metalentes.

2.2.1. Óptica plana.

La óptica tradicional se basa en los principios de Fermat y las leyes de refracción y reflexión, y principalmente en el uso de superficies curvas. Recientemente, investigaciones experimentales han demostrado que la luz se puede controlar mediante estructuras con elementos diminutos del tamaño más pequeño que la longitud de onda. Estas meta-estructuras pueden controlar la propagación de la luz a través de superficies planas mediante el control de la reflexión y refracción, gracias al fenómeno de desfase inducido por meta-átomos.

El principal objetivo de los que estudian los fenómenos de la óptica, es tener control de la luz, para poderla usar a placer en los dispositivos de diseño ópticos. Es por ello, que se estudia la reflexión y refracción de las ondas electromagnéticas que interaccionan con distintos materiales.

En la actualidad, se estudia la respuesta electromagnética en distintas metasuperficies, entre estas: la absorción, polarización y la modulación de fase [6]. La ventaja del uso de las metasuperficies, es que son estructuras planas es que se puede crear una estructura plana que se denomina metasuperficie, la cual consta de bloques de construcción o meta-átomos, los cuales se encuentran periódicamente espaciados sobre una superficie, estos bloques de construcción tienen separaciones entre ellos de sublongitud de onda, y permiten cambiar la amplitud, fase y polarización de la onda incidente, lo que a su vez permite obtener perfiles de fase deseados de acuerdo a la aplicación en la que se requiera.

Para poder crear una metasuperficie, que pueda simular una metalente, debe tener un perfil de cambio de fase, lo cual se logra a través de elementos periódicos que

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

conforman la metasuperficie, estos elementos comúnmente se denominan como *celda unitaria*. Esta celda unitaria, dependiendo de su geometría y material, determina el cambio de fase en la onda, que es necesario para la manipulación del frente de onda.

El control de la fase de onda, se ha abordado mediante tres enfoques distintos: la resonancia en meta-átomos, la fase geométrica en meta-átomos (también conocida como fase de Pancharatnam–Berry) y una combinación de ambas metodologías.

Fase de resonancia: Al cambiar la estructura de los meta-átomos, la frecuencia de resonancia se desplaza, lo que conduce a un cambio repentino en la fase en una cierta frecuencia. Las metasuperficies de fase de resonancia se pueden utilizar para controlar la desviación, el enfoque y la conversión de polarización de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, la modulación de fase de resonancia tiene limitaciones. Inicialmente, se utilizaron antenas de metal para formar las metasuperficies de fase de resonancia. Los materiales metálicos pueden construir metasuperficies de alto rendimiento en reflexión y transmisión para longitudes de onda largas. Sin embargo, las metasuperficies de fase de resonancia metálica sufren el problema de una alta pérdida óhmica para la luz visible. Por lo tanto, la eficiencia de transmisión de las metasuperficies de resonancia siempre es baja en este rango de longitud de onda. Dado que el cambio de fase proviene de la resonancia de las estructuras, esto conduce a una alta absorción y a un ancho de banda de trabajo limitado de las metasuperficies de fase de resonancia. Además, se requiere un diseño y procesamiento precisos de estructuras con diferencias de tamaño despreciables para controlar con precisión la fase [8].

Fase geométrica: Este método de modulación genera un cambio repentino en la fase de las ondas reflejadas o transmitidas al cambiar el ángulo de rotación de las

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

nanoestructuras, logrando así un control libre del gradiente de fase o su distribución. La complejidad de diseñar y procesar metasuperficies se reduce en gran medida gracias al concepto de modulación de fase geométrica. Este método consiste en hacer uso de polarización circular ya sea izquierda o derecha, y al ir girando los meta-átomos de acuerdo a la polarización seleccionada se obtienen los cambios de fase [7].

Fase de propagación: Las metasuperficies de fase de propagación manipulan la fase a través de la diferencia de camino óptico generada durante la propagación de las ondas electromagnéticas. Suponiendo que una onda electromagnética con una longitud de onda λ se propaga a una cierta distancia d en un medio homogéneo con un índice de refracción n , la fase de propagación acumulada de las ondas electromagnéticas se puede expresar como $f = nk_0d$, donde $k_0 = 2\pi/\lambda$ es el vector de onda en el espacio libre. Según la ecuación anterior, el grosor d y el índice de refracción n de un elemento óptico son dos parámetros que pueden ajustar de manera efectiva la fase de propagación. Para elementos ópticos planos, sin aumentar el grosor d , el cambio de fase se puede lograr al variar espacialmente el índice de refracción equivalente o efectivo n . Además, si el índice de refracción equivalente n es lo suficientemente grande, se puede reducir de manera efectiva el grosor del dispositivo. Los métodos comúnmente utilizados para la construcción de metasuperficies de fase de propagación se pueden dividir en dos categorías: uno se basa en la teoría de la óptica de guía de ondas, y el otro se basa en la teoría del índice de refracción equivalente del medio. La diferencia entre estos dos métodos radica en la forma de ajustar el índice de refracción. El primero adopta la característica de que la constante de propagación del modo de guía de ondas cambia con el factor de llenado del meta-átomo. El segundo utiliza la diferencia en el índice de refracción de dos o más medios

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

(generalmente uno es un medio de alto índice de refracción) en la celda unitaria para lograr la modulación de fase de las ondas electromagnéticas [7].

Una metalente debe de tener una distribución de fase especial para poder enfocar la luz. Esta distribución de fase tiene un perfil de fase hiperbólico (derivado mediante el principio de Fermat), dado por la ecuación [8]:

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi f}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{f^2+x^2+y^2}}{\lambda} \quad (2.1)$$

Donde x y y es la posición en el plano del punto focal, f es la distancia focal y λ es la longitud de onda. La Figura 2.2 muestra la referencia de los ejes, así como la posición de la luz enfocada en un punto en el eje z dado por una metalente simple.

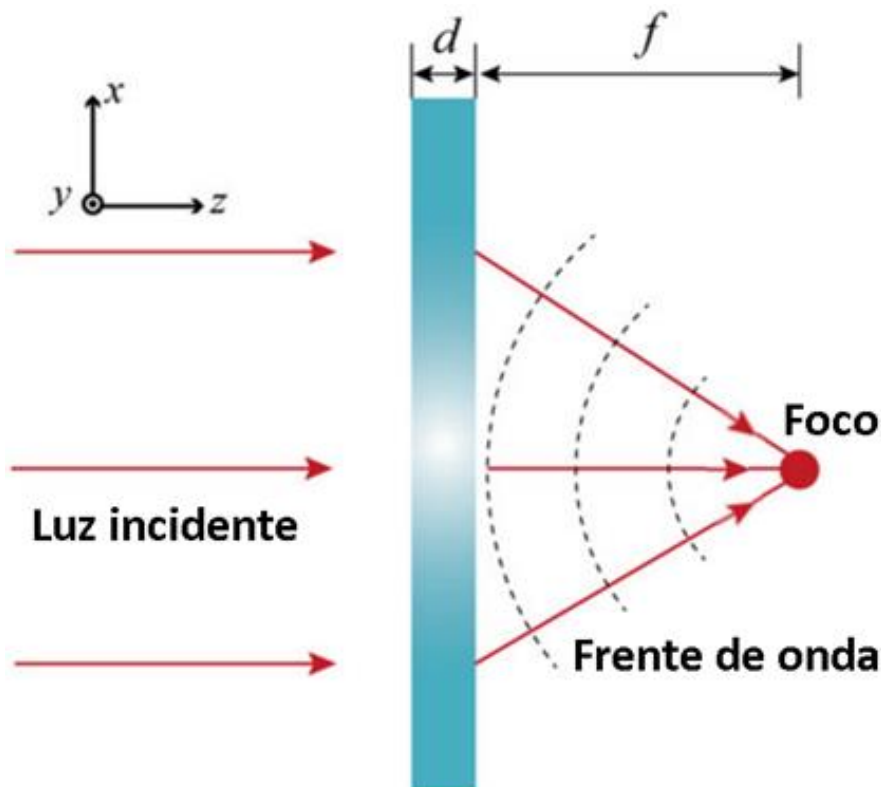


Figura 2.2.- Enfoque de luz por una metalente simple. El grosor d depende del sustrato y del tamaño de los meta-átomos que constituyen la metalente. Por simplicidad la imagen no muestra los meta-átomos.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.2.2. Meta-óptica.

La evolución de los sistemas ópticos se encamina hacia un futuro donde los componentes planos desempeñarán un papel central. Estos componentes, diseñados a escalas micrométricas y nanométricas, presentan un potencial significativo para transformar la óptica moderna. A medida que la fabricación de nuevos dispositivos ópticos avanza, se espera un continuo mejoramiento en sus funciones y capacidades. La tendencia hacia la miniaturización y la integración de componentes planos en sistemas ópticos promete revolucionar la forma en que percibimos y utilizamos la luz en aplicaciones científicas, industriales y tecnológicas [9]. Aunque ya se conocían componentes basados en óptica difractiva y películas delgadas, la metaóptica ofrece nuevas funcionalidades. Pero los avances recientes en la creación y manipulación de películas delgadas y técnicas nanolitográficas han ayudado a que se pueda tener mejores estudios sobre lo que llamaremos metasuperficies.

Las metalentes son dispositivos ópticos planos que utilizan nanofabricación para manipular la luz de manera altamente controlada. A diferencia de las lentes refractivas tradicionales, que se basan en la refracción de la luz a través de medios materiales, las metalentes aprovechan efectos de difracción y dispersión en estructuras metálicas o dieléctricas a nanoescala para enfocar la luz.

El principio físico fundamental detrás de las metalentes es la fase plana. Mientras que las lentes refractivas curvas presentan cambios continuos en la curvatura para controlar la trayectoria de la luz, las metalentes utilizan estructuras superficiales con perfiles de fase bien diseñados para modificar la fase de la luz incidente. Estos perfiles de fase se logran mediante la disposición precisa de nanoestructuras en la superficie de la metalente, a estas nanoestructuras se le denomina comúnmente como meta-átomos. Un meta-átomo, cuenta con características ópticas particulares, dependiendo

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

del material del que está hecho, así como de su geometría. Los bloques están espaciados a una distancia de una fracción de la longitud de onda de la onda incidente. Además de que tienen una distribución espacial definida, que ayuda a controlar las propiedades de la luz a placer. Es por ello que una nueva rama de la óptica con un futuro prometedor, es la Metaóptica [5].

Al manipular la fase de la luz, las metalentes pueden enfocar la luz en un punto o en una imagen nítida, similar a como lo hace una lente tradicional. Sin embargo, las metalentes ofrecen varias ventajas significativas en comparación con las lentes refractivas tradicionales. Estas ventajas incluyen:

- **Diseño ultradelgado y ligero:** Las metalentes son extremadamente delgadas, con grosores de solo unas pocas longitudes de onda de luz. Esto las hace más compactas y livianas que las lentes tradicionales, lo que es especialmente valioso en aplicaciones donde el tamaño y el peso son críticos.
- **Mayor eficiencia y calidad de imagen:** Debido a su capacidad para controlar con precisión la fase de la luz, las metalentes pueden proporcionar una mayor eficiencia de enfoque y una calidad de imagen mejorada en comparación con las lentes refractivas. Además, pueden corregir aberraciones ópticas de manera más eficiente.
- **Amplio rango de operación:** En los últimos años, las metalentes han emergido como una tecnología prometedora en el campo de la óptica. Estas lentes ultradelgadas y planas han demostrado capacidades excepcionales para manipular la luz en escalas sublongitudinales de onda. En particular, las metalentes RGB, diseñadas para enfocar la luz en una amplia gama de longitudes de onda, se han convertido en una herramienta versátil para aplicaciones multispectrales.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

- Flexibilidad en el diseño: Las metalentes ofrecen una mayor flexibilidad en el diseño y fabricación en comparación con las lentes refractivas tradicionales. Pueden adaptarse fácilmente a diferentes formas y tamaños, lo que permite diseños personalizados para aplicaciones específicas.
- Integración con tecnologías existentes: Las metalentes se pueden fabricar utilizando técnicas de nano-fabricación compatibles con la tecnología existente, lo que facilita su integración en sistemas ópticos y electrónicos existentes.

“Aunque los metamateriales han logrado un gran éxito en todo el rango electromagnético del espectro, todavía existen grandes desafíos en la fabricación a gran escala y en el diseño de dispositivos con respuesta de banda ancha, especialmente en el rango de frecuencias visibles”.

2.2.3. Metasuperficies.

Las metasuperficies son estructuras artificiales diseñadas para manipular la propagación de la luz de manera altamente controlada y personalizada. Estas superficies planas están compuestas por una matriz de elementos con separaciones entre sí del orden de sublongitud de onda, llamados meta-átomos, que interactúan con la luz incidente y generan respuestas ópticas específicas.

El principio físico fundamental detrás de las metasuperficies es la manipulación de la fase, la amplitud y la polarización de la luz a nivel sublongitud de onda. Los meta-átomos están diseñados cuidadosamente para tener propiedades ópticas únicas, como resonancias plasmónicas, resonancias dieléctricas o interferencia destructiva y constructiva.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Cuando la luz incide en una metasuperficie, los meta-átomos interactúan con ella y modifican su fase, amplitud y polarización. Esto se logra controlando las propiedades geométricas, estructurales y materiales de los meta-átomos. La fase de la luz se modifica mediante ajustes precisos de la longitud de camino óptico, mientras que la amplitud se controla mediante la transferencia de energía entre la luz y los meta-átomos.

La respuesta óptica de una metasuperficie se puede diseñar y optimizar para lograr efectos específicos, como enfoque de luz, cambio de fase, polarización selectiva, control de la dispersión y modulación espacial de la onda. Estos efectos son especialmente útiles en aplicaciones como lentes planas, dispositivos de camuflaje óptico, holografía, moduladores espaciales de fase y sensores.

Se han propuesto distintos tipos de materiales para la creación de metasuperficies, las cuales son mejor expuestas en la Figura 2.3.



Figura 2.3.- Metasuperficies y metamateriales. Fuente: Libro *Engineering Optics 2.0*.

Los métodos de fabricación de metasuperficies están llegando a formar estructuras a escalas nanométricas, en la Figura 2.4, se muestra una estructura donde las dimensiones muestran sus escalas nanoscópicas.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

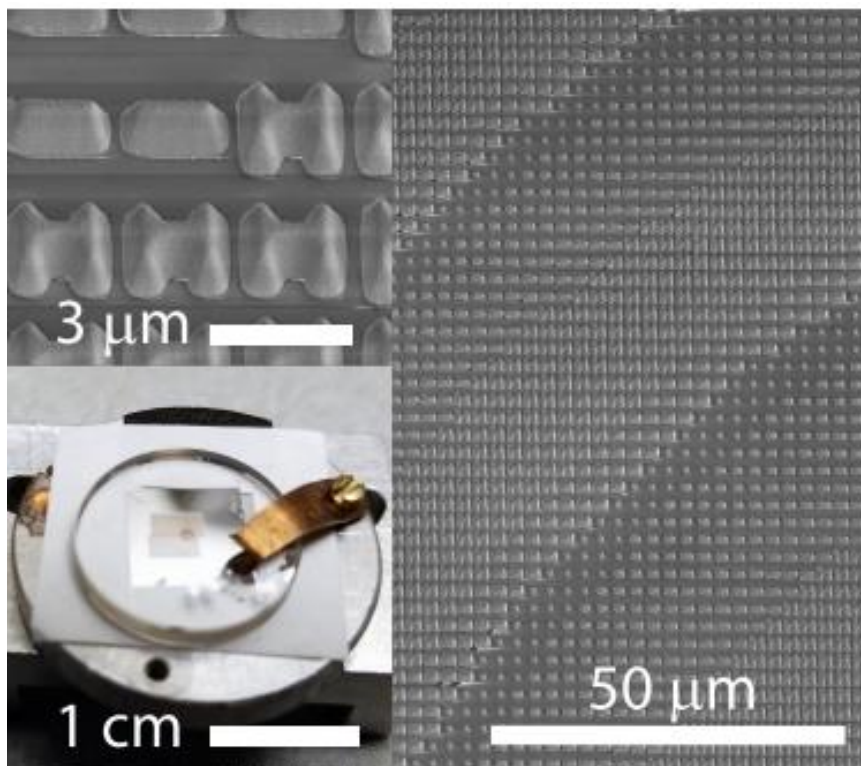


Figura 2.4. -Metasuperficie fabricada. Fotografía de una metalente simple y microscopio electrónico de barrido (SEM siglas en inglés) imagen de meta-átomos [10].

2.2.4. Características de las metalentes.

Las metalentes, son nuevas tecnologías que enfocan la luz, que, gracias al desarrollo de la nano-fabricación, podemos hacer crear lentes tan pequeñas, hasta de un tamaño nanométrico (Figura 2.1). Es por eso, que se están estudiando, caracterizando y buscando emplear en nuevos desarrollos tecnológicos, gracias a sus propiedades que las hacen únicas, las cuales mencionaremos a continuación [10]:

- Ultradelgadas. – Comparada con una lente tradicional, la metalente tiene espesores que varían alrededor de los cientos de nanómetros, lo cual les da una gran ventaja sobre las lentes tradicionales, con el puro hecho de que son mucho más livianas.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

- Alta eficiencia de enfoque. – Aunque se siguen haciendo estudios, se ha visto que se puede controlar la eficiencia de enfoque, modificando el material y hasta la geometría de las celdas que componen la metalente.
- Fabricación flexible. – Las metalentes pueden ser diseñadas a placer dependiendo del uso que se les dé, por lo tanto, pueden ser fabricadas para distintos usos y aplicaciones específicas, con pocas variaciones en materiales y geometrías.
- Compactas. – Las metalentes, debido a su estructura ultradelgada, presentan una ventaja significativa en términos de integración en sistemas ópticos compactos. Su perfil plano y su capacidad para modular la fase de la luz permiten una fácil incorporación en dispositivos de reducidas dimensiones. Al ser componentes de grosor similar a la longitud de onda de la luz, las metalentes pueden contribuir de manera efectiva a la miniaturización de sistemas ópticos [12].

2.3. Reflexión Total Interna (TIR).

El fenómeno de reflexión total interna, se ha utilizado mucho en las tecnologías ópticas del último siglo, por mencionar algunos ejemplos tenemos las fibras ópticas, donde podemos transmitir ondas electromagnéticas a largas distancias, teniendo prácticamente nula pérdida de energía. También es utilizada en sensores, donde se utiliza la luz reflejada en otro punto y ésta a su vez, lleva información de temperatura, presión, humedad, etcétera.

Primeramente, debemos entender la reflexión y refracción para poder hacer el diseño de una metalente TIR. En este proceso de reflexión y refracción pasan dos cosas, lo primero es cuando incide el haz de luz formando un ángulo con respecto a

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

la normal del plano de incidencia sobre la superficie y éste se refleja con el mismo ángulo. Pero también tenemos que parte de este haz de luz (dependiendo del material) se transmite a través del segundo material teniendo un cambio en la dirección y el ángulo de incidencia.

La reflexión total interna, es un fenómeno de la luz, que se presenta cuando una onda electromagnética se refleja totalmente en la interfase de dos medios con distintos índices de refracción. Esto puede suceder cuando el índice de refracción del medio de incidencia (n_1) es mayor que el índice de refracción del medio al cual se transmite (n_2) de tal modo que ($n_1 > n_2$). Al ir incrementando el ángulo de incidencia del rayo de luz, este tiene un ángulo crítico de incidencia. Es decir, al ir incrementando el ángulo incidente, el rayo de luz transmitido se va acercando poco a poco a la interfaz entre los materiales, de tal modo que cuando el rayo transmitido coincide con la interfaz entre los dos medios, el ángulo de incidencia coincide con el ángulo crítico. Para ángulos de incidencia mayores al ángulo crítico, tenemos una reflexión total dentro del material con índice de refracción n_1 , esto se puede observar de manera más clara en la Figura 2.5 [1].

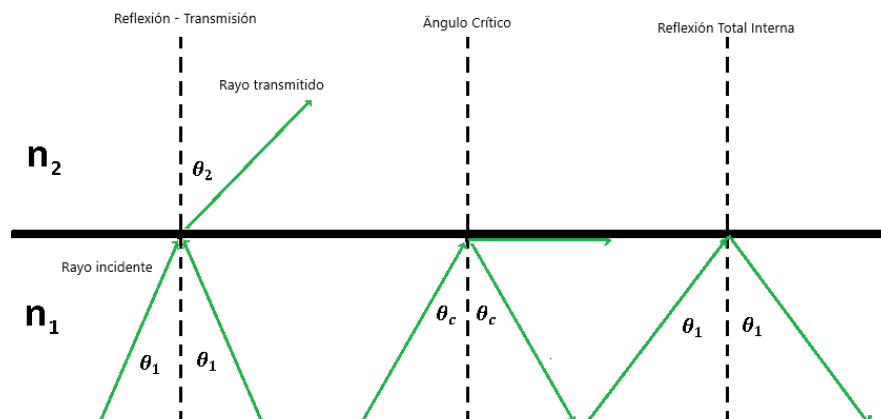


Figura 2.5.- Esquema de la refracción, ángulo crítico y Reflexión total interna en dos medios con distintos índices de refracción, donde $n_1 > n_2$.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Para el cálculo del ángulo crítico, se puede usar la ley de Snell, que menciona que el producto de índice de refracción del primer medio por el seno del ángulo de incidencia es igual al producto del índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de transmisión en el segundo medio, lo cual podemos deducirlo de la siguiente ecuación:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (2.2)$$

donde n_1 y θ_1 son el índice de refracción y ángulo del haz en el medio incidente, respectivamente, n_2 y θ_2 son los respectivos índices de refracción y el ángulo del haz en el medio transmitido.

En el contexto de interfaces ópticas, consideremos un escenario en el que el ángulo de transmisión es igual a 90° . Esto implica que la luz se propaga a lo largo de la interfaz en una dirección perpendicular. Si despejamos el ángulo incidente en esta situación, encontramos que corresponde al ángulo crítico.

La relación entre el ángulo de transmisión (90°) y el ángulo crítico se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \text{arcsen} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.3)$$

siendo θ_c el ángulo crítico para obtener la reflexión total interna.

2.4. Perfil de fase.

En el contexto de las metalentes, el perfil de fase desempeña un papel fundamental en la manipulación de la luz. Este perfil determina la forma del frente de onda después de que la luz pasa a través de la metalente. Nuestro objetivo específico es analizar una metalente basada en el fenómeno de reflexión interna total

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

(TIR) con el propósito de coleccionar y concentrar la máxima cantidad de luz en un punto específico, donde se coloca el detector.

La metalente TIR se basa en la propiedad de reflexión total interna que ocurre cuando la luz incide en un ángulo crítico en la interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción. Al diseñar cuidadosamente la estructura de la metalente, podemos lograr una concentración eficiente de la luz en un área localizada. Esta técnica tiene aplicaciones potenciales en sistemas de detección, microscopía y comunicaciones ópticas. Para poder lograrlo, debemos primeramente diseñar un perfil de fase hiperbólico en modo transmisión, con el objetivo de que incida en un punto focal, como lo hacen las lentes concentradoras. Es por ello, que nuestro perfil de fase de la metalente está basado en un perfil hiperbólico, que se obtiene a partir de una onda plana incidente, la cual se transmite a través de la metalente, y al pasar por los meta-átomos, estos brindan cambio de fase necesario para obtener el perfil deseado. En nuestra simulación, tenemos una onda plana incidente y por el otro lado, buscamos que la luz llegue a un foco determinado (Figura 2.6), donde estará posicionado el detector de luz de nuestra metalente TIR.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

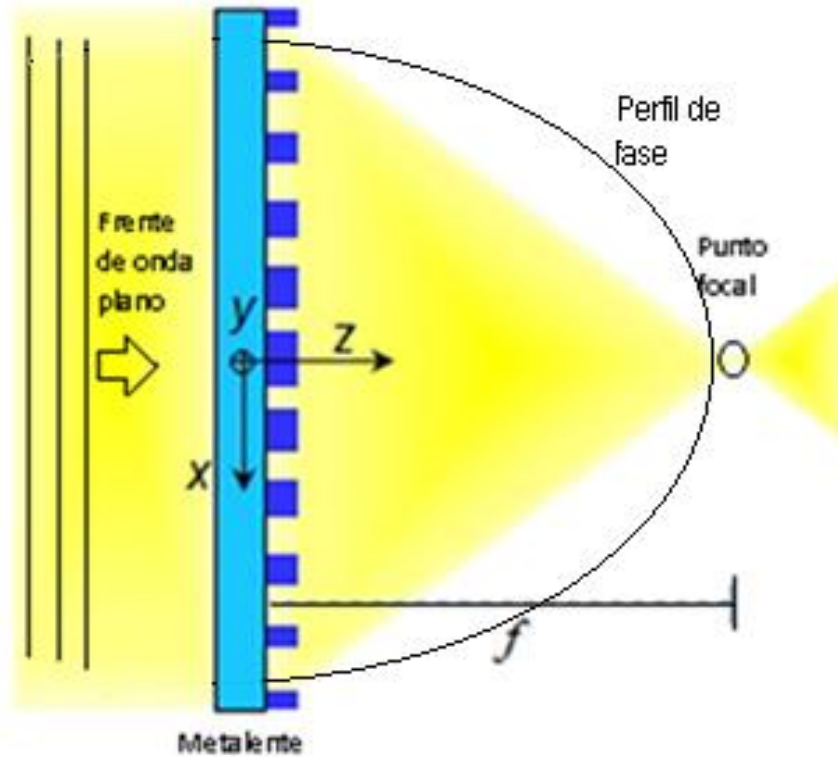


Figura 2.6. -Metalente con perfil de fase hiperbólico, enfocando la luz incidente en un punto focal.

Para que una metalente enfoque un frente de onda plano, ésta debe tener una metasuperficie con el siguiente perfil de fase:

$$\Phi(r) = \pm k(\sqrt{r^2 + f^2} - f) \quad (2.4)$$

donde k es el número de onda, r es la posición radial sobre la superficie de la metalente ($r^2 = x^2 + y^2$), f es la distancia focal y para el signo positivo sería convergente y para el signo negativo sería divergente [6]. Este perfil de fase es hiperbólico, el cual enfoca la luz en un punto focal. Teóricamente es un punto, aunque en realidad, en la práctica es un área pequeña debido a aberraciones y difracción, pero para fines de diseño lo consideraremos un punto.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Para simular una metalente con el perfil de fase dado por la Ecuación 2.4, se debe seleccionar el tipo de nano-elemento y caracterizar sus propiedades geométricas para introducir cambios de fase. Por lo tanto, al simular por FDTD, lo primero que buscamos es que los meta-átomos puedan introducir un cambio de fase de 0 a 2π , para poder tener el control total sobre la onda incidente. Estas propiedades dependen del tipo de nano-elemento, de su geometría y de su tamaño. El perfil de fase de la metalente también dependerá del radio de la metalente.

2.5. Celda unitaria.

En el contexto de las metalentes, la metasuperficie desempeña un papel crucial. Esta metasuperficie está compuesta por nano-elementos, y una de las estructuras más simples utilizadas en su diseño se basa en nano-cilindros. Estos nano-cilindros, que actúan como meta-átomos, que junto con la base que soporta al nanocilindro, en su conjunto nombraremos como “celda unitaria”, para mejor referencia se muestra en la Figura 2.7.

La celda unitaria es la estructura más elemental que forma una metasuperficie. Consiste en un arreglo periódico de nano-cilindros dispuestos en una configuración específica. La elección del material para los meta-átomos en forma de cilindro es crucial, ya que afecta directamente las propiedades ópticas de la metalente.

Los nanocilindros funcionan como resonadores, que permiten ajustar la geometría para modificar la fase de la onda incidente. En nuestro análisis, exploraremos un barrido de cálculo de fase en función de las alturas y radios de los meta-átomos. El objetivo es seleccionar una configuración adecuada que permita obtener una cobertura de fase de 0 a 2π , lo cual es esencial para lograr el perfil de fase deseado.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Es muy importante caracterizar la celda unitaria, pues a partir de los parámetros geométricos, se podrá diseñar la metalente con el perfil de fase deseado, para ello, se emplea el método de FDTD, para hacer un barrido de alturas y radios de los nanocilindros y ver cómo es el cambio de fase en función de los parámetros antes mencionados.

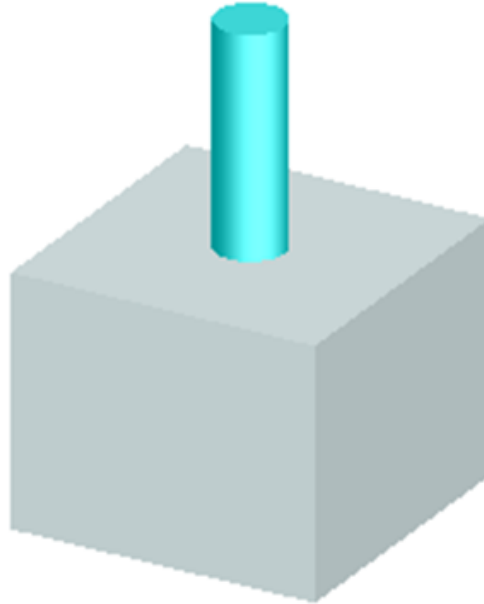


Figura 2.7.- Celda unitaria, la cual muestra en gris la región correspondiente al sustrato y en azul el material del nano-cilindro (meta-átomo).

Primero debemos diseñar la celda unitaria que consta de un sustrato y un cilindro (Figura 2.7), cada uno de ellos puede ser de un material distinto.

2.6. Simulaciones FDTD.

Prácticamente, se han empleado métodos numéricos para darle solución a las ecuaciones diferenciales que involucran problemas complejos de electromagnetismo. Aunque el uso de métodos numéricos, conlleva a tener algunos errores numéricos, para fines prácticos, no son considerados relevantes. Es por ello que, para el desarrollo de la simulación, usaremos el método de solución numérica FDTD (Método de

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

diferencias finitas en el dominio del tiempo), a su vez, es el óptimo para resolver problemas electromagnéticos transitorios en sistemas complejos.

El método FDTD (conocido como Finite-Difference Time-Domain por sus siglas en inglés) es una herramienta óptima para abordar problemas electromagnéticos transitorios. Este método se basa en la resolución numérica de las ecuaciones de Maxwell utilizando diferencias finitas. A continuación, describo los pasos fundamentales del método:

- **Enmallado:** Se selecciona una malla discreta en el espacio, donde cada punto de la malla representa una ubicación específica. Esta malla se utiliza para discretizar el dominio espacial.
- **Resolución de Ecuaciones:** En cada punto de la malla, se resuelven las ecuaciones de Maxwell, que describen la propagación de campos electromagnéticos. Estas ecuaciones incluyen la ley de Gauss para el campo eléctrico, la ley de Gauss para el campo magnético, la ley de Faraday y la ley de Ampère-Maxwell.
- **Condiciones de Frontera:** Para garantizar la consistencia y estabilidad del método, se aplican condiciones de frontera apropiadas en los bordes de la malla. Estas condiciones definen cómo se comportan los campos electromagnéticos en los límites del dominio.

2.6.1. ¿Qué ecuaciones resuelve el método FDTD?

En el método de diferencias finitas con dominio en el tiempo, se resuelven ecuaciones diferenciales con un sistema evolutivo dinámico en el tiempo. Las ecuaciones se discretizan en el tiempo y espacio, donde se aproximan las derivadas parciales y temporales.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

Las ecuaciones que se resuelven en el modelado computacional son las ecuaciones de onda electromagnética en su forma general. Las ecuaciones que son usadas para simular la propagación de las ondas electromagnéticas, son las de Maxwell y estas ecuaciones describen la interacción de los campos eléctricos y magnéticos [13] dadas por:

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{H}}{dt} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (2.6)$$

$$\vec{D}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (2.7)$$

donde \vec{E} es el campo eléctrico, \vec{H} es el campo magnético, \vec{D} es el vector de desplazamiento, ϵ_r es la constante dieléctrica relativa compleja $\epsilon_r(\omega) = n^2$, donde n es el índice de refracción, μ_0 es la permeabilidad del medio, t es el tiempo.

2.6.2. Elección de la malla en el método FDTD.

Para aplicar el método de FDTD, se debe diseñar una malla de celdas de Yee Figura 2.8, en la que se calcula el campo eléctrico y magnético en cada punto, en cada instante en el tiempo. Es por ello que es fundamental hacer una correcta selección en el tamaño de la distancia entre cada punto de la malla, pues de él dependerá que los resultados tengan una mayor precisión.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

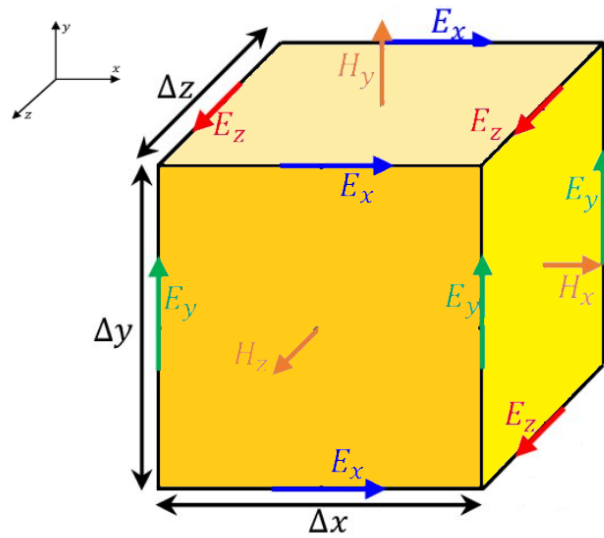


Figura 2.8.- Celda del malla Yee.

La elección correcta del enmallado es una cosa muy importante, ya que las ecuaciones son resueltas espacialmente en cada ubicación de los puntos de dicha malla. El método FDTD usa un malla de estilo cartesiano, pero hay que recalcar que entre menor sean las dimensiones de la celda del enmallado, mayor será la precisión de la simulación. Aunque, la elección de un enmallado con menores dimensiones nos da por resultado un mayor tiempo cómputo, esto conlleva que el número de ecuaciones a resolver, crece exponencialmente al inverso del tamaño de enmallado.

Así mismo, hay que tomar en cuenta que, al reducir el tamaño de la celda, será necesaria una mayor capacidad de memoria computacional. Para una mejor referencia para el uso de la capacidad de cómputo necesaria para llevar a cabo nuestras simulaciones, ver el Anexo 1.

*CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO***2.7. Simulaciones empleando un software de FDTD.**

En el estudio de sistemas ópticos y fotónicos complejos, se requiere una herramienta de simulación numérica precisa y eficiente. Para abordar esta necesidad, se emplea un software basado en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD por sus siglas en inglés). El software describe el comportamiento de la luz por medio de las soluciones a las ecuaciones que describen los fenómenos electromagnéticos. Un software destacable es **Lumerical**, usa el método de diferencias finitas (FDTD) para resolver ecuaciones de onda electromagnéticas, ya sea en dos o tres dimensiones. Con este método, es capaz de resolver las ecuaciones vectoriales de Maxwell, con gran precisión, acercándose muy bien a la realidad. Con Lumerical, se pueden modelar y analizar sistemas complejos, entre los que están el comportamiento de materiales nano-fotónicos, sistemas ópticos compuestos, fibras ópticas, láseres, sistemas de iluminación, etc.

El software empleado, se utiliza principalmente para investigación fundamental de la óptica y fotónica. También es muy usado en el desarrollo de dispositivos en la industria por su gran capacidad para el modelado de sistemas ópticos. En la industria se usa para diseñar sistemas ópticos complejos, dando resultados realistas, que ayudan al desarrollo de cámaras, sistemas de iluminación y hacer sus modificaciones oportunas con poco presupuesto, gracias a que se pueden tener modificaciones en el modelado, mejorando su precisión y eficiencia, que serían muy costosos implementarlos de manera física. Otra gran ventaja del software es que cuenta con una biblioteca de materiales ópticos que pueden ser usadas y así tener variaciones en los modelos, dependiendo de la configuración de dichos materiales. Y con esto, se

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

puede tener un gran ahorro económico, al pasar de los resultados simulados a los resultados experimentales, pues reduce la posibilidad de fallo en el desempeño.

También es usado para realizar predicciones en el campo de la óptica, pues le permite predecir comportamientos antes de ser construidos, lo cual ahorra tiempo y recursos en una investigación. Es el idóneo para el modelado de materiales en dispositivos ópticos, pues se puede modelar la absorción y dispersión de la luz de distintos materiales, lo que permite evaluar cómo estos materiales serían afectados y cuál sería la calidad de la transmisión de la luz. En lo que corresponde los aspectos técnicos, agregaremos un apéndice (Anexo 1) que nos ayuda a elegir la mejor opción en sistema de cómputo para nuestro diseño.

2.8. El futuro de las metalentes.

En el futuro, la miniaturización de los componentes requerirá de sistemas ópticos de bajo peso, de dimensiones a escala microscópica y con funcionalidad mejorada [5]. El estudio de nuevas propiedades de los materiales a escala mesoscópica y microscópica, así como nuevos métodos de fabricación, han ayudado a que se ponga interés en darle uso a esos nuevos descubrimientos.

El uso de lentes tradicionales, ha tenido limitantes en peso y tamaño, como ya lo hemos mencionado, pero siguen siendo útiles para la fabricación especialmente de cámaras [10]. Sin embargo, en el futuro, esto puede cambiar con el desarrollo de las metalentes.

Tanto las metalentes como las metasuperficies tienen una amplia gama de aplicaciones en diversos campos tales como:

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

- **Óptica y Fotografía:** Las metalentes pueden mejorar la calidad de imagen en cámaras y sistemas ópticos al proporcionar un enfoque más preciso y corregir aberraciones ópticas.
- **Microscopía:** Las metalentes pueden usarse en microscopios para obtener imágenes de alta resolución y mejorar la detección de muestras biológicas y nanomateriales.
- **Comunicaciones Ópticas:** Las metalentes pueden utilizarse en sistemas de comunicación óptica para enfocar la luz en receptores o mejorar la eficiencia de acoplamiento entre dispositivos.
- **Realidad Virtual y Aumentada:** Las metalentes pueden mejorar la calidad de visualización y la inmersión en aplicaciones de realidad virtual y aumentada al proporcionar un enfoque más nítido y una mayor precisión en la formación de imágenes.
- **Energía Solar:** Las metalentes pueden utilizarse en paneles solares para mejorar la captura de luz y aumentar la eficiencia de conversión de energía solar.
- **Dispositivos de Imagen Médica:** Las metalentes pueden aplicarse en dispositivos de imagen médica, como endoscopios, para mejorar la resolución y la calidad de imagen.

2.8.1. Próximas aplicaciones de las metalentes:

- **Optoelectrónica Integrada:** Las metalentes pueden integrarse en circuitos optoelectrónicos para manipular la luz a escala nanométrica, lo que permitiría la miniaturización de dispositivos ópticos y el desarrollo de chips ópticos más rápidos y eficientes.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

- **Tecnología de Pantallas:** Las metalentes podrían utilizarse en pantallas de visualización para lograr imágenes más nítidas, mayor brillo y ángulos de visión amplios.
- **Detección y sensores:** Las metalentes podrían aplicarse en sensores ópticos y dispositivos de detección para mejorar la sensibilidad y selectividad en la detección de sustancias y biomarcadores.
- **Óptica no Lineal:** Las metalentes podrían desempeñar un papel importante en la generación y manipulación de luz no lineal, lo que permitiría avances en campos como la generación de frecuencias armónicas y la espectroscopia no lineal.
- **Óptica Cuántica:** Las metalentes podrían utilizarse en aplicaciones cuánticas para generar estados cuánticos, manipular qubits y desarrollar sistemas de comunicación y computación cuántica más eficientes.

Estas son solo algunas de las muchas aplicaciones actuales y futuras de las metalentes y metasuperficies. A medida que la investigación y el desarrollo en este campo continúan avanzando, es probable que surjan nuevas y atractivas aplicaciones en diversos ámbitos científicos y tecnológicos

En nuestro caso en particular, se trabajó en mostrar que se puede diseñar un concentrador de luz ultra-compacto al reconfigura una metalente, al agregarle un material que ayude a tener reflexión total interna y así mejorar la cantidad de luz que llega al detector.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Metodología de la simulación

Las metalentes, consisten en celdas unitarias compuestas por nanoestructuras, que están posicionadas de forma periódica y de una manera muy específica. Para obtener la distribución de dichas celdas, se debe tener en cuenta la modificación de la fase de la onda incidente, lo cual permite obtener las propiedades deseadas, en este caso focalizar las ondas planas en un punto focal. Este último sería la posición donde iría nuestro detector de luz.

El objetivo principal de este trabajo es la simulación de una metalente TIR (Figura 3.1), para lo cual, debemos de hacerlo por partes, para comenzar debemos realizar el diseño de una celda unitaria. Para analizar una metalente independiente de la polarización de la luz, se eligió la opción geométrica de cilindros para la construcción de la celda unitaria. El análisis del meta-átomo en su celda unitaria inicia con simulaciones de la propagación de la onda a través de la celda unitaria. Cada barrido de la simulación se realiza variando el radio y la altura del nanotubo. Esto se realiza haciendo incidir una onda plana, la cual tiene una longitud de onda específica y de este modo obtenemos una matriz de transmisión y cambio de fase de onda, en función de los radios y alturas de los meta-átomos, que es lo que nos permitirá elegir los radios y altura necesarias para simular la metalente TIR. A estas matrices de transición y desfase les llamaremos matrices de datos.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

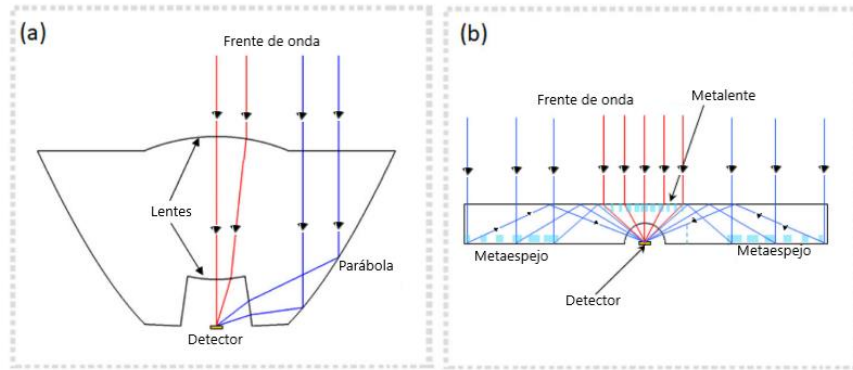


Figura 3.1. -(a) Diagrama esquemático de una lente TIR clásica y (b) Diagrama esquemático de una metalente TIR. Imagen modificada[6].

Una vez obtenido las matrices de datos de los nano-elementos para simular la metalente central de la metalente TIR, debemos seleccionar un perfil de fase, que nos ayude a la elección correcta de la geometría espacial y distribución de los nano-elementos para enfocar la luz en nuestro caso. Es decir, se selecciona una curva de desfase en función de los radios para una altura óptima. Para el diseño del metaespejo en anillo, se emplearán los mismos pasos que se hacen en la simulación de la metalente central, con la única diferencia que en el sustrato tiene que tener una película reflectora (metálica) para que haga la función de espejo y refleje las ondas que lleguen a esa parte de la metalente TIR.

Por último, se hace el ensamble del metalente central y el anillo meta-espejo, con el fin de simular la metalente TIR y obtener los resultados esperados. En resumen, el análisis de una metalente TIR será por partes, aquí dividiremos los pasos a seguir:

- Diseño y simulación de celda unitaria.
- Diseño y simulación de la metalente central en modo transmisión.
- Diseño y simulación de meta-espejo en anillo.
- Ensamble de la metalente TIR.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Para ello, daremos una explicación en los siguientes subtemas de la tesis de cada uno de los pasos y los resultados obtenidos, con la finalidad de ser más explícitos.

3.2. Diseño y simulación de la celda unitaria.

Para el diseño de la celda unitaria, se deben definir la geometría y sus dimensiones del sustrato donde estará posado nuestro nano-elemento, pues a partir de esta, la celda unitaria se replicará para formar lo que es la metalente completa. Nuestra única variante será en los radios de los nanotubos. Después de ello, se tiene que definir los materiales para el sustrato y el nano-elemento, pues de esto depende mucho para lograr el desfase deseado, a decir es necesario para obtener un desfase en un rango de 2π , necesario para poder controlar el frente de onda. Una vez hecho esto, haremos la simulación de la celda unitaria con una fuente de luz, donde se hace incidir un frente de onda plano desde la parte inferior donde se encuentra el sustrato con una longitud de onda dada, con lo cual se obtendrán los datos sobre el cambio de fase que tiene la onda al pasar por el nano-elemento. Además, también será importante saber su transmitancia, para minimizar las pérdidas de energía. Una vez obtenidos esos datos, se realiza la simulación de la metalente, pues el arreglo espacial de los radios de los nanotubos, será a partir de estas variables.

En este trabajo de tesis, se diseñó la metalente empleando meta-átomos cilíndricos sobre un sustrato con geometría cúbica. Esto lo podemos visualizar de mejor manera en la Figura 3.2.

3.2.1. Definición geométrica del meta-átomo

Para iniciar la simulación, es imperativo establecer una estructura fundamental conocida como “celda unitaria”. Esta celda unitaria se somete a simulaciones para obtener sus características ópticas, que a su vez nos permiten

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

diseñar la metalente. Al disponer de datos sobre su comportamiento óptico, podemos definir la disposición espacial de los meta-átomos necesarios para la metalente de reflexión total interna (TIR). En aras de la simplicidad, hemos optado por modelar un nano-elemento en forma de cilindro sobre un sustrato de geometría cúbica. Lo podemos visualizar de mejor manera en la Figura 3.2.

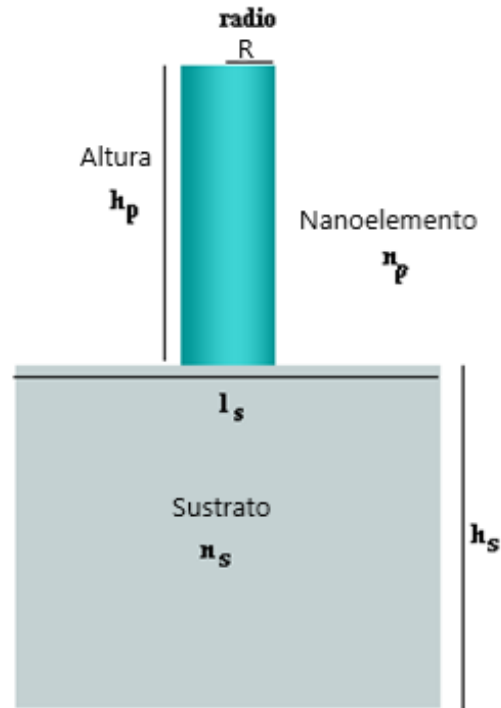


Figura 3.2.- Vista de 2D de la celda unitaria, constituida por un nano-cilindro y un sustrato.

En nuestra estructura, variamos el radio R del cilindro, para observar el comportamiento del paso de la luz y el desfase de la onda a distintas alturas h_s . Mantuvimos las dimensiones del sustrato, para tener sólo dos parámetros de variación en la simulación.

3.2.2. Condiciones iniciales de la celda unitaria

Esta celda unitaria se somete a simulaciones para obtener sus características ópticas, que a su vez nos permiten diseñar la metalente. Al disponer de datos sobre

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

su comportamiento óptico, podemos definir la disposición espacial de los meta-átomos necesarios para la metalente de reflexión total interna (TIR).

La celda unitaria está constituida por el sustrato y el nano-elemento. Las dimensiones espaciales del sustrato las elegimos cúbicas, cuya altura mencionamos como h_s , al ser su base cuadrada, mencionaremos sus lados l_s .

En la siguiente tabla, damos la lista de las condiciones iniciales de nuestra celda unitaria y la longitud de onda que usamos en nuestra simulación.

Descripción de constante	Abreviatura	Valor	Unidad
Altura del sustrato	h_s	0.9	μm
Tamaño de lado de base de sustrato	l_s	0.9	μm
Tiempo de simulación	t	10000	fs
Temperatura de la simulación	T	300	K
Índice de refracción del sustrato	n_s	1.4561[14]	SiO_2
Índice de refracción del pilar	n_p	2.3778[15]	GaN
Tamaño de la malla de simulación	d_x	0.01	μm
Longitud de onda	λ	660	nm

Tabla 3.1.- Valores constantes de los parámetros de la simulación de celda unitaria.

El tamaño de la malla en el método FDTD, es muy importante en nuestro caso, por ello es que elegimos un tamaño que no sea muy grande para las dimensiones de los nano-elementos, pues resultaría en una simulación de baja resolución. Así mismo,

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

el mallado tampoco debe ser demasiado pequeño, pues emplearía mucho tiempo de cómputo para obtener resultados.

Los parámetros físicos de la simulación que permanecieron constantes se presentan en la Tabla 3.1 con sus respectivos valores. El sustrato elegido es vidrio (SiO_2), con un índice de refracción $n_s = 1.4585$ [14] y el nanoelemento con un índice de refracción $n_p = 2.3765$ [15] del Nitruro de Galio.

En la Tabla 3.2 mostramos la notación de los parámetros que se varían en las corridas de las simulaciones para obtener el perfil de fase.

Descripción de variable	
Altura del sustrato	h_s
Radio del pilar	R

Tabla 3.2.- Valores constantes de los parámetros de la simulación de celda unitaria.

3.2.3. Barrido de simulación de altura y radio del nano-elemento.

La Figura 3.3 muestra una simulación del viaje de la onda plana a través de una celda unitaria con su nano-elemento. En color se muestra la variable de la fase a lo largo de su viaje, mostrando el periodo de 2π de las ondas periódicas. El eje z indica la dirección de propagación y el eje x indica la sección transversal de la celda unitaria. De esta simulación se puede obtener el desfase introducido por la celda unitaria, y la transmitancia de la celda unitaria.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

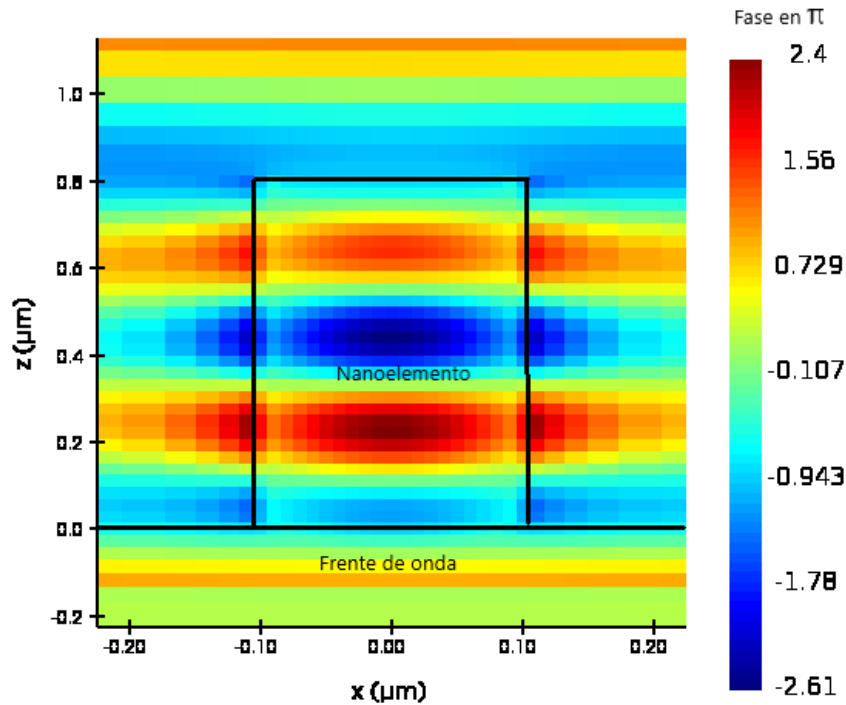


Figura 3.3. -Viaje de la onda plana a través de la celda unitaria.

Realizamos una serie de simulaciones variando las alturas y radios de los nanoelementos, a lo que llamamos un barrido o corrida de simulaciones. Una vez realizada la simulación donde hacemos el barrido de alturas vs radios, generamos una matriz de valores de desfase (barra de colores) introducidos por la celda unitaria, la cual se muestra en la Figura 3.4. Esta matriz de valores es necesaria para que podamos elegir una altura de meta-elemento en donde podamos tener un desfase en un rango completo de 2π al variar el radio. En otras palabras, ésta matriz, nos ayuda a tener una buena elección del conjunto de radios a elegir, que nos ayuda a tener el desfase de la onda en el orden de π a $-\pi$ a lo largo de una superficie de la metalente que se quiere diseñar. A lo que se procede a realizar una serie de simulaciones variando las alturas y radios de las nano-elementos, a lo que llamamos un barrido o corrida de simulaciones.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

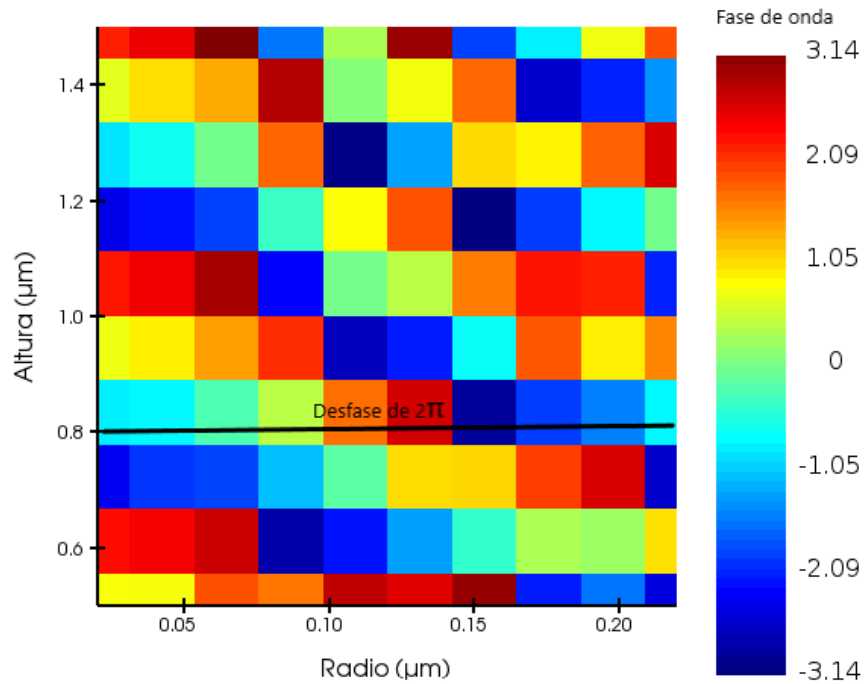


Figura 3.4.- Matriz de la fase con respecto a la altura h_p y radio R .

Además del cambio de fase de 2π para nuestra simulación, es prioritario tener una buena transmisión de la energía que pasa por la celda unitaria, por ello, también se genera la siguiente matriz de colores (Figura 3.5), la cual nos indica la variación de la transmisión (transmitancia) en función de las alturas y radios. Donde la transmitancia indica el porcentaje de la luz transmitida respecto a la onda incidente a través de la celda unitaria.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

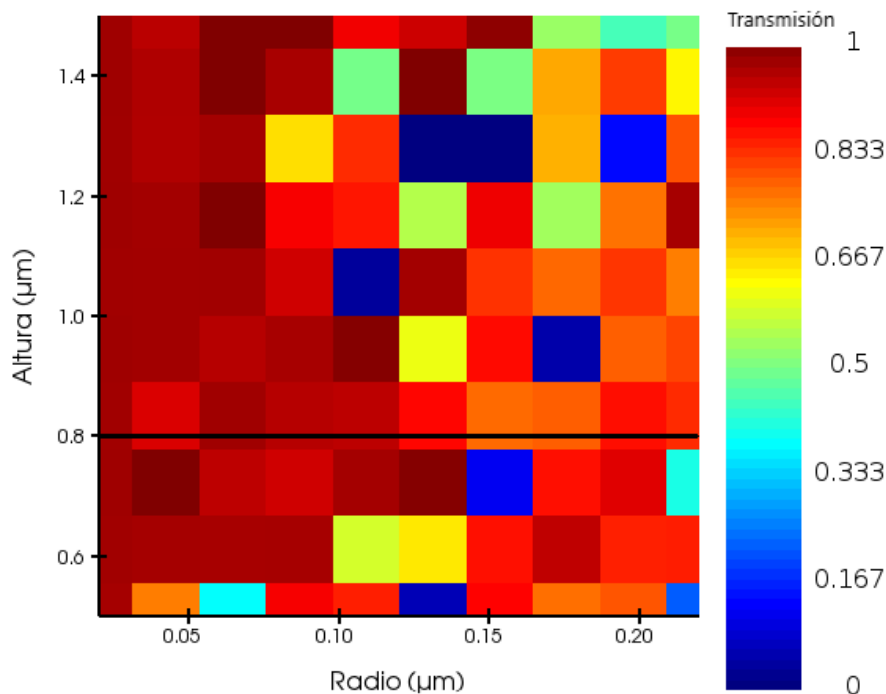


Figura 3.5.- Matriz de transmitancia normalizada tomando de variable altura h_p y radios R .

Una vez obtenidas las dos matrices, es muy sencillo poder elegir la altura h_p de los nano-cilindros, que determinarán el grosor que tendrá nuestra metalente. La elección se hace teniendo en cuenta el desfase de 2π y máxima transmisión de la energía.

3.2.4. Simulación de altura elegida

Una vez elegida la altura, con base a las Figura 3.4 y Figura 3.5 pasamos a realizar la gráfica de diseño, es decir la de fase contra los radios, para verificar que cumpla con las condiciones del desfase de 2π . La Figura 3.6 muestra un comportamiento adecuado, es decir, crecimiento monótono de la fase con el radio del nano-tubo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

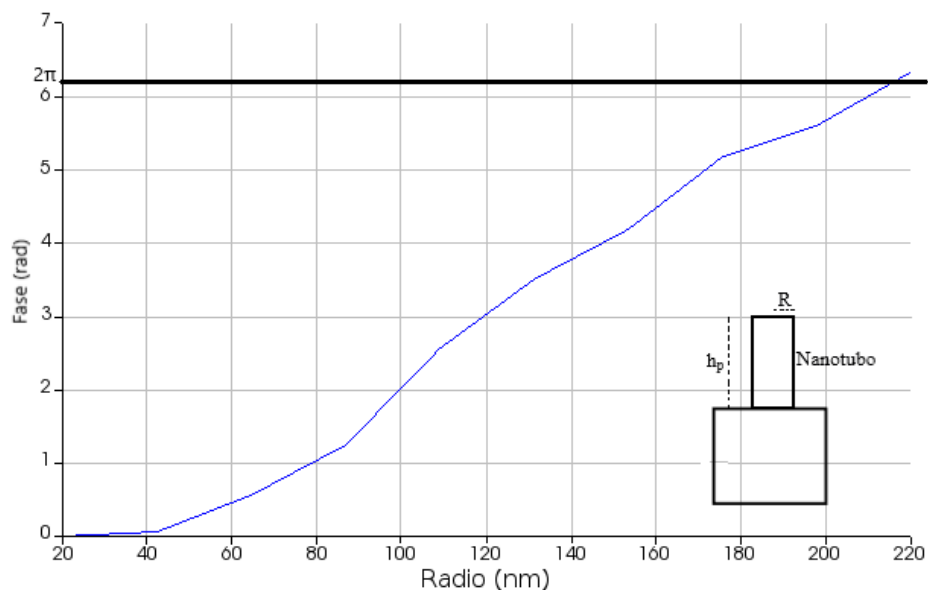


Figura 3.6.- Gráfica de fase vs radio vs fase en una altura definida de nanotubo.

Además, se analiza la transmisión del meta-átomo y ver que no tengamos pérdida de la energía. Esta gráfica se muestra en la Figura 3.7. En esta figura vemos que la pérdida de energía es mínima, en todos los radios elegidos. Con los datos de fase y transmisión, podemos hacer una correcta elección de lo que es la altura (0.85 μm) de nanotubo para usarla en todos los nano-elementos del diseño de la metalente. Todos los meta-átomos deben tener la misma altura par que la metalente sea plana. La óptica plana es más fácil de diseñar y fabricar.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

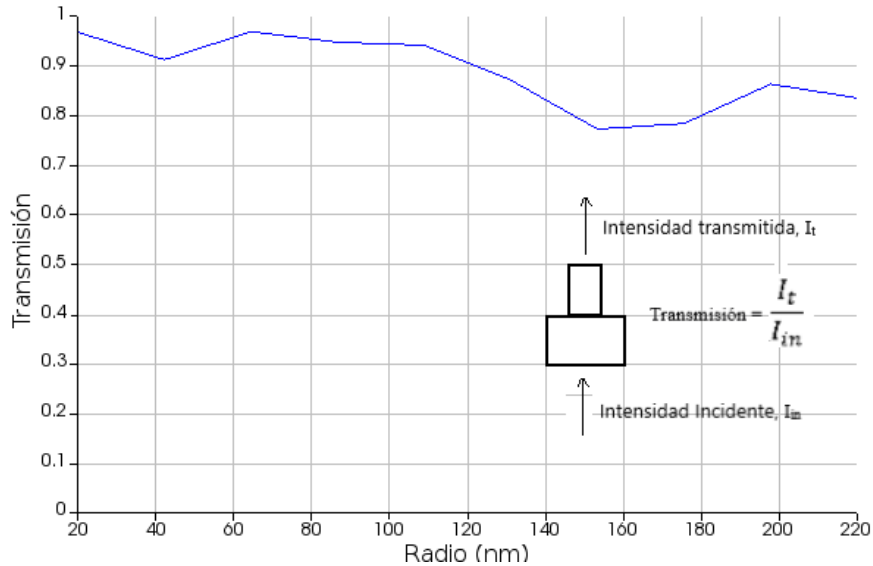


Figura 3.7. -Gráfica de radio vs transmisión a una altura dada.

Una vez que se obtiene la base de datos del comportamiento óptico de la celda unitaria, procedimos a formar la estructura de la metalente.

3.3. Diseño y simulación de la metalente central

El diseño tiene una metalente central que opera en transmisión para enfocar de manera directa la luz en el detector. Para simular la metalente central, se procedió a definir la distancia focal y su diámetro en función de la gráfica de fase vs radio (Figura 3.6). Pues es necesario saber el desfase dependiendo del radio de cada nano-elemento para encontrar la estructura espacial que debe traer la metalente. La estructura de la metalente central que obtuvimos se muestra en la Figura 3.8. La estructura muestra una distribución radial de radios, es decir $R(r)$, que resulta de cambiar la Figura 3.6 con la ecuación 2.4 del perfil de fase $\varphi(r)$.

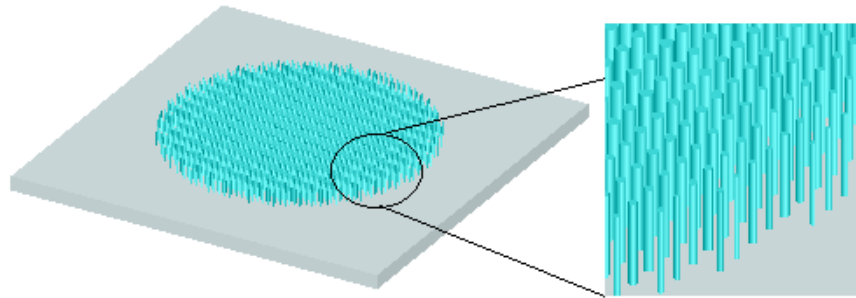


Figura 3.8.- Metalente central formada de nano-elementos cilíndricos de distintos radios R .

Para formar la metalente, fue necesario definir un perfil de fase deseado (Ecuación 4) y tomar la base datos de la celda unitaria, para proceder a la construcción de la misma. A continuación, mostramos los pasos que se hicieron para hacer la programación de la simulación:

1. Cargar el archivo de “the phase vs. Radius” de la previa simulación de la celda unitaria.
2. Especificar el perfil de fase y las condiciones iniciales.
3. Calcular el radio de los nano-elementos a partir del perfil de fase para dar la posición en la metalente.
4. Construir la lente completa usando los resultados del archivo “the radius vs. Position”.

El código del programa que hace esto se incluye en el Anexo 2.

Una vez que se trae programada la metalente central se procede la simulación de la propagación de un frente de onda plano a través de ella.

3.3.1. Comprobación de la de metalente.

Para asegurar que la simulación nos arroje resultados correctos, se procedió a realizar unas gráficas del desempeño de la metalente central, entre las cuales tenemos:

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

- Gráfica del perfil de intensidad en el eje z (Figura 3.9).
- Gráfica del perfil de intensidad en el plano focal en el eje x (Figura 3.10).
- Gráfica del perfil de intensidad en el foco, en el eje y (Figura 3.11).

En la Figura 3.9 se muestra una gráfica que nos permite observar si tenemos la luz concentrada en el punto focal que asignamos en las condiciones iniciales. Aunque se muestran varios picos secundarios muy pequeños, el máximo principal se ubica alrededor del punto asignado ($0 \mu\text{m}$). La gráfica muestra la distribución de la amplitud del campo eléctrico al cuadrado, que es proporcional a la intensidad, $I \propto |\bar{E}|^2$. Para propósitos prácticos aquí la consideramos como intensidad óptica [1].

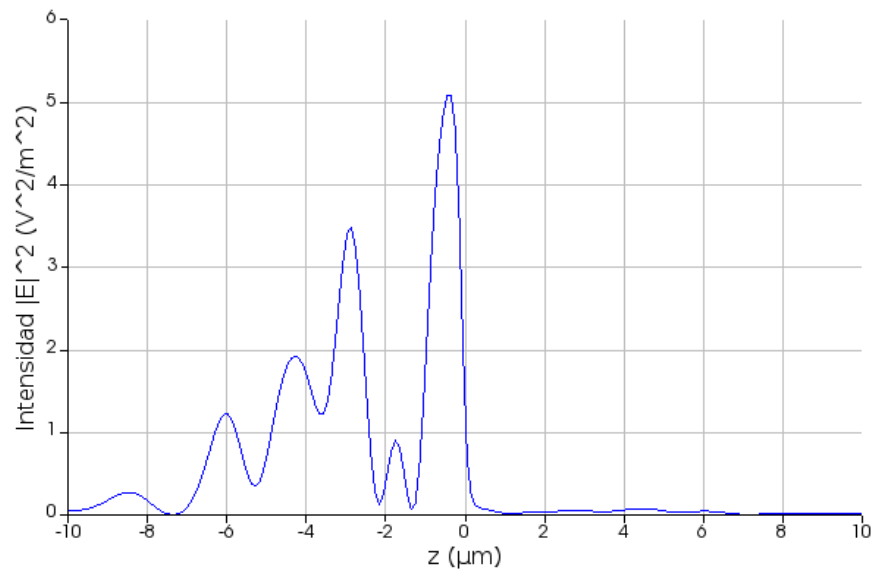


Figura 3.9.- Intensidad de luz enfocada por la metalente central en el eje óptico Z .

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

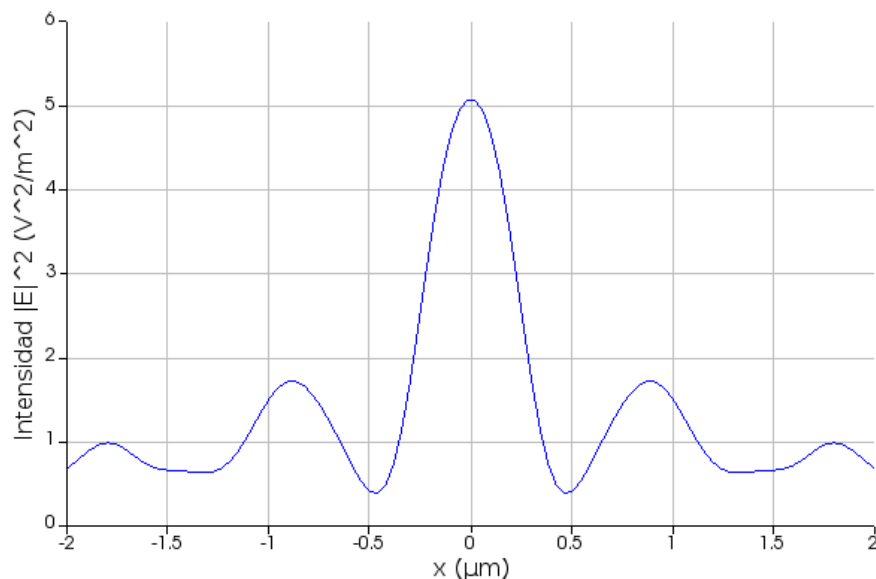


Figura 3.10.- Gráfica de la intensidad de luz en el eje X, en el punto focal ($z = 0\mu\text{m}$) de la metalente central.

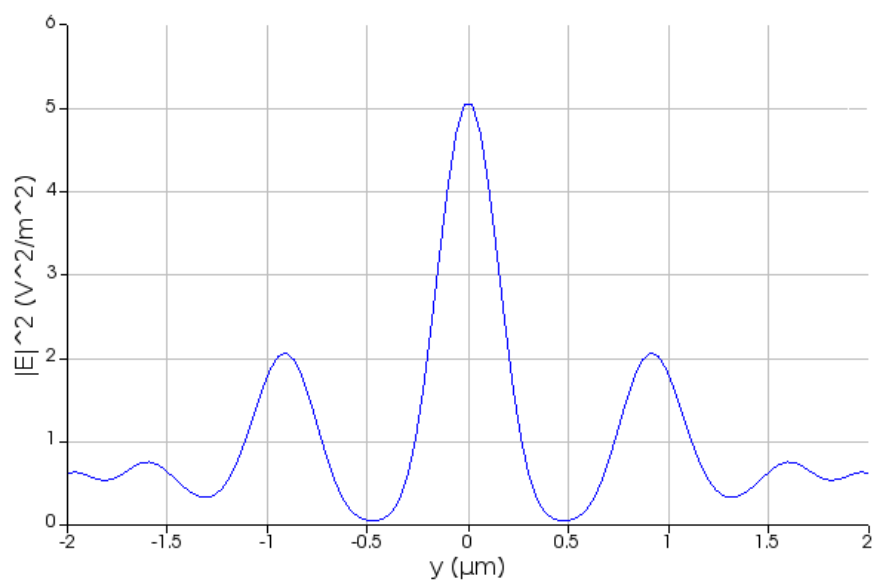


Figura 3.11.- Gráfica de la intensidad de luz en el eje Y, en el punto focal ($z = 0\mu\text{m}$) de la metalente central.

Las Figura 3.10 y Figura 3.11 nos da como resultado la distribución de intensidad en el punto focal a lo largo del eje X y Y, respectivamente. Mientras que la Figura 3.12 muestra el patrón de intensidad en el plano X-Z. En las gráficas en código de colores que nos muestra la intensidad de la luz alrededor del foco.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

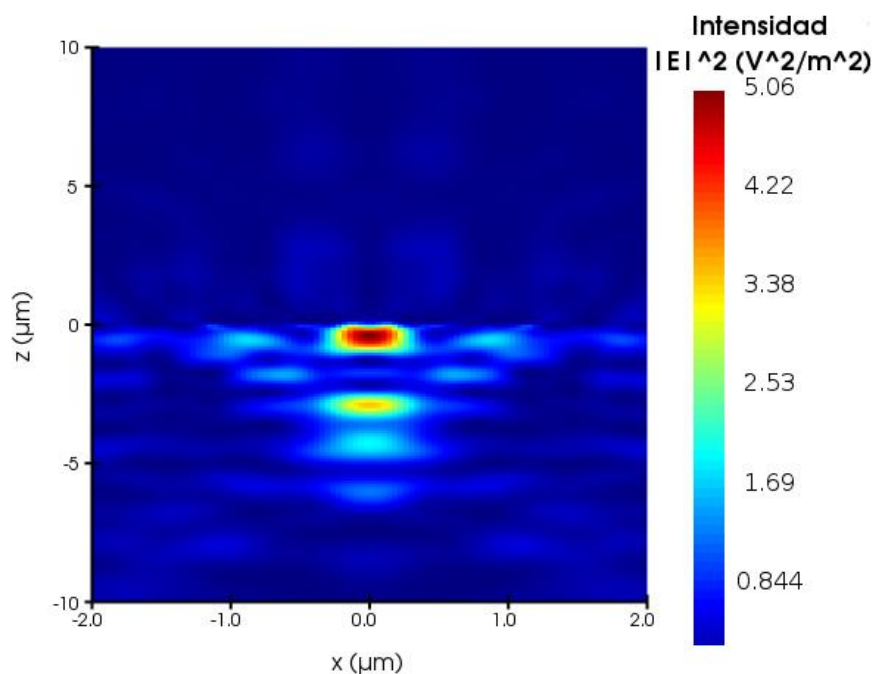


Figura 3.12.-Distribución espacial de la intensidad de luz del metalente central en el plano X-Z. en $y = 0$.

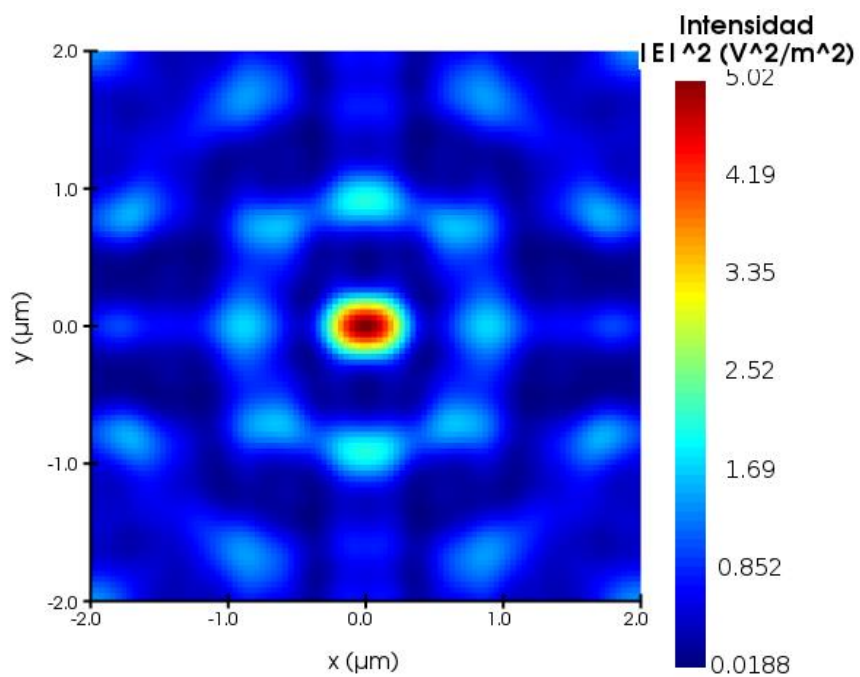


Figura 3.13.-Intensidad de luz del metalente en el plano X-Y, en el punto focal.

La Figura 3.13 muestra un corte en el plano X-Y donde podemos ver la distribución de la intensidad de la luz. De la Figura 3.9 a la Figura 3.13 son una

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

muestra clara que tenemos una concentración de la luz en el punto focal, localizado en $z = 0$. Esto prueba que el diseño de la metalente central es correcto.

Por último, hicimos una simulación de un video en 2D, para ver el paso de la luz a través de la metalente. Un cuadro del video (captura de pantalla) lo podemos ver en la Figura 3.14, que muestra como es el desvío del frente de onda de la luz hacia el punto focal. Las características del video pueden ser configuradas en las condiciones iniciales del programa de simulación de la metalente. La Figura 3.14 muestra como el frente de onda incidente se va curvando conforme atraviesa la metalente hasta que es casi esférico a la salida.

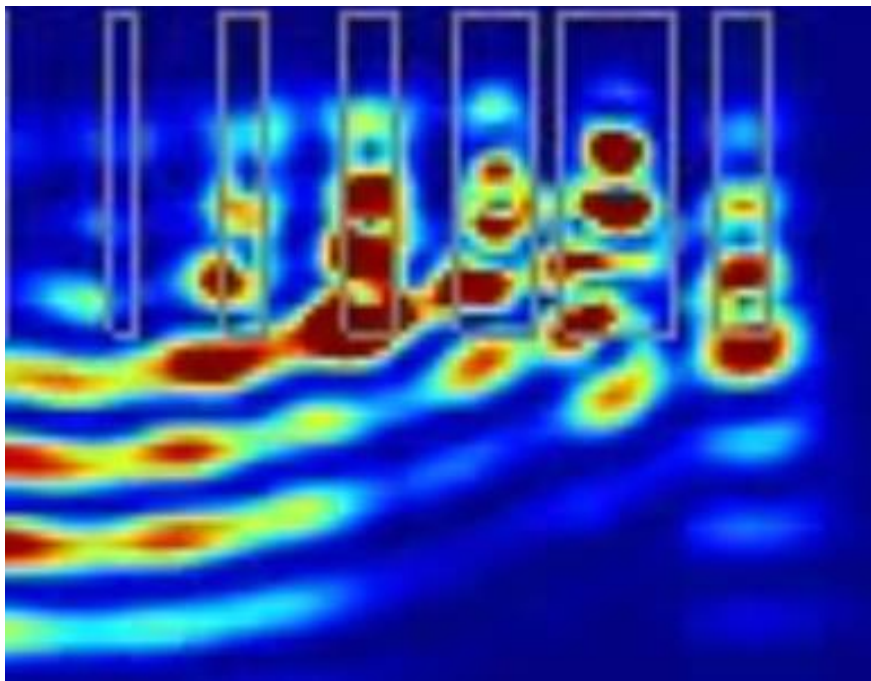


Figura 3.14.- Simulación de corte transversal de la metalente mostrando el desvío del frente de onda plano.

El video se puede ver en el enlace proporcionado mediante un código QR en la Figura 3.15, que llevará a un link de YouTube para observar la metalente central en acción.



Figura 3.15.- QR de link del video de la simulación de la propagación de luz en la metalente central.

3.4. Diseño y simulación del anillo de meta-espejo

Para simular el meta-espejo se repitieron muchos de los pasos que se requirieron para simular la metalente central. Pero se implementaron algunas variantes especiales que fueron necesarias para poder realizar el diseño de la metalente reflectora con anillo.

3.4.1. Celda unitaria de meta-espejo.

Al igual que con la metalente central, el diseño comienza con la celda unitaria de la metasuperficie que conforma la metalente espejo. La principal variante fue introducir en su base una película metálica para reflejar la luz, que en este caso seleccionamos la plata. Además, la celda unitaria deberá estar recubierta con el mismo material del sustrato, que en nuestro caso es de SiO_2 , esto último para que

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

tengamos reflexión total interna dentro de la estructura que conforma toda la metalente TIR. En la Figura 3.16 se muestra la celda unitaria sin el sustrato que rodea el nano-cilindro. Y en la Figura 3.17 mostramos el diseño final para la simulación, donde el cilindro está rodeado del sustrato que forma parte de la estructura de la metalente TIR.

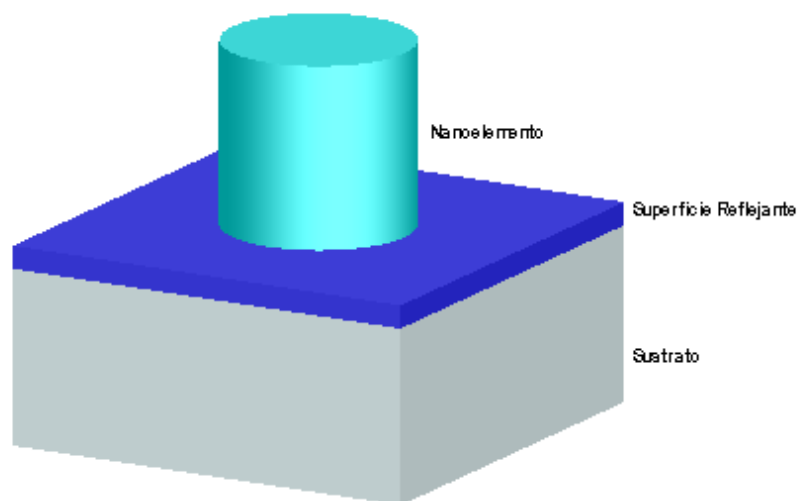


Figura 3.16.- Geometría de la celda unitaria para meta-espejo sin el sustrato superior.

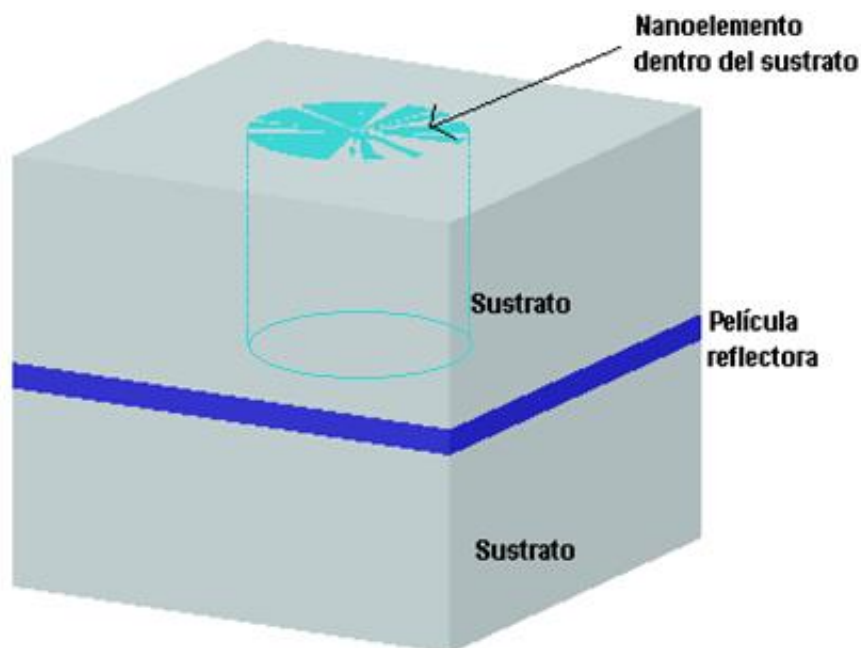


Figura 3.17.- Geometría final para simular celda unitaria de metaespejo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Realizando las mismas pruebas que en la anterior simulación del meta-espejo, procedemos a configurar la geometría para el diseño del meta-espejo. De lo cual se obtiene la gráfica de diseño que se muestra en la Figura 3.18, que da la relación entre el desfase y el radio de las meta-elementos. La altura de los tubos se seleccionó $h_p = 1.4 \mu m$. Los materiales son los mismos que usamos en el metalente central.

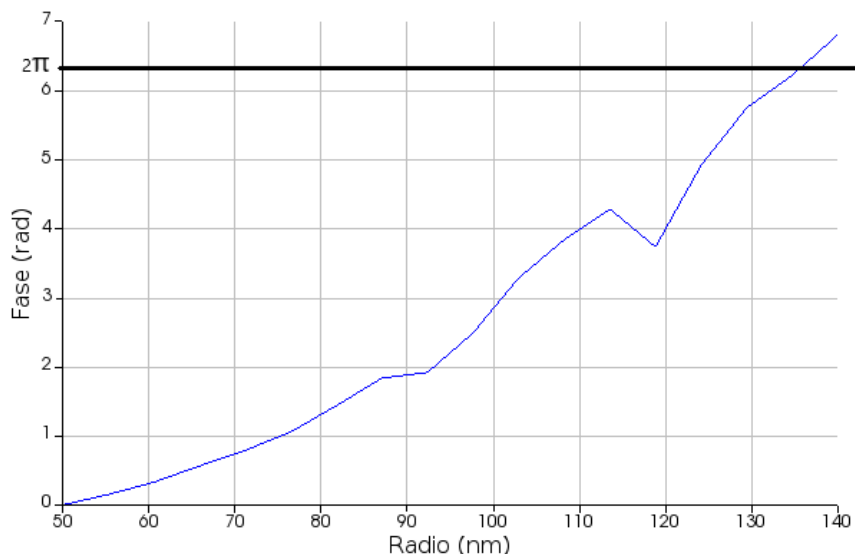


Figura 3.18. -Fase vs radio R de los nanotubos reflectores en metaespejo.

3.4.2. Geometría y especificaciones del meta-espejo.

El diseño tradicional de las metalentes es en una superficie circular como la de la metalente central. Sin embargo, el siguiente diseño es una metalente con forma de anillo (el anillo ayuda a captar más luz y enfocar a una distancia cierta). Esa geometría de anillo se muestra en la Figura 3.19. Para la metalente espejo se procedió siguiendo los pasos mencionados en la sección anterior, pero ahora con forma de anillo. En el orificio se coloca el detector, que va en la base de la metalente.

La función de meta-espejo requiere incorporar una película reflectora en el diseño. Esto se simula mediante celdas unitarias con película reflejante, es decir, el

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

ensamble se hará con las celdas unitarias mostradas en la Figura 3.20. La configuración final del meta-espejo con su vista lateral la mostramos en la Figura 3.21.

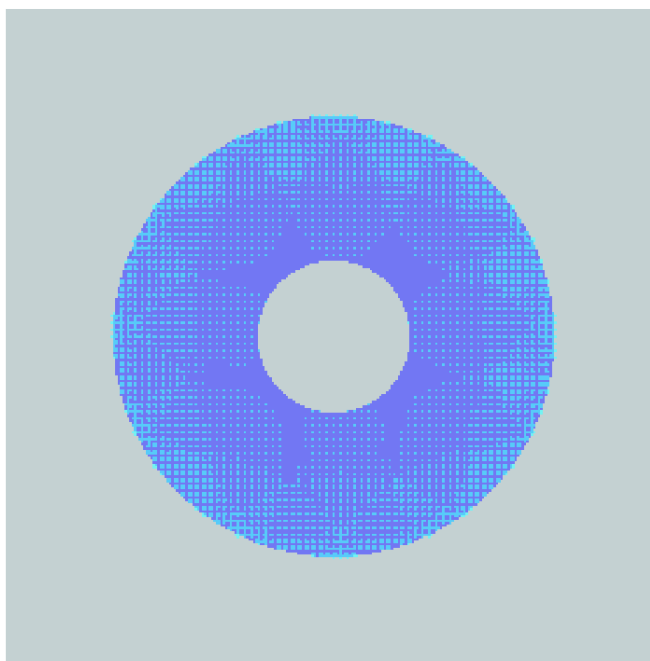


Figura 3.19.- Vista superior de meta-espejo.

La Figura 3.20 muestra la estructura de la metalente anillo con el espejo, donde se ven claramente la metalente formada por nano-elementos (color azul), en verde tenemos el sustrato y la superficie metálica (color azul marino), que se encuentra entre el sustrato y los nano-elementos. La Figura 3.21 muestra una vista lateral de una sección de la metalente reflectora. El tamaño del anillo y el círculo interior depende del diámetro de la metalente central [6]. El diseño simulado se hizo con una metalente central de diámetro de $3\mu\text{m}$ y un meta-espejo anillo con diámetro central $6\mu\text{m}$ y diámetro exterior $12\mu\text{m}$.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

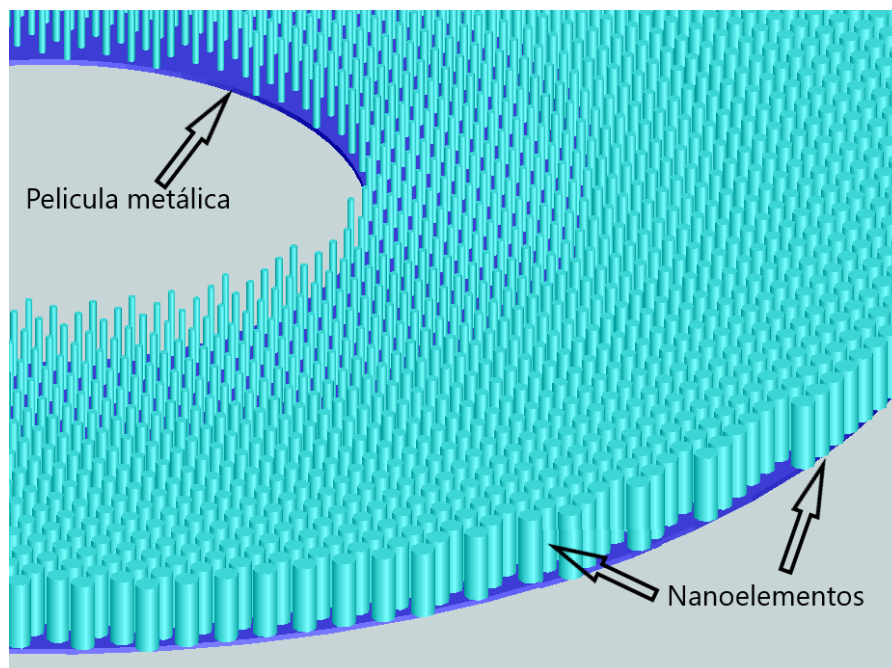


Figura 3.20.- Estructura de meta-espejo en anillo.

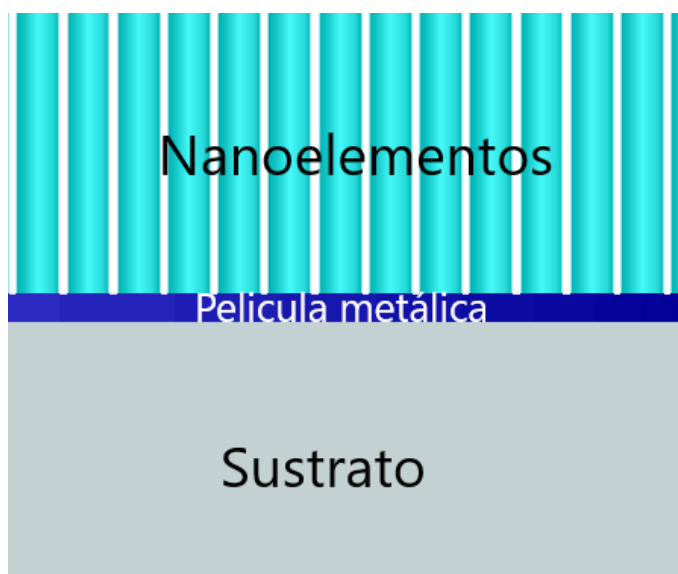


Figura 3.21.- Vista lateral de meta-espejo en anillo.

3.4.3. Simulación del meta-espejo en anillo.

Una vez hecha la configuración espacial, pasamos hacer la simulación de igual manera que hicimos la simulación del metalente central. Para ello, es conveniente que el frente de onda plano incida desde la parte superior, pues simula la luz que

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

entra por la metalente TIR, esto es para que la luz llegue a los nano-elementos y estos reflejen la luz y sea dirigida a la parte superior en donde se dé la reflexión total interna para que sea dirigida al detector en el centro del ensamble de la metalente TIR. Mostramos en las Figura 3.22 y Figura 3.23 cómo quedó el ensamble del meta-espejo y el sustrato y la dirección de propagación de la fuente de luz. El meta-espejo está inmerso en un sustrato que constituye la placa donde se lleva a cabo la reflexión total interna.

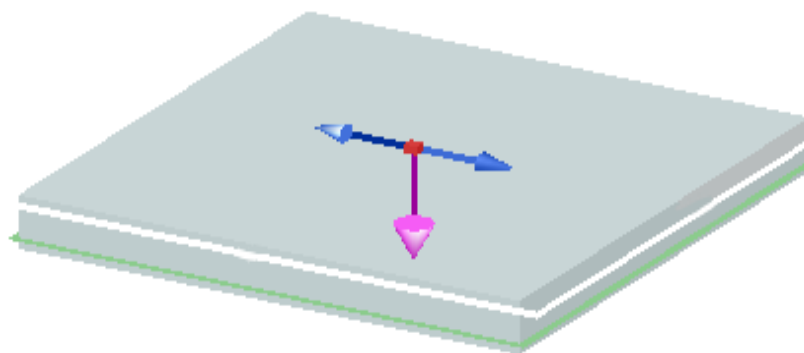


Figura 3.22.- Vista del meta-espejo dentro del sustrato, mostrando dirección de la fuente de luz (flecha rosa).

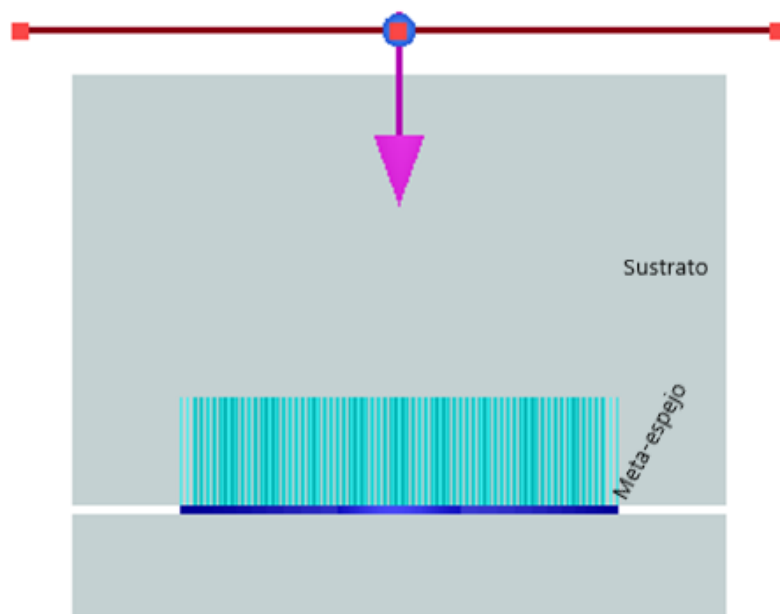


Figura 3.23.- Vista lateral de simulación de metalente, mostrando dirección de la fuente de luz.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

En las Figura 3.22 y Figura 3.23 se muestra con una flecha (color rosa) la dirección de propagación del frente de onda, así mismo en color gris la placa de sustrato donde la luz se refleja internamente en celeste los nano-elementos que conforman el meta-espejo y en azul marino la superficie reflectora.

En la Figura 3.24 muestra la intensidad en el punto focal a lo largo del eje transversal z.

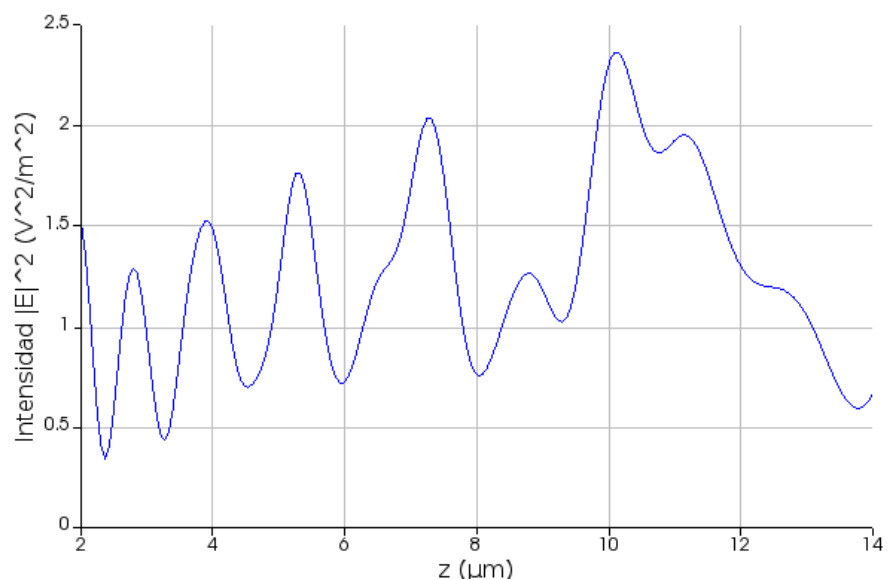


Figura 3.24.- Gráfica de la intensidad de luz en el meta-espejo en el eje Z, en el punto focal.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

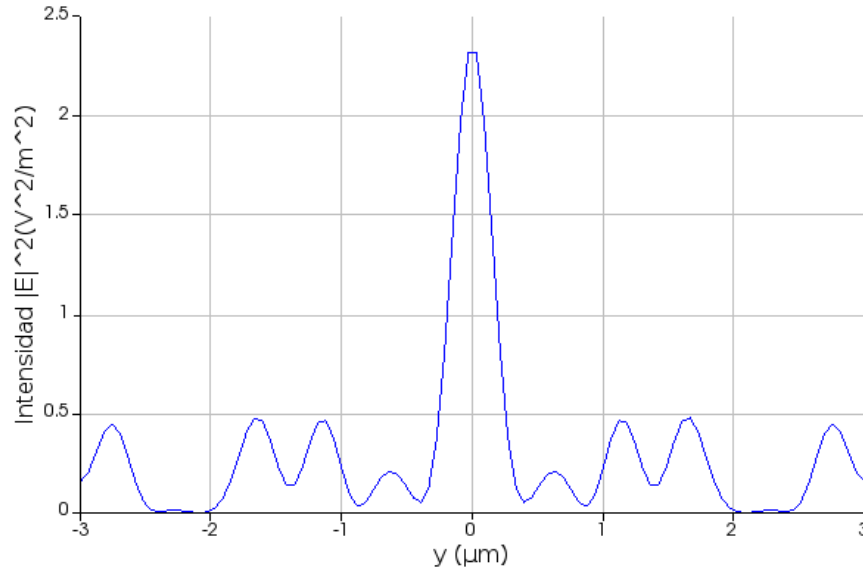


Figura 3.25.- Gráfica de la intensidad de luz en el meta-espejo en el eje y , en el punto focal.

Lo que buscamos en el meta-espejo es que la luz reflejada por el meta-espejo en el anillo se refleje una segunda vez en la superficie del sustrato y ahí se dé la reflexión total interna, y que toda la luz sea dirigida a la base (al centro de la estructura del anillo), lugar donde se coloca un detector. Se logró lo dicho, lo cual lo vemos en la Figura 3.25, la cual nos muestra un corte del eje z alrededor del eje y . El perfil de intensidad en el plano $x-z$ y se puede ver que se tiene reflexión total interna, y que se logra enfocar la radiación en el detector.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

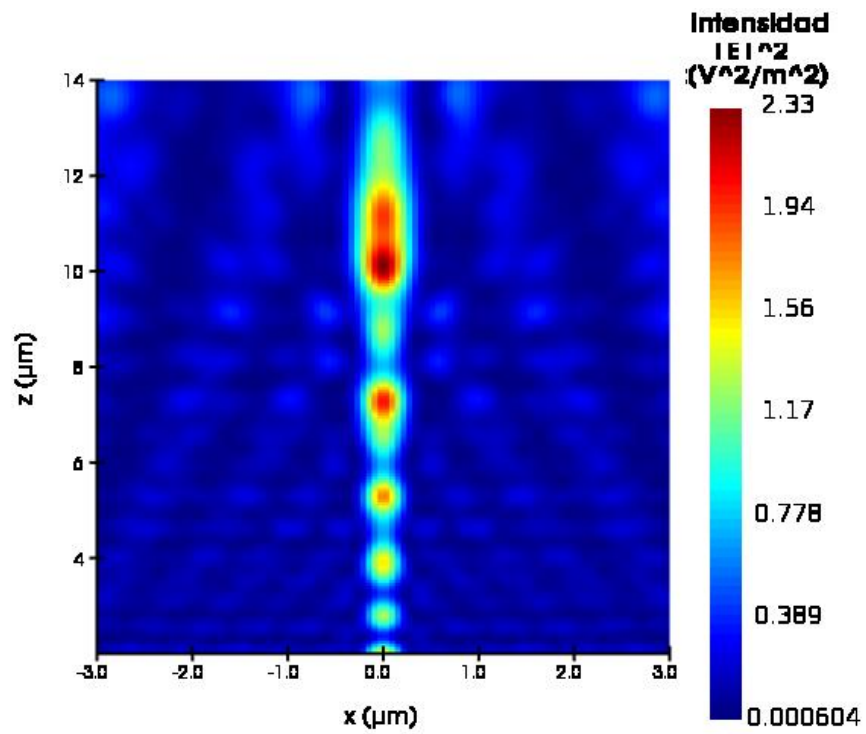


Figura 3.26.- Patrón de intensidad de luz enfocada por el meta-espejo en el plano X - Z (en $y = 0$).

También se muestra un corte en el plano x - z para observar si mantenía concentrada la luz en el punto focal lo cual se muestra en la Figura 3.26.

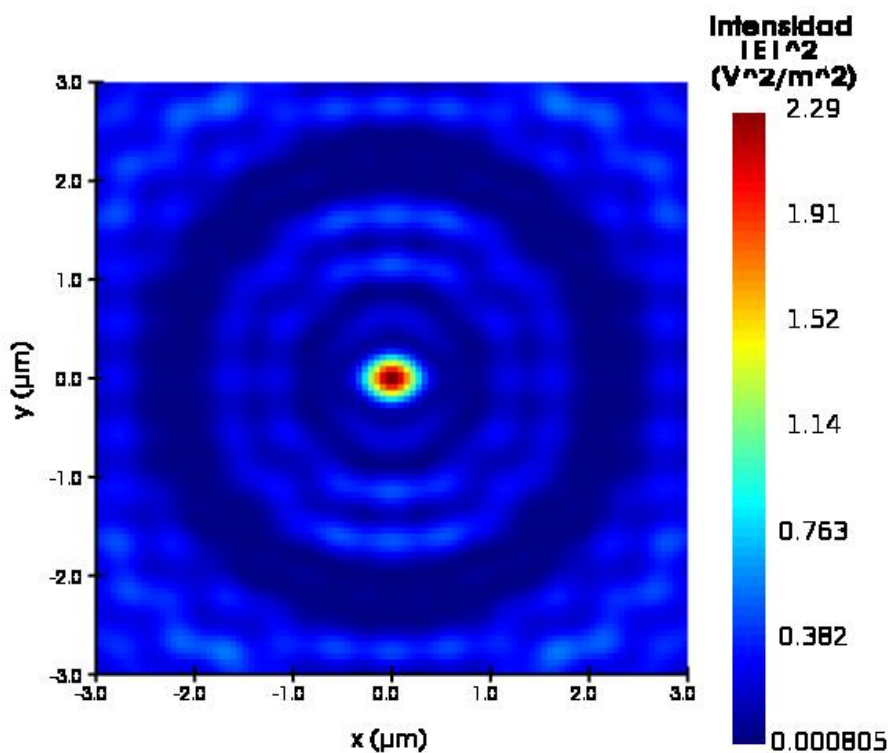


Figura 3.27.- Intensidad de luz del meta-espejo en el plano X-Y

3.5. Ensamble de la metalente TIR

El propósito de este estudio consiste en simular y analizar una metalente de reflexión total interna (TIR) con el objetivo de concentrar la radiación en un punto focal. Para lograrlo, es crucial configurar el arreglo final. Es imperativo que exista una interfaz entre la metalente y el meta-espejo anular. Además, se requiere un material en el que la luz reflejada por el meta-espejo colisione con la superficie del sustrato, dando lugar al fenómeno de TIR, que guía los rayos hacia el detector ubicado en el centro de la base del meta-espejo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.5.1. Configuración de metalente TIR.

Se hizo el ensamble de las dos componentes anteriores (secciones 3.3 y 3.4) para tener la simulación de la metalente TIR, donde se simula el sistema conformado de las dos metasuperficies: la metalente central y un meta-espejo en anillo.

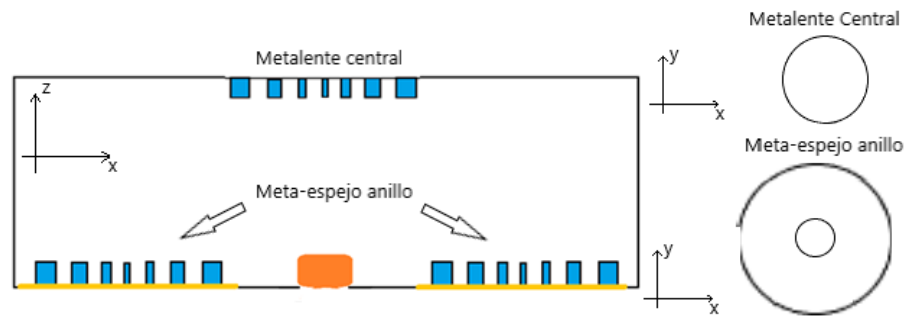


Figura 3.28.- Esquema de simulación de metalente TIR.

Para hacer el diseño de meta-lente TIR nos basamos en la estructura que muestra la Figura 3.28 la cual se compone de una metalente central en modo transmisión, en la parte inferior enfoca la luz que incide hacia el detector. Mientras que la luz que incide en la periferia de la metalente, es dirigida hacia el detector mediante la combinación de dos reflexiones, la primera en un meta-espejo en forma de anillo y después por reflexión total interna en la superficie superior de la placa transparente de grosor t . La propagación del frente de onda incidente se muestra mediante el trazado de rayos de la Figura 3.29. -Esquema del trazado de rayos de la metalente TIR.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

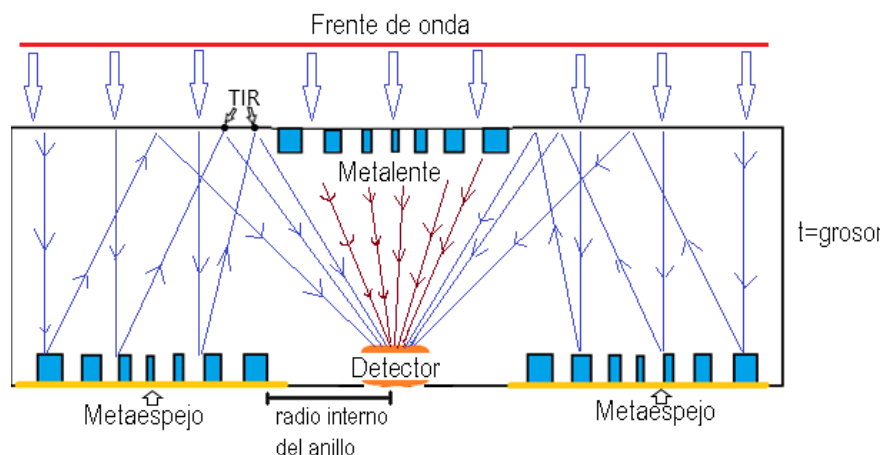


Figura 3.29. -Esquema del trazado de rayos de la metalente TIR.

El detector se coloca a una distancia t , que es el ancho de la metalente TIR, el cual se encuentra en la parte central inferior de la metalente TIR. El detector está orientado al centro del anillo del meta-espejo. La placa transparente donde se adhieren las metasuperficies es del mismo material que la del sustrato, que en nuestro caso es de SiO_2 (dióxido de silicio) para poder tener la reflexión total interna, con índice de refracción 1.4561 en una longitud de onda de 660 nm.

La luz incidente está polarizada en la dirección del eje z , lo cual no tiene repercusión en las simulaciones dado que la incidencia es normal y los meta-átomos usados son cilíndricos, los cuales no son sensibles a la polarización de la luz.

En la Figura 3.29 mostramos el esquema final de la metalente TIR a simular, donde el frente de onda viene en dirección z *negativo*, siendo el frente de onda que viene de arriba hacia abajo, se muestra como una flecha en la Figura 3.30. Además, tenemos que los nano-elementos se muestran de color celeste y la película reflejante del meta-espejo en azul marino. Todo lo demás es sustrato de SiO_2 .

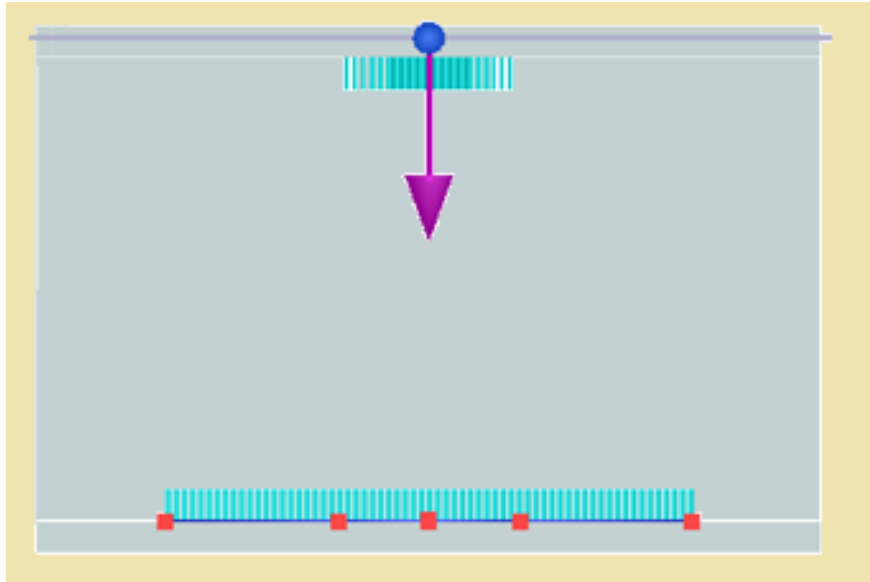


Figura 3.30.- Esquema lateral de la Metalente TIR simulada.

3.5.2. Simulación de metalente TIR

Los resultados obtenidos de la simulación del ensamble de la metalente central en modo transmisión y el meta-espejo se muestran en las siguientes figuras, donde en la Figura 3.31 tenemos la intensidad a lo largo del eje z , y tenemos un punto focal en la base del meta-espejo anillo, como se esperaba desde el diseño inicial.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

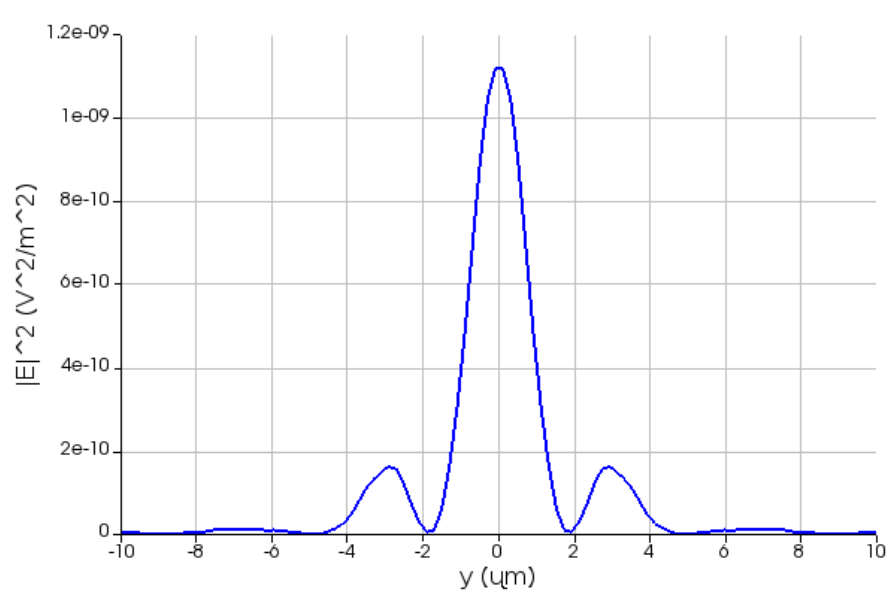


Figura 3.31.- Gráfica de la intensidad de la luz enfocada por la metalente TIR a lo largo del eje Z.

Si hacemos un corte en el plano $x-z$, tenemos que la mayor parte de la luz se concentra en la base de la metalente TIR, justo en donde situamos el detector inicialmente. Para poderlo visualizar mejor, la Figura 3.32 muestra el patrón de intensidad en el plano $x-z$ de la luz enfocada por la metalente TIR.

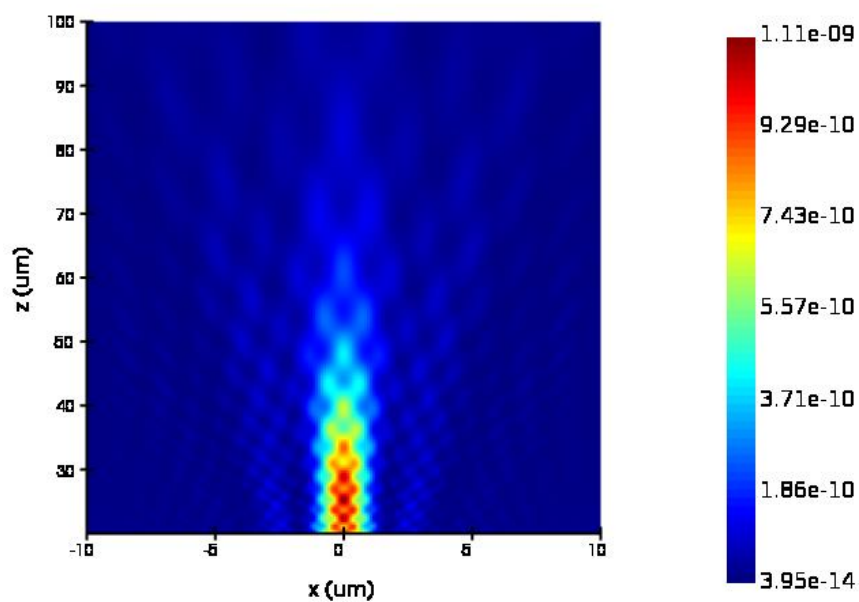


Figura 3.32.- Intensidad de luz del metalente TIR en el plano X-Z.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

No solo es importante el corte en el plano $x-z$, sino también en el plano $x-y$ en el punto focal, para poder ver si la luz está concentrada en un punto. La Figura 3.33 muestra la intensidad en el punto focal donde está el detector, a lo largo del eje y . Observamos que tenemos luz concentrada en un radio muy pequeño en el plano $x-y$, lo cual es muy bueno para nuestra simulación.

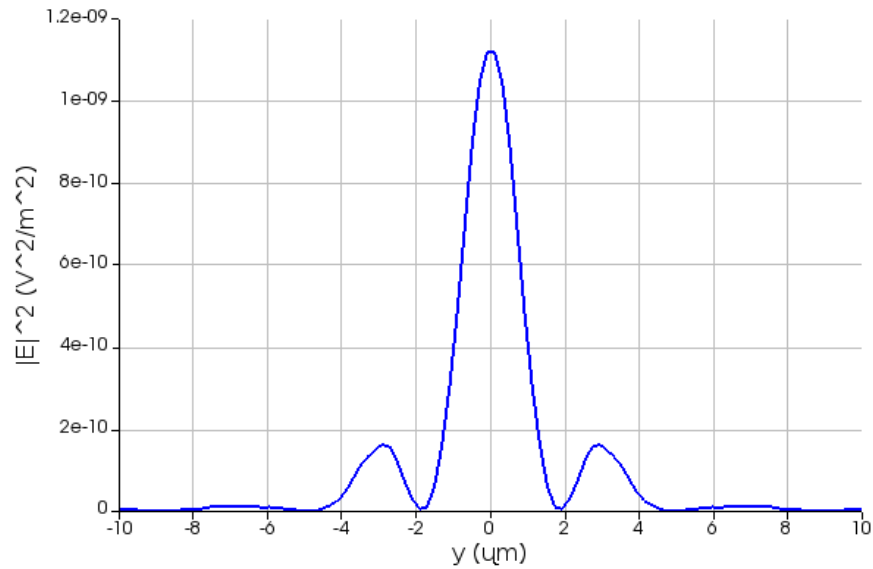


Figura 3.33.- Gráfica de la intensidad de luz en el eje y , en el punto focal producida por la metalente TIR.

Esto se muestra mejor mediante la gráfica de la intensidad de la luz sobre el plano $x-y$ en la Figura 3.34.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

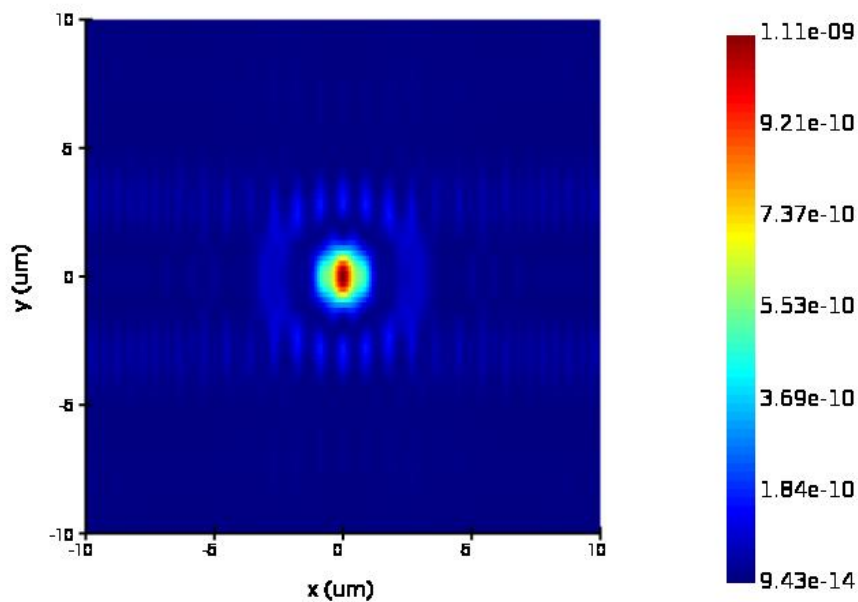


Figura 3.34.- Intensidad de luz del metalente TIR en el plano x - y en el punto focal.

Para ver el video final de la simulación de la metalente TIR, se creó un código QR que se muestra en la Figura 3.35, que los llevará a un link de Youtube.



Figura 3.35.- QR de link del video de la simulación de la propagación de luz en la metalente TIR.

En el video de la simulación final, nos muestra claramente cómo el frente de onda es redirigido hasta el punto que asignamos donde estará ubicado el sensor.

Capítulo 4

Conclusiones

Logramos hacer la simulación de un sistema compuesto que integra una metalente central y un meta-espejo con superficie reflectiva en la base de los nano-elementos. Se simula por partes y ya teniendo los dos casos, pudimos hacer el ensamble de ambos, para poder hacer la simulación de la metalente TIR, que aún no ha sido reportada en la literatura especializada hasta el momento de la redacción de esta tesis.

Se logró enfocar la luz mediante los dos elementos de la metalente TIR, el metalente central y el meta-espejo anillo. Además de que se logró el enfoque de la luz con reflexión total interna. Para lo cual se presentará los patrones de intensidad de la luz enfocada en el detector.

Los resultados pueden ser útiles en futuras aplicaciones teniendo la base de la programación de nuestra simulación, se puede modificar el perfil de fase y diseñar microlentes y/o micro-espejos. Algo relevante de nuestro trabajo, es que el uso práctico de nuestra investigación es el inicio para la fabricación de un micro-detector. En la simulación se puede variar la distancia focal, materiales con lo que se construye la metalente y nanoelementos, el perfil de fase y la geometría de los nanoelementos, como es la altura y radio de los nanoelementos.

También una parte relevante, es que con una simulación se puede tener grandes ahorros en el diseño de dicho micro-detectores, pues se puede predecir el

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

enfoque de la luz por una metalente TIR para tener una mayor eficiencia de un detector ultracompacto.

El futuro de la óptica en la actualidad es en el desarrollo de mejores tecnologías e instrumentos ópticos ultracompactos, que tengan una mayor y mejor eficiencia en el manejo de la luz y creemos que nuestro trabajo ayuda mucho al desarrollo de la misma.

Bibliografía

- [1] Hecht. (2000). *Óptica*. Addison Wesley.
- [2] Luo, X. (2019). Engineering Optics 2 (A Revolution in Optical Theories, Materials, Devices and systems). Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- [3] Wenwei Liu, H. C. (2020). Diffractive metalens: from fundamentals, practical applications to current trends. *Advances in Physics: X*, 35. doi: <https://doi.org/10.1080/23746149.2020.1742584>.
- [4] Luo, X. (2019). Engineering Optics 2 (A Revolution in Optical Theories, Materials, Devices and systems). Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- [5] M. Khorasaninejad, F. C. (2017, 10 5). Metalenses: Versatile multifunctional photonic components. *Science*, 358. doi: <https://doi.org/10.1126/science.aam8100>.
- [6] Moreno, I., Avendaño-Alejo, M., & Castañeda-Almanza, C. P. (2020). Nonimaging metaoptics. *Optics Letters*, 45(10), 2744-2747. <https://doi.org/10.1364/OL.391357>.
- [7] Xiao Fu, H. L. (2021). Metalenses: from design principles to functional applications. *Front. Optoelectron.* 14, 170–186 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12200-021-1201-9>
- [8] Moreno, I. (2022). Optics of the metalens. *Eur. J. Phys.* 43 065302. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac93c8>
- [9] Bryan Ng. (30 DE 06 DE 2023). <https://wavelength-oe.com/>. Obtenido de Wavelength Opto-electronics: <https://wavelength-oe.com/es/articles/precision-optics/>
- [10] Shalaginov, M. Y., An, S., Yang, F., Su, P., Lyzwa, D., Agarwal, A. M., ... & Gu, T. (2020). Single-element diffraction-limited fisheye metalens. *Nano Letters*, 20(10), 7429-7437. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02783>
- [11] Aieta, F. B. (2012). Metalenses: A new frontier in optics. *Nature Photonics*, 641-647.

ANEXOS

- [12] Meiyan Pan, fei Fu, Mengjie Zheng, Hao Chen, Yujia Zang, Huigao Duan, Qiang Li, Min Qiu & Yueqiang Hu. Dielectric metalens for miniaturized imaging systems: progress and challenges. *Light Sci Appl.* 11, 195 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00885-7>
- [13] Ansys Optics. (2023, 02 22). Retrieved from <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360034914633-Finite-Difference-Time-Domain-FDTD-solver-introduction>.
- [14] Tan, C. (1998, Enero). Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 223, 158-163. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00438-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9)
- [15] Barker Jr, A. S., & Ilegems, M. (1973). Infrared lattice vibrations and free-electron dispersion in GaN. *Physical Review B*, 7(2), 743. doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.7.743>

Anexos

Anexo 1.- Requerimientos del sistema para simular con Lumerical.

Información sobre especificaciones de hardware

En este artículo, tenemos la intención de brindar algunos consejos y pautas generales para los usuarios que buscan comprar hardware nuevo, o que simplemente están interesados en comprender cómo ciertos componentes de hardware de la computadora pueden afectar la velocidad de las simulaciones FDTD en una sola estación de trabajo.

Tamaño de memoria (RAM)

El tamaño de la memoria determina el tamaño del diseño o proyecto de simulación que se puede ejecutar en la computadora. No afecta la velocidad de la simulación siempre que toda la simulación pueda caber en la RAM; de lo contrario, la computadora puede verse obligada a cambiar la memoria al disco duro (o la aplicación proporcionará un error). Si se produce un intercambio, la velocidad de simulación será extremadamente lenta.

Las computadoras de escritorio hoy en día suelen tener entre 8 y 32 GB de RAM, que es suficiente para ejecutar una gran parte de las simulaciones. Las estaciones de trabajo suelen tener entre 32 y 128 GB de RAM, que es suficiente para ejecutar casi todas las simulaciones. Puede verificar cuánta memoria se requiere para ejecutar una simulación desde FDTD.

Ancho de banda de memoria (RAM)

Durante una simulación FDTD, se deben transferir continuamente grandes cantidades de datos entre la RAM y la CPU. Cuando el bus de memoria no puede transferir datos lo suficientemente rápido, el procesador se ve obligado a esperar, lo que limita la velocidad general de su simulación. Por ejemplo, en una computadora de escritorio típica con 8 núcleos, la velocidad de simulación puede aumentar en un

ANEXOS

factor de 2 a 3 veces cuando se usan ocho núcleos en comparación con un núcleo. Por lo tanto, al comprar una computadora, es muy importante tener un ancho de banda de memoria rápido.

Recuento de núcleos de CPU

FDTD Solutions intentará utilizar todos los núcleos de su CPU para ejecutarse lo más rápido posible. Sin embargo, como aprendimos anteriormente, la simulación FDTD tiene un ancho de banda de memoria limitado, por lo que agregar más núcleos no siempre hace que la simulación sea más rápida. La aceleración que la mayoría de los usuarios ven cuando se cambian a CPU con mayor número de núcleos se debe con mayor frecuencia a otras mejoras (relacionadas con la memoria) en la arquitectura de la CPU.

La mayoría de las CPU admiten hiperprocesamiento, lo que permite que el sistema operativo trate cada núcleo físico de la CPU como dos núcleos lógicos. Esta función no proporciona ningún aumento de velocidad para las simulaciones FDTD porque el cuello de botella del rendimiento general es la tasa de transferencia de datos entre la CPU y la RAM, no la capacidad informática real de los núcleos.

Velocidad de reloj de la CPU

La velocidad del reloj de la CPU no suele ser el factor más importante para las velocidades de simulación de FDTD. Si bien una velocidad de reloj más rápida permite que cada núcleo se ejecute más rápido, la velocidad de simulación general está limitada por el acceso entre la CPU y la RAM.

Estaciones de trabajo con múltiples CPU

Las estaciones de trabajo con varias CPU son una buena manera de aumentar la velocidad de la simulación. El factor más importante es que cada CPU tiene su propia conexión de bus de memoria a la RAM. Como se explicó anteriormente, la velocidad de transferencia de datos entre la CPU y la RAM es el cuello de botella del

ANEXOS

rendimiento, por lo que tener un bus de memoria por CPU permite escalar muy bien la velocidad de simulación con la cantidad de CPU.

Ejemplo:

El Intel Xeon Gold 5115 tiene un ' Maximum memory bandwidth' de 107 GB/s. Se pueden instalar hasta 4 de estos procesadores en una sola estación de trabajo, lo que daría un ancho de banda total de $4 \times 107 = 430$ GB/s. Para lograr un rendimiento óptimo, se deben utilizar módulos de memoria DDR4-2400.

Referencias:

- Procesador Intel Xeon Gold 65
- Especificaciones del procesador Xeon Gold 5115 63
- Procesadores Intel Xeon - Análisis de valor 65

Clusters (múltiples computadoras en una red)

En aplicaciones donde una sola computadora no es suficiente, se pueden conectar varias computadoras a través de una red para formar un "clúster". FDTD Solutions admite 2 modos cuando se ejecuta en un clúster: ejecutar varias simulaciones en una red (es decir, un barrido u optimización) y ejecutar una sola simulación grande en varias computadoras .

Velocidad y latencia de la red

Cuando se ejecuta una simulación localmente en una sola computadora, la velocidad de la red no tiene ningún efecto sobre la velocidad de la simulación.

Cuando se ejecuta una simulación de forma remota en una sola computadora, o se ejecutan varias simulaciones en un clúster (es decir, un barrido u optimización), la latencia de la red no tiene efecto en la velocidad de la simulación y la velocidad de la red solo afectará la rapidez con la que se pueden recuperar los resultados.

ANEXOS

Cuando se ejecuta una sola simulación grande en varias computadoras, la velocidad de la red es extremadamente importante; en tales casos, se recomiendan interconexiones de baja latencia y alta velocidad, como InfiniBand.

Computación en la nube

Puede utilizar los servicios de computación en la nube para evaluar el hardware más reciente antes de tomar una decisión de compra, o en los casos en que una inversión en hardware a largo plazo no tenga sentido:

Servicios web de Amazon: Tipos de instancia "Propósito general" y "Optimizado para computación". Ejecución de soluciones FDTD en AWS.

Microsoft Azure: Tipos de instancias: "Propósito general", "Computer Optimized" y "High Performance Computing". Ejecución de soluciones FDTD en Microsoft Azure.

más ...

Soporte de GPU

Lumerical FDTD no admite aceleración/procesamiento de GPU. La GPU solo se usa para visualización y renderizado CAD. No afecta el rendimiento de la simulación.

Notas: Todos los ejemplos anteriores no pretenden ser patrocinios de estos modelos o marcas. Son simplemente ejemplos utilizados para ilustrar los puntos descritos en la página.

ANEXOS

Anexo 2.- Código de programación para formación de metalente.

```
deleteall;
```

```
#####
#####
```

```
# Paso 1. Carga el archivo de “the phase vs. Radius” de la previa simulación de la
celda unitaria.
```

```
# Paso 2. Especifica el perfil de fase y las condiciones iniciales.
```

```
# Paso 3. Calcula el radio a partir del perfil de fase para dar la posición a los
nanoelementos.
```

```
# Paso 4. Construye la lente completa usando los resultados del archivo “the radius
vs. Position”
```

```
#####
#####
```

```
#Paso 1: Carga el archivo “the phase vs. duty cycle” de la simulación de la celda
unitaria.
```

```
# Las variables que se tomarán del archivo seran:
```

```
# wavelenght, period, height, radius, phase, mat_pillar,index_pillar,
mat_sub,index_sub
```

```
loaddata(phase_data_filename);
```

```
if (%make plot==1) {
```

```
    plot(radius*1e6,phase,'Radius (um)', 'Phase (rad)', 'Phase vs.
Radius', 'linewidth=2');
```

```
    setplot("x min",min(radius*1e6));
```

```
    setplot("x max",max(radius*1e6));
```

ANEXOS

```

    legend("");
}

# Paso 2: Define el perfil de fase
f = %focal length%;
np = round(%lens radius%/period);
x_mask = period*(-np:1:np);
y_mask = period*(-np:1:np);

phase_target = -mod((2*pi/wavelength)*(sqrt(x_mask^2+f^2)-f),2*pi);
# La lente hiperbólica asume un desfase de 2pi
phase_target = phase_target - min(phase_target );

if (%make plot==1) {
    plot(x_mask*1e6,phase_target,"Position (microns)","Phase (rad)","Target phase
vs. position","linewidth=2");
    legend("");
}

# Paso 3: Obtenemos el archivo de “the radius vs. Position” deseado dependiendo
del perfil # de fase
radius_mask = interp(radius,phase,phase_target);
if (%make plot==1) {
    plot(x_mask*1e6,radius_mask*1e6,"Position (um)","Radius (um)","Radius vs.
position","linewidth=2");

```

ANEXOS

```

    setplot("y max",1.1*max(radius_mask*1e6));
    setplot("y min",min(radius_mask*1e6));
    legend("");
}

```

```

# Paso 4: Crea la estructura

```

```

addrect; # substrate
set("name", "substrate");
set("material",mat_sub);
if (mat_sub=="<Object defined dielectric>") {
    set("index",index_sub);
}
set("x span",3*max(x_mask));
set("y span",3*max(x_mask));
set("z max",0);
set("z min",-2*wavelength);

```

```

# Empieza a escribir el GDS

```

```

if(make_gds==1){
    fgds=gdsopen(gds_fname);
    gdsbegincell(fgds,'pillars');# create a cell
}

```

```

# Hacer un ciclo para los pilares

```

```

for(i=1:2*np+1) {

```

ANEXOS

```

for (j=1:2*np+1) {
    r = sqrt(x_mask(i)^2+y_mask(j)^2);
    if (r <= %lens radius%) {
        addcircle({"name":"pillar",
"x":x_mask(i),"y":y_mask(j),"radius":radius_mask(find(x_mask,r))});

        #Add to gds as required
        if(make_gds==1){

gdsaddcircle(fgds,'1:0',x_mask(i),y_mask(j),radius_mask(find(x_mask,r)),64);
        }
        }
    }
}

# Cierra el archivo GDS
if(make_gds==1){
    gdsendcell(fgds);# finish the current cell
    gdsfclose(fgds);# close the current .gds file}
}

selectpartial("pillar");
set("material",mat_pillar);
if (mat_pillar=="<Object defined dielectric>") {
    set("index",index_pillar);

```

ANEXOS

}

set("z min",0);

set("z max",height);

set("detail",min([0.5,%pillar rendering detail%]));