

DISEÑO DE ANTENAS DUALES DE THZ Y VISIBLE CON CONFINAMIENTO EXTREMO DE CAMPO ELÉCTRICO

Vicente Espí Albiñana

Tutor: Alejandro José Martínez Abietar

Cotutor: Ángela Inmaculada Barreda Gómez

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 1 de diciembre de 2020

Índice

1.	Introducción	4
2.	Desarrollo del proyecto	7
3.	Nanoantena Bow-tie	9
	3. 1. Búsqueda del periodo	12
	3. 2. Modificación de la Bow-tie.....	13
	3. 2. 1. Diversidad de respuestas para diferentes esquemáticos.....	15
4.	Introducción de la rendija	16
	4. 1. Diseño de la rendija	17
	4. 1. 1. Rendija rectangular con sustrato de aire.....	18
	4. 1. 2. Rendija rectangular con sustrato de Silicio	19
	4. 1. 3. Rendija rectangular con sustrato de Cuarzo.....	20
	4. 2. Diseño de la rendija improvisada	21
	4. 2. 1. Diversidad de respuestas para diferentes esquemáticos.....	22
5.	Adaptación de la rendija con la antena Bow-tie.....	25
	5. 1. Comparación de todos los modelos diseñados.....	32
6.	Comparación con la Antena Dual EPFL.....	34
	6. 1. Optimización del diseño estudiado	37
7.	Simulación de todo el sistema a frecuencias THz	40
8.	Conclusión	43
9.	Bibliografía	44

Resumen

Este proyecto lo que pretende conseguir es la creación y fabricación de una nanoantena para poder detectar y analizar señales en THz. Las ondas de Terahercios (THz) se ubican entre microondas e infrarrojos en el espectro de frecuencia de luz, pero debido a su baja energía, los científicos no han podido aprovechar su potencial. El enigma se conoce en los círculos científicos como la brecha de terahercios. Ser capaz de detectar y amplificar ondas THz abriría una nueva era de tecnologías médicas, de comunicaciones, satelitales, cosmológicas y de otros tipos. El TFG se realiza en el marco del Proyecto Europeo THOR: Uno de los roles de NTC [1] es diseñar cavidades o antenas duales, en el sentido que a baja iluminación consiga altos valores de $|E|^2$ en regiones nanométricas. La idea es, crear un detector que consiga altos valores de $|E|^2$ en dichas regiones donde estarán situadas las moléculas que absorberán la radiación del haz de luz y se pondrán a vibrar consiguiendo así, por efecto Raman, modificar la luz del visible que también está muy confinada en la misma región nanométrica. Al modificar esa luz del visible, podremos detectar la vibración y por tanto, la radiación de THz.

Summary

What this project aims to achieve is the creation and manufacture of a nano-antenna to be able to detect and analyze signals in THz. Terahertz (THz) waves fall somewhere between microwave and infrared in the frequency spectrum of light, but due to their low energy, scientists have not been able to harness their potential. The conundrum is known in scientific circles as the terahertz gap. Being able to detect and amplify THz waves would open a new era in medical, communications, satellite, cosmological and other technologies. The TFG is carried out within the framework of the European THOR Project: One of the roles of NTC [1] is to design cavities or dual antennas, in the sense that at low illumination it achieves high values of $|E|^2$ in nanometric regions. The idea is to create a detector that achieves high values of $|E|^2$ in these regions where the molecules that will absorb the radiation from the light beam will be located and will vibrate, thus achieving, by means of the Raman effect, modifying the visible light which is also very confined to the same nanometric region. By modifying that visible light, we will be able to detect the vibration and therefore, the THz radiation.

Resum

Aquest projecte el que pretén aconseguir és la creació i fabricació d'una nanoantena per poder detectar i analitzar senyals en THz. Les ones de terahertz (THz) se situen entre microones i infrarojos en l'espectre de freqüència de llum, però a causa de la seva baixa energia, els científics no han pogut aprofitar el seu potencial. L'enigma es coneix en els cercles científics com la bretxa de terahertz. Ser capaç de detectar i amplificar ones THz obriria una nova era de tecnologies mèdiques, de comunicacions, per satèl·lit, cosmològiques i d'altres tipus. El TFG es realitza en el marc de el Projecte Europeu THOR: Un dels rols de NTC [1] és dissenyar cavitats o antenes duals, en el sentit que a baixa il·luminació aconseguixi alts valors de $|E|^2$ en regions nanomètriques. La idea és, crear un detector que aconseguixi alts valors de $|E|^2$ en aquestes regions on estaran situades les molècules que absorbiran la radiació de el feix de llum i es posaran a vibrar aconseguint així, per efecte Raman, modificar la llum de l'visible que també està molt confinada en la mateixa regió nanomètrica. A l'modificar aquesta llum de l'visible, podrem detectar la vibració i per tant, la radiació de THz.

1. Introducción

La generación, manipulación y detección de ondas electromagnéticas en todo el espectro de frecuencias es la piedra angular de las tecnologías modernas. A lo largo de los años ha habido una gran evolución de los dispositivos que operan a frecuencias por debajo de 0.1 THz y por encima de los 50 THz, dejando así, una gran banda de frecuencias sin evaluar llamada “Brecha de THz”. Esta banda se encuentra en la región de 0.3 a 30 THz del espectro, para la que no existen fuentes ni detectores rentables a pesar de que su aplicación tiene un enorme potencial en medicina, seguridad, astronomía y comunicación inalámbrica. En este proyecto, demostraremos el primer detector a nanoescala, rentable, rápido y de bajo ruido que trabaja a temperatura ambiente en el rango de 1 a 30 THz. Esto será posible gracias a un estudio paralelo a nuestro proyecto mediante el desarrollo de un concepto radicalmente nuevo de conversión ascendente de señal a visible (VIS) y/o a la región espectral del infrarrojo cercano (NIR) aprovechando los últimos avances científicos en el nuevo campo de la optomecánica de cavidades moleculares [2]. En particular, se utilizarán moléculas con gran actividad vibratoria IR y Raman en ese rango de THz para integrarlas en nanocavidades y picocavidades plasmónicas.

Este proyecto surge de un análisis concienzudo de la literatura que no ha sido realizado por nadie anteriormente. El TFG se realiza en el marco del Proyecto Europeo THOR [3]. Uno de los objetivos de NTC es diseñar cavidades o antenas duales. La principal idea de este proyecto consiste en habilitar una antena mediante la creación y optimización de una nueva estructura, que sea capaz de conseguir una alta intensidad de THz ($|E|^2$) en la región donde pondremos las moléculas. Estas absorberán esa radiación y se pondrán a vibrar, lo que modificará la luz del visible que también está muy confinada en la misma región nanométrica por efecto Raman. Al modificar esa luz del visible, podremos detectar la vibración, y por tanto, la radiación en THz.

El proyecto, está basado en antenas de THz, solo que con una pequeña variación, en este modelo hemos introducido una antena Bow-tie en la zona del visible, para poder conseguir un mayor incremento del campo eléctrico. La idea es conseguir mediante variaciones del periodo, de la longitud de onda, de las dimensiones de nuestra antena y de sus componentes, poder alcanzar la respuesta deseada y a partir de ella poder optimizar el modelo al máximo.

El detector a nanoescala, consta de un sustrato de PMMA. El PMMA es un polímero termoplástico altamente transparente que se obtiene de la polimerización del monómero metilmetacrilato. Debido a su transparencia, estética y resistencia a los rasguños, el PMMA se puede considerar como una alternativa ligera al cristal. Sobre el centro de dicha superficie irá situada la antena Bow-tie, se utilizará el oro como material para las Bow-ties, ya que, este material posee un alto valor de conductividad y nos será de gran ayuda para conseguir una alta intensidad en el gap de la antena. Esta antena Bow-tie formada por dos pequeños triángulos de oro, será la principal característica del proyecto, porque dependiendo de su posición de sus dimensiones y del tipo de simulaciones que se realicen, el resultado puede ser completamente distinto, como se verá más tarde en el desarrollo del proyecto.

El mayor objetivo es conseguir un alto valor de campo eléctrico en el gap de la Bow-tie para, de este modo, convertir esa radiación de THz a una radiación del visible que se pueda detectar con detectores convencionales. Esta es la base del funcionamiento del nanodetector.

Este proceso ocurre por la interacción que existe entre la luz y la materia. De la misma forma que una mano con una púa percute las cuerdas de una guitarra, la energía de la luz puede activar las vibraciones de un determinado enlace químico de una molécula. Este fenómeno se denomina interacción optomecánica.

La espectroscopia infrarroja [4] explota el hecho de que las moléculas absorben las frecuencias que son características de su estructura. Estas absorciones ocurren en frecuencias de resonancia, es decir, la frecuencia de la radiación absorbida coincide con la frecuencia de vibración. Las frecuencias de resonancia también están relacionadas con la fuerza del enlace y la masa de los átomos en cada extremo del mismo. Por lo tanto, la frecuencia de las vibraciones está asociada con un modo de movimiento normal particular y un tipo de enlace particular. Para que un modo de vibración en una muestra este “IR activo” debe asociarse con cambios en el momento del dipolo. Las moléculas diatómicas simples tienen un solo enlace y una sola banda vibracional. Si la molécula es simétrica, la banda no se observa en el espectro IR, sino solo en el espectro Raman.

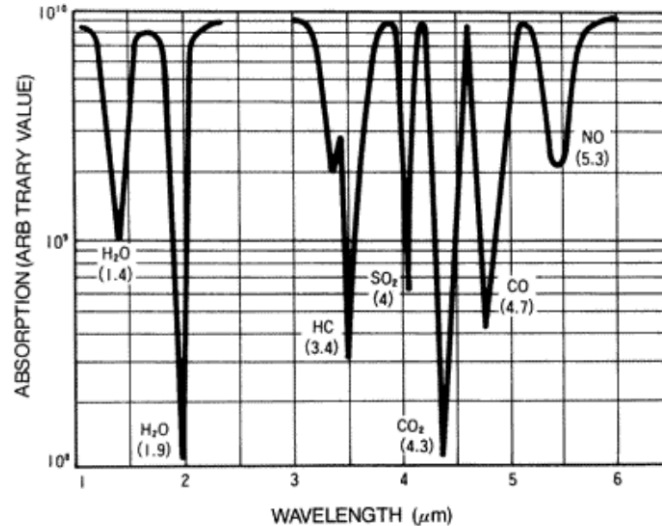


Figura 1. Espectroscopia infrarroja [5]

La espectroscopia Raman [5, 6] proporciona una información similar a la espectroscopia infrarroja pero esta se basa en los fenómenos de dispersión inelástica o de Raman. El efecto Raman es una dispersión inelástica de un fotón. Cuando la luz es dispersada de un átomo o una molécula, la mayoría de los fotones son dispersados elásticamente (Dispersión de Rayleigh). Los fotones dispersados tienen la misma energía y, por lo tanto, la misma longitud de onda que los fotones incidentes. Sin embargo, una pequeña fracción de la luz es dispersada ópticamente a frecuencias diferentes, mayormente inferiores, que la frecuencia de los fotones incidentes.

La dispersión Raman: Stokes y anti-Stokes

La interacción de la luz con la materia en un régimen lineal permite simultáneamente la absorción y la emisión de la luz que se ajusta a los niveles de energía ya definidos por los electrones. El efecto Raman corresponde en la teoría de perturbaciones de la mecánica cuántica a la absorción y consecuente emisión de un fotón mediante el cambio de estado inmediato de un electrón, pasando por un estado virtual. Entonces existen las siguientes posibilidades:

- No existe intercambio de energía entre los fotones incidentes y las moléculas y, por lo tanto, no existe efecto Raman.
- Los cambios de energía se producen entre los fotones incidentes y las moléculas. Las diferencias de energía son iguales a las diferencias de los estados vibracionales o rotacionales de la molécula.
- Las moléculas absorben la energía: a esto se le denomina dispersión Stokes. El fotón resultante es de inferior frecuencia y genera una línea de Stokes en el lado del espectro incidente.
- La molécula pierde energía: dispersión anti-Stokes. Los fotones incidentes son desplazados a frecuencias más elevadas de espectro, y generan por lo tanto una línea que se denomina anti-Stokes.

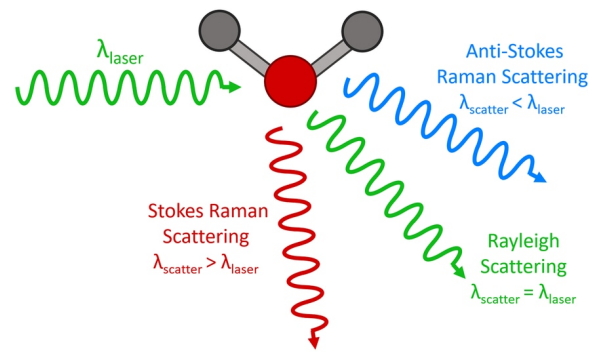
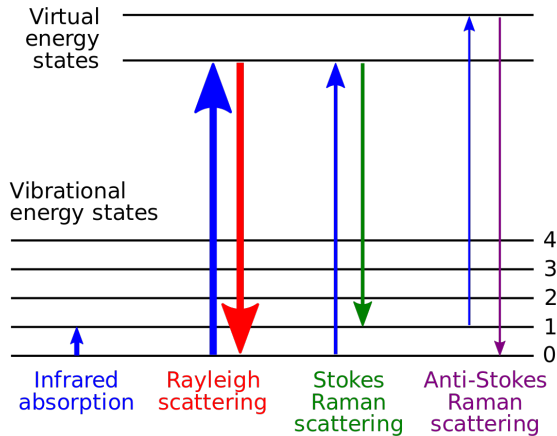


Figura 2. Diagrama de nivel de energía [6]

Figura 3. Interacci3n de la luz con una mol3cula [7]

Con la ayuda de estos fen3menos se pretende fabricar un nuevo detector de THz, totalmente distinto que los detectores de THz actuales comerciales, los cuales son caros, lentos y funcionan a temperaturas criog3nicas. Adem3s, el funcionamiento de estos detectores no est3 basado ni en espectroscopia IR ni Raman.

En este proyecto adem3s de explicar detalladamente el desarrollo de nuestra nanoantena, tambi3n se va a realizar una comparaci3n con un proyecto alternativo que sigue los mismos objetivos.

2. Desarrollo del proyecto

Para este proyecto se ha desarrollado tres pasos principales con los que con su debido seguimiento llegaríamos a conseguir nuestra nanoantena para la banda de THz. Los tres pasos son los siguientes y todos ellos son muy amplios, ya que, se tiene que realizar un estudio basado en las simulaciones de varias estructuras en cada caso. En este capítulo se realiza una introducción un tanto superficial, para más tarde poder centrarse de lleno en la explicación de cada uno de estos apartados.

1. Simulación y optimización de una única nanoantena Bow-tie

En este primer paso se ha diseñado la primera estructura, formada por un sustrato de PMMA y una nanoantena Bow-tie, que se describirá más tarde con más detalle. El objetivo de esta nanoantena Bow-tie es conseguir un alto confinamiento de campo en el gap a la longitud de onda del visible. Donde se modulará la señal absorbida de THz mediante el efecto Raman. A partir de esta estructura, se continúan realizando diseños para optimizar la nanoantena. Como se puede observar en las siguientes imágenes, este sería el formato sencillo de la primera estructura. Una segunda estructura a estudiar sería la que aparece en las figuras 6, 7; en estas figuras se puede observar la misma estructura pero suprimiendo la nanoantena Bow-tie. Este factor es el más importante para la optimización del nanodetector, ya que, se van a obtener los resultados mediante la comparación de ambos diseños para determinar como influye la antena Bow-tie en el confinamiento de campo eléctrico. Todo esto se explicará más adelante.

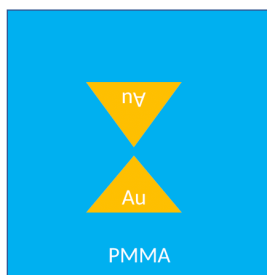


Figura 4. Sustrato más Bow-tie (Planta)

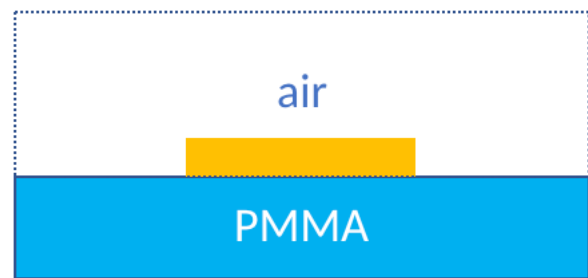


Figura 5. Sustrato más Bow-tie (Alzado)



Figura 6. Vista de la planta del sustrato



Figura 7. Vista del alzado del sustrato

2. Optimización cuando la nanoantena está dentro de la rendija

El segundo paso, consiste en introducir una rendija en el diseño. El objetivo es conseguir estructuras que permitan un alto confinamiento de campo en el IR/THz con el objetivo final de alcanzar la banda frecuencial entre 1-30 GHz. Para ello se ha escogido una rendija en un plano metálico. Este diseño está pensado para más tarde poder introducir la Bow-tie en el interior de la rendija. Con esto se consigue, mediante la antena rendija una respuesta para el THz y mediante la antena Bow-tie una respuesta en el visible. En este diseño, también se va a realizar la comparación respecto a la estructura sin Bow-tie, como se ha visto anteriormente.

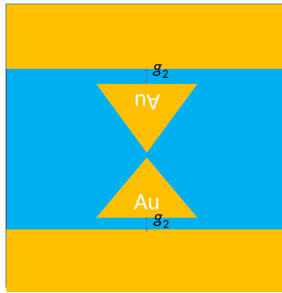


Figura 8. Sustrato más Bow-tie más rendija (Planta)

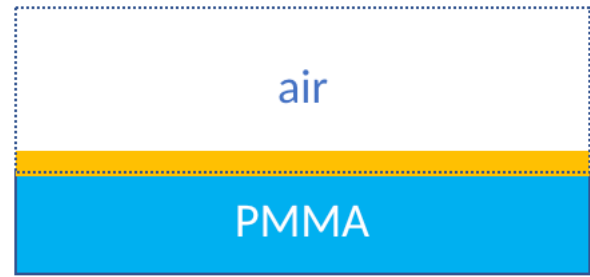


Figura 9. Sustrato más Bow-tie más rendija (Alzado)



Figura 10. Sustrato más la rendija (Planta)



Figura 11. Sustrato más la rendija (Alzado)

Hay que realizar un estudio detallado de todas la estructuras diseñadas, con tal de realizar una buena comparación de todas ellas y analizar la influencia de cada componente para más tarde diseñar el nanodetector óptimo. Las dimensiones de cada una de las estructuras se mostrarán con detalle más adelante.

3. Simulación de todo el sistema a frecuencias THz

En este último paso, la idea principal es haber conseguido la estructura optima con su rendija y su antena Bow-tie, para poder realizar una simulación completa de todo el sistema a frecuencias THz. El propósito de este proyecto es conseguir crear un detector a nano escala para poder analizar las radiaciones en THz como alternativa de los detectores convencionales. Para ello, se utilizará esta estructura final, donde se juntan ambas antenas, la antena rendija con la antena Bow-tie sobre el sustrato de PMMA. La siguiente figura, corresponde a una imagen orientativa de cómo podría ser el nanodetector final.

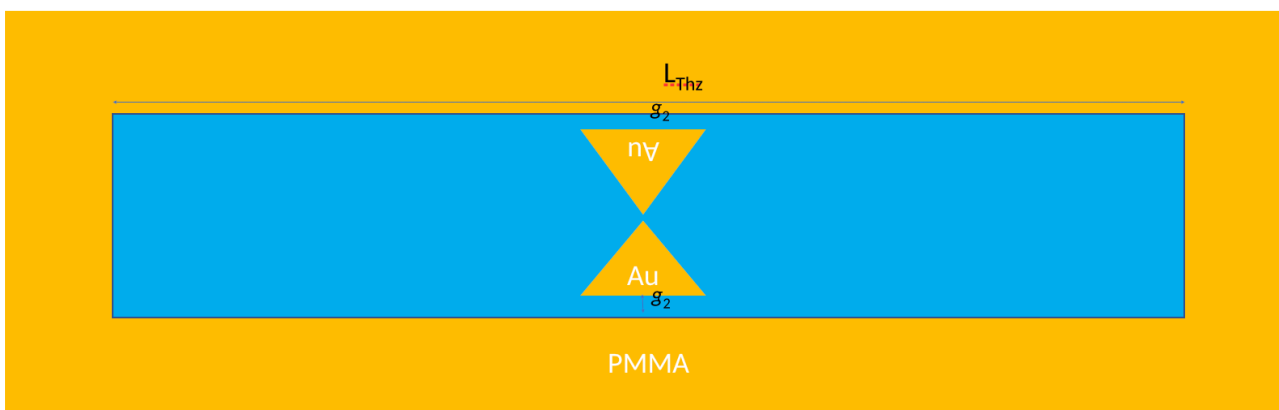


Figura 12. Sistema completo a frecuencias THz

3. Nanoantena Bow-tie

Las Nanoantenas son receptores de ondas electromagnéticas muy pequeños. La esencia del funcionamiento de estos dispositivos, es aprovechar la energía de esa onda que se transmite y convertir esas ondas electromagnéticas en corriente.

“Esta tecnología funciona para cualquier longitud de onda y cualquier frecuencia, para cualquier tipo de onda electromagnética. Y como la luz es también una onda electromagnética, entonces podemos utilizar antenas para capturar radiación luminosa.” Doctor Francisco Javier González Contreras.[\[17\]](#)

El tamaño de las antenas está determinado por la frecuencia o la longitud de onda que van a recibir, es decir, que se puede aprovechar desde la luz del visible, pasando por los infrarrojos y por la banda de los THz. Al hablar de “nano” hablamos de antenas que operan en el orden de los terahercios (THz). Actualmente se fabrican mediante serigrafía atómica y se componen de 3 capas, una base reflectante, una cavidad dieléctrica resonante y la propia nanoantena. Su funcionamiento se basa en absorber en forma de resonancia la onda electromagnética que incide sobre la nanoantena. La resonancia inducida genera una corriente alterna con la misma frecuencia que la frecuencia de resonancia inicial en el orden de los THz.[\[8\]](#)

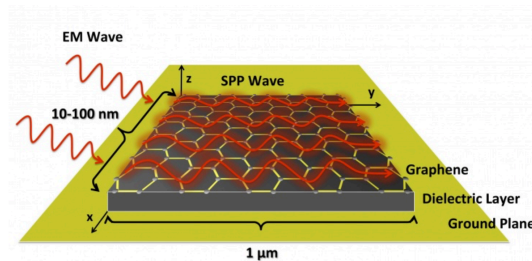


Figura 13. Estructura de una nanoantena. [\[8\]](#)

Una antena Bow-tie es un subtipo común de las antenas bicónicas. Las antenas bicónicas son antenas dipolo de banda ancha, suelen exhibir un ancho de banda de tres octavas o más. Una octava es una banda de frecuencias que se sitúa entre una primera frecuencia y otra que es el doble de esta. En los sistemas de radio, una antena bicónica es una antena de ancho de banda amplio, hecha de dos objetos conductores aproximadamente cónicos, que casi se tocan en sus puntos. La antena Bow-tie esencialmente es una versión bidimensional del diseño biconical que se utiliza a menudo para la recepción de televisión UHF de corto alcance. A veces también se les conoce como antenas de mariposa. La antena bicónica tiene un ancho de banda amplio porque es un ejemplo de estructura de onda viajera; el análisis de una antena infinita teórica se asemeja al de una línea de transmisión. Para una antena infinita, la impedancia característica en el punto de conexión es función únicamente del ángulo del cono y es independiente de la frecuencia. A partir de estas consideraciones Rumsey estableció el siguiente principio: *“Una antena cuya geometría pueda ser descrita únicamente en función de ángulos tendrá un comportamiento independiente de la frecuencia, ya que su geometría no varía al realizar un escalado.”* Un ejemplo de este tipo de estructuras son las antenas bicónicas, formadas por dos conos colineales alimentados por sus vértices y definida por su ángulo de apertura. Sin embargo, para que esta antena sea auténticamente independiente de la frecuencia tiene que ser infinita. [\[9\]](#)

El objetivo que se quiere alcanzar con esta nanoantena Bow-tie es obtener un alto confinamiento de campo en el gap a la longitud de onda del visible (780 nm) sobre la que se va a modular la señal absorbida de THz por el efecto Raman. Esta antena está siendo utilizada en varios estudios que también quieren alcanzar los mismos objetivos, convertir esa radiación en THz a una frecuencia que se puede detectar con dispositivos convencionales. [\[10, 11\]](#)

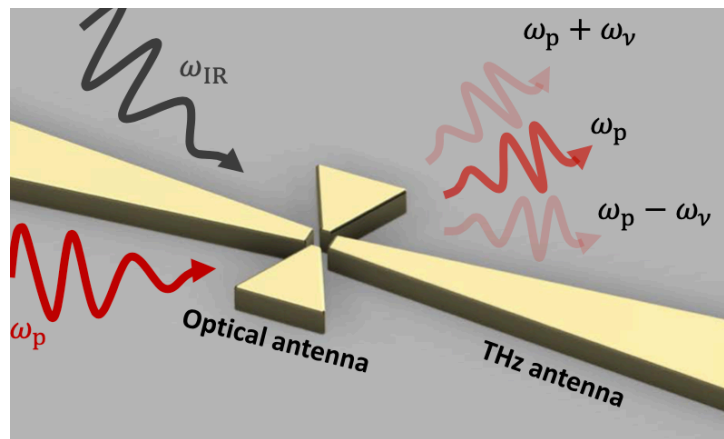


Figura 14. Antena Bow-tie, Diseño EPFL. [10]

Después de esta breve introducción, tanto para las nanoantenas como también para la antena Bow-tie o antena pajarita, se va a empezar con la primera parte de nuestro proyecto, la simulación y optimización de una única antena Bow-tie para el proyecto. En este primer paso, se van a simular diferentes tipos de Bow-ties, a las que se les introducirán pequeñas modificaciones a lo largo de todo el proyecto para analizar cuál de ellas se adapta mejor al esquemático. En este proyecto se irán añadiendo elementos al nanodetector, como es el caso de la rendija y la respuesta de la antena Bow-tie que variará con esas modificaciones. Por lo tanto, se observará una continua modificación de la antena Bow-tie a lo largo del proyecto, ya que se tiene que conseguir que se adapte a cada uno de los elementos y conseguir un rendimiento máximo.

En este capítulo, la antena Bow-tie irá acompañada de un sustrato específico, ya que las simulaciones se han realizado sobre un sustrato de PMMA. Al no hacerse hincapié en obtener los resultados únicamente de la antena Bow-tie, se favorece al proyecto en el factor tiempo, ya que las simulaciones son extensas y se tienen que realizar muchas pruebas para diferentes estructuras.

El primer esquemático con el que se quería empezar era bastante simple, se trataba de un sustrato de PMMA de $4000 \times 4000 \times 10000$ nm. Estas son las dimensiones utilizadas para la simulación del proyecto, mediante el software Lumerical. El siguiente paso, sería situar la antena Bow-tie sobre la superficie del polímero, la cual consta de dos triángulos de oro para poder concentrar mayor valor de campo. Estos dos triángulos que forman la antena se podrían considerar casi equiláteros, ya que, la diferencia entre los lados de los triángulos son insignificantes, pero realmente son triángulos isósceles. Estas medidas de los triángulos, al principio fueron casi aleatorias para obtener unas medidas de referencia y al mismo tiempo observar su respuesta para más tarde realizar un estudio detallado.

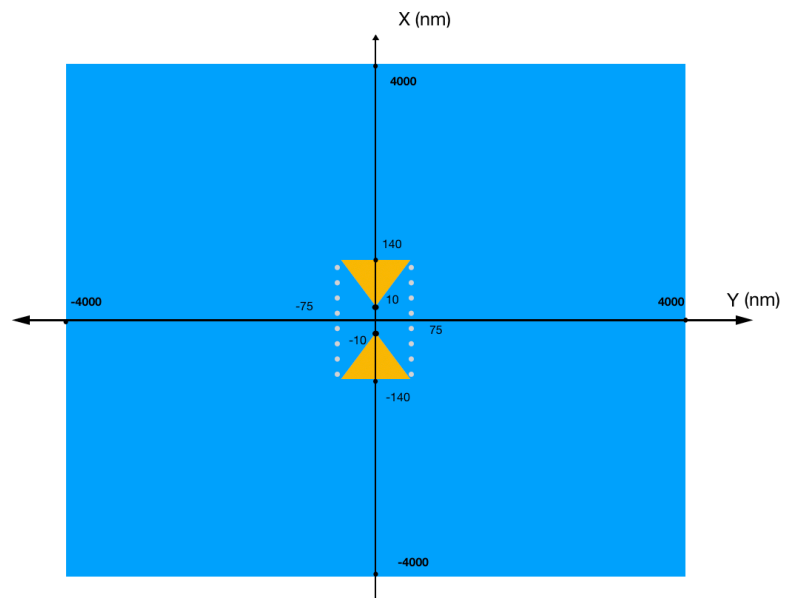


Figura 15. Sustrato más Bow-tie (Planta)

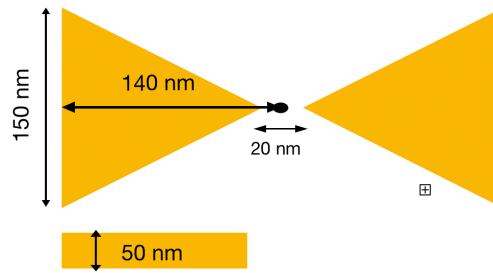


Figura 16. Antena Bow-tie

Esta sería la primera antena Bow-tie diseñada para el esquemático, es la misma que en la imagen anterior solo que con una explicación más detallada. En esta imagen se pueden observar, los dos triángulos de oro con una separación de 20 nm entre ellos, cuanto más juntos estén mayor campo eléctrico se conseguirá concentrar entre ellos. Al ser triángulos isósceles, como se ha citado anteriormente, constan de dos lados iguales y el tercero distinto. El lado distinto mide 150 nm mientras los otros dos tienen una longitud de $150 \cdot 0833$ nm, como se ha explicado, la diferencia es insignificante. Por último, respecto a su amplitud, esta es de 50 nm. Estas medidas eran de referencia para la primera simulación, por tanto, todavía no se podían sacar conclusiones con ellas.

Con este primer esquemático se obtuvieron los siguientes espectros y respuestas de campo eléctrico con las que, con un estudio detallado, se podría acercarse a la antena ideal.

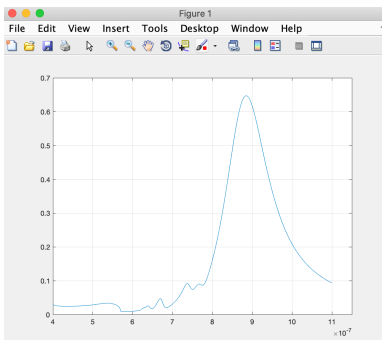


Figura 17. Espectro de reflexión

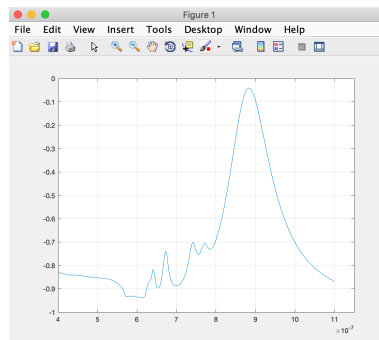


Figura 18. Espectro de transmisión

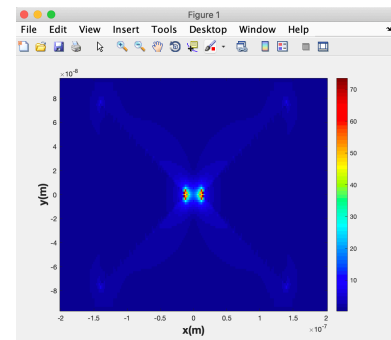


Figura 19. Campo eléctrico

En estas tres imágenes se pueden observar los espectros de reflexión y transmisión de las señales obtenidas en la antena y también la respuesta del campo eléctrico en el gap de la antena. Se puede observar también que el valor de campo es bastante elevado y sería adecuado para la señal, pero hay algunos problemas: en estos esquemáticos o gráficos se está teniendo en cuenta también la respuesta que depende de la periodicidad, por tanto, no sería conveniente confiar con estos resultados. Tampoco se obtiene el resultado a la longitud de onda deseada, que sería alrededor de los 780 nm.

Cuando ya se obtuvieron los primeros resultados, se decidió empezar a solucionar el problema de la periodicidad. Lo primero que se hizo fue realizar un barrido de simulaciones variando el periodo de simulación para conseguir encontrar a partir de qué periodo la respuesta empezaba a estabilizarse.

El siguiente paso, para cuando se tuviera el problema del periodo solucionado, sería resolver el posicionamiento del mayor pico en el espectro de reflexión, es decir, la longitud de onda para la cual el espectro alcanza su máximo valor.

3. 1. Búsqueda del periodo

El primer paso en el proyecto, cuando se tenía el esquemático deseado, era conseguir un periodo el cual no interfiriera con la respuesta. Una respuesta periódica tienen una respuesta por su propia periodicidad, pero en este caso se quiere que la respuesta quede fuera de las longitudes de onda de interés que son 10 μm o más para la señal en THz y 750 nm para la señal del visible.

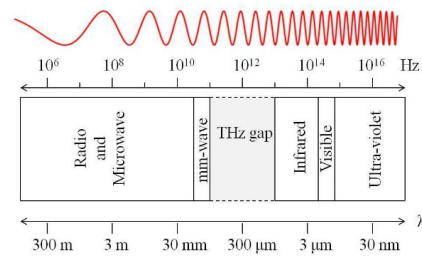


Figura 20. Espectro electromagnético [16]

Para poder obtener el periodo que más se adaptaba al proyecto, se tuvieron que hacer varias simulaciones al primer esquemático, que se ha modificado bastante para conseguir optimizarlo. Se empezó simulando con el software RSOFT pero, por su complejidad, se continuó con el programa Lumerical, un software más simple y más veloz. Cuando ya se tenía diseñado el esquemático, el primer paso fue realizar un barrido de simulaciones cambiando solamente el periodo de simulación, desde 400 nm hasta los 3000 nm. Esto duró bastante tiempo, ya que algunas de las simulaciones resultaban ser bastante extensas. Cuando se obtuvieron todos los resultados, se analizaron todas las simulaciones y se observó que a 1600 nm el periodo no cambiaba la respuesta y se quedaba a medio camino entre los 10 μm de la señal de THz y los 750 nm para el visible. Por tanto, se decidió fijar el periodo en 1600 nm y continuar con las simulaciones para obtener el máximo valor de campo.

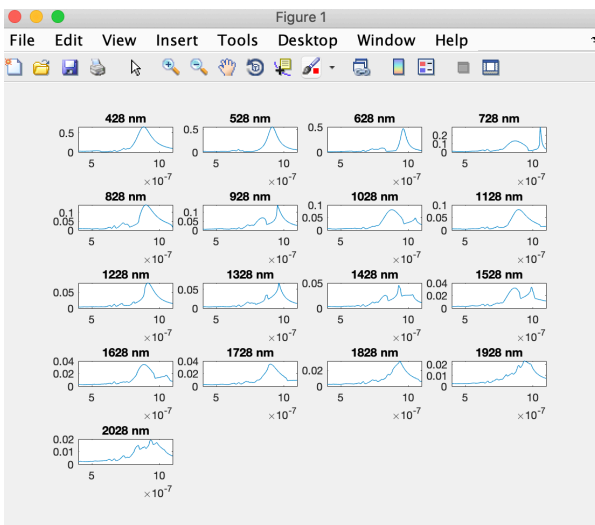


Figura 21. Espectros de reflexión

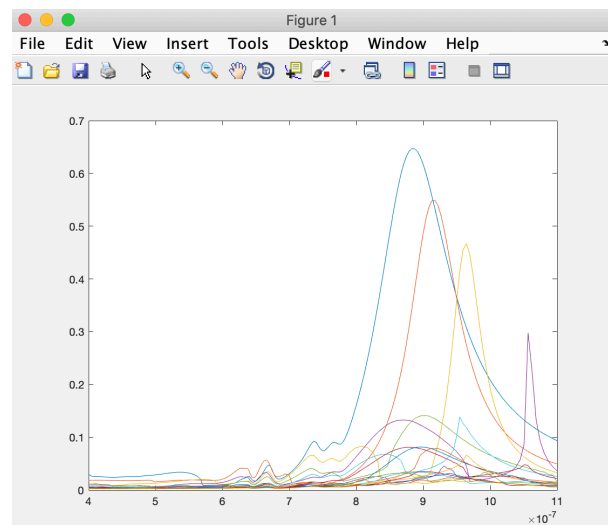


Figura 22. Conjunto de los espectros

En estas imágenes se pueden observar todos los espectros de la señal para diferentes periodos. Si se observa el periodo de 1600 nm, se puede ver que está bastante desplazado. Con este esquemático no se obtiene una respuesta alrededor de la longitud de onda de 780 nm. En la siguiente imagen, se puede observar que para un periodo de 1600 nm y con este esquemático específico, se obtiene un espectro de reflexión que obtiene su pico cerca de los 900 nm, por tanto, hay que hacer ciertas modificaciones para poder conseguir la respuesta alrededor de la longitud de onda de los 780 nm y, al mismo tiempo, hacer posible que aumente el valor de la señal para poder obtener mayor valor de campo eléctrico.

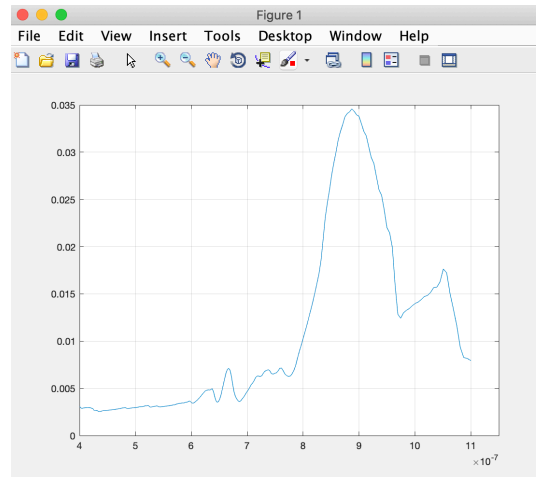


Figura 23. Corresponde al espectro de reflexión con un periodo de 1628 nm

3. 2. Modificación de la Bow-tie

En segundo lugar, al fijar el periodo, se empezaron a hacer variaciones con el esquemático para conseguir muchos resultados y más tarde poder compararlos y analizarlos. En este proyecto se va a utilizar un nuevo concepto de conversión ascendente de señal al visible y a la región espectral del infrarrojo cercano (VIS/NIR) y estos dos conceptos trabajan a una longitud de onda cercana a los 780 nm al igual que los láseres empleados. En estas regiones, alrededor de los 780 nm es donde la espectroscopia del visible (VIS) y la espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR) consiguen que las moléculas absorban la radiación emitida del láser que provoca unas transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas, por lo tanto, en este proyecto se necesita que la mayor respuesta del campo eléctrico se encuentre alrededor de esa misma longitud de onda.

En este punto apareció un problema, ya que, con el esquemático original la respuesta aparecía alrededor de los 900 nm. Esto llevó a realizar variaciones en las dimensiones de las Bow-ties, pero el resultado continuaba siendo bastante parecido. Una de las soluciones que se obtuvieron fue aumentar el tamaño del gap de las Bow-tie y esto resultó ser eficaz, ya que, se consiguió la respuesta alrededor de los 780 nm, pero en este específico nanodetector el gap que se quería era de 20 nm y se había aumentado hasta los 70 nm, por tanto, se continuó teniendo el mismo problema.

En la siguiente imagen, se puede observar la variación realizada en la antena Bow-tie, para poder obtener la respuesta de la señal cerca de la longitud de onda deseada. Es una modificación bastante simple, se redujo el tamaño del triángulo y al mismo tiempo se amplió el espacio que existe entre los dos triángulos que forman la antena, con ello se consiguió obtener la respuesta a la lambda deseada.

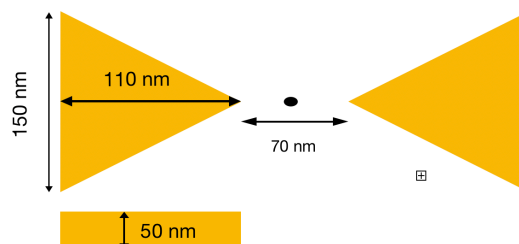


Figura 24. Antena Bow-tie con incremento del gap

Con este nuevo diseño, se obtuvieron unos nuevos espectros y respuestas de nuestra antena, con las que se pudo continuar realizando un estudio detallado del proyecto. En las siguientes imágenes se puede observar los espectros de reflexión y transmisión que se obtienen con el nanodetector para distintos periodos. También se pueden analizar las respuestas de campo eléctrico para cada periodo utilizado.

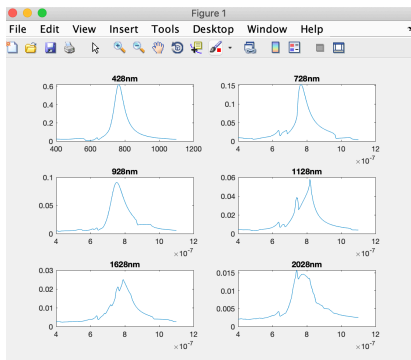


Figura 25. Espectro de reflexión

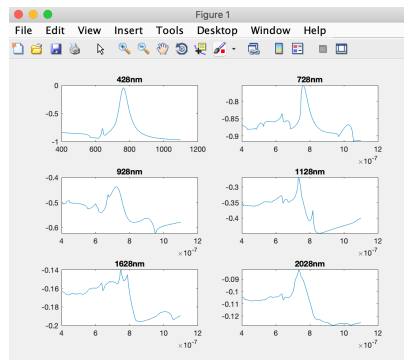


Figura 26. Espectro de transmisión

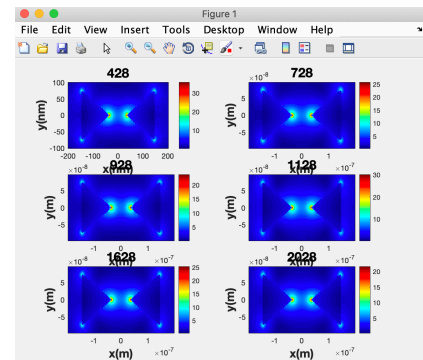


Figura 27. Respuesta del campo

Como se puede observar, el pico del espectro de reflexión se encuentra alrededor de los 780 nm, la longitud de onda deseada. El inconveniente es, que para conseguir este resultado se ha tenido que aumentar el gap de la antena Bow-tie 50 nm. Por tanto, este resultado no serviría, porque el gap debe ser de 20 nm o menor. Se ha probado en algunas simulaciones reducir el gap de la Bow-tie a 10 nm y se ha conseguido obtener un mayor valor del campo eléctrico. Cuanto más pequeño sea el gap de la antena, más campo se logrará concentrar. Para este proyecto se decidió no pasar de los 20 nm de gap. Esta medida es suficiente para poder concentrar un alto valor del campo.

En la figura 27, se puede ver la respuesta del campo eléctrico, se tiene un fuerte confinamiento de la señal entre los dos triángulos, sobretodo en los vértices. Esto es bastante interesante, porque se obtiene un valor alrededor de 20 y 30 V/m que resulta ser un valor elevado para una estructura tan pequeña. Se ha de tener en cuenta que, en este proyecto, lo que interesa es el modulo del campo eléctrico al cuadrado ($|E|^2$), esto significa que el valor del campo será mucho más grande y con ello se puede conseguir una intensidad bastante elevada para poder hacer vibrar las moléculas.

En este punto del proyecto el objetivo principal era conseguir que la respuesta estuviera alrededor de los 780 nm, pero todavía no se había encontrado el modo. Uno de los siguientes pasos, era crear una rendija de oro que rodeara las Bow-ties, para conseguir alcanzar una respuesta a 10 μm en el THz y, al mismo tiempo, concentrar un mayor valor de campo eléctrico. Esta rendija estaría formada por placas metálicas, específicamente oro, que se posicionarían a los laterales de la antena Bow-tie abarcando así todo el largo y el ancho del substrato de PMMA. La principal característica de la rendija a incorporar era conseguir la respuesta en el THz y como alternativa aumentar la cantidad de campo a la longitud de onda de 780 nm. También se tiene que tener en cuenta que, para obtener un mayor valor del campo, cuanto más juntas estén las placas mayor valor de campo se obtendrá, pero aquí también influye que dependiendo de la posición de las placas metálicas la respuesta del campo aparece a distintas longitudes de onda. Un dato importante es que el periodo debe ser mayor a la longitud de la rendija para así conseguir que este no influya sobre la respuesta del espectro o señal. En la imagen de los espectros de reflexión se puede observar que para un periodo de 1600 nm, como se ha citado anteriormente, ya no se observa un resultado que varíe por la periodicidad, este resultado es independiente del periodo, como se pretendía conseguir. Se puede ver que la señal varía con el periodo y en la imagen se tienen seis espectros de reflexión para poder compararlos. Después de hacer un amplio abanico de simulaciones, se decidió fijar el periodo en 1600 nm cómo se explico anteriormente.

Toda esta información hay que tenerla en cuenta en el momento de las simulaciones. Para poder variar el esquemático, se tiene que saber que hay diversos datos y dimensiones que podrían hacer que el resultado no fuera real o que estuviera mal diseñado. Por eso, cuantas más simulaciones se hagan y más resultados se obtengan, se podrá afirmar con más confianza la autenticidad de los logros y también poder compararlos entre ellos para discutir sus diferencias y conseguir optimizarlos.

3. 2. 1. Diversidad de respuestas para diferentes esquemáticos

Como se ha explicado en el desarrollo del proyecto, uno de los objetivos es saber las diferencias que se obtienen con los distintos componentes que se van introduciendo y suprimiendo de los esquemáticos principales. Por ello, en las figuras 6 y 7 se puede ver como se elimina la antena Bow-tie del esquemático, para poder compararla y observar los efectos proporcionados por esta.

Este proceso sirve para analizar cómo afecta la antena Bow-tie sobre la superficie del sustrato, es decir, si finalmente se obtiene el cambio deseado para el detector a nanoescala.

Con estas simulaciones se obtiene un gran cantidad de resultados para conseguir compararlos. Con la introducción de las placas de oro se consigue una mayor concentración de campo, pero no se ha visto que resultado sería capaz de obtener el esquemático solamente si se tuviera el sustrato. Esta es la gran diferencia con la que se va a analizar la antena para cada componente ya que, introduciendo algunos componentes se puede observar que la respuesta no mejora y por tanto se tiene que volver al paso anterior para poder rehacer el diseño, este es el paso más importante del proyecto. En este punto hay que saber identificar qué componentes sirven y cuales no.

A continuación se explicarán las diferencias que aparecen al suprimir la antena Bow-tie del diseño con el sustrato de PMMA, también se va a comparar con los resultados obtenidos al introducir unas placas metálicas a los costados de las Bow-tie y finalmente se simulará este mismo diseño con las tiras de oro en los laterales pero suprimiendo también las Bow-tie, es decir, se van a analizar cuatro diseños:

- Sustrato de PMMA con la antena Bow-tie
- Sustrato de PMMA con las Bow-tie y las placas metálicas en los costados
- Sustrato de PMMA con las placas metálicas (Sin Bow-ties)
- Sustrato de PMMA, sin Bow-ties y sin tiras de oro

Estos serían las cuatro comparaciones a realizar para el esquemático del momento, se trata del último que se ha visto, el que aparece en la figura 24. En este diseño como se ha explicado anteriormente se había ampliado el tamaño del gap central para conseguir una respuesta cerca de los 800 nm de longitud de onda y también se redujo la longitud de la antena Bow-tie respecto al modelo anterior, que es el que aparece en la figura 16, y este fue el primero con el que se empezaron a hacer las simulaciones.

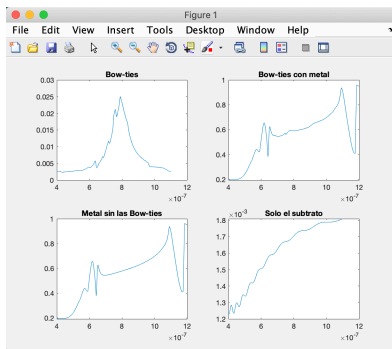


Figura 28. Espectro de reflexión

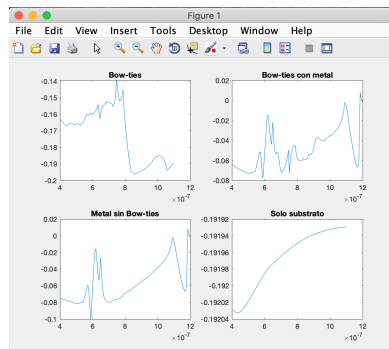


Figura 29. Espectro de transmisión

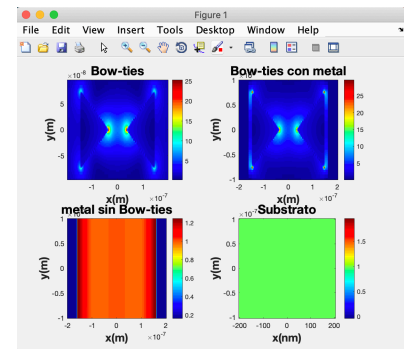


Figura 30. Campo eléctrico

Es simple identificar en estas gráficas las diferencias obtenidas con los distintos diseños mencionados anteriormente, de la figura 28 a la 30 se pueden ver los espectros de reflexión, de transmisión y también la respuesta del campo eléctrico consecutivamente. Con el espectro de reflexión y la respuesta del campo, se puede analizar perfectamente la señal obtenida. Con la introducción de la antena Bow-tie se consigue un pico de señal, cerca de los 800 nm, 16 veces mayor que si se compara con el diseño que únicamente contiene el sustrato, esto es un aumento de señal bastante significativo. Respecto a la introducción de las tiras de oro, se puede decir que en el espectro de reflexión no aparecen diferencias si se introduce o suprime la antena Bow-tie. Sin embargo, si se observa la respuesta del campo se identifica una diferencia muy notable de dicho valor respecto a la estructura sin la antena de pajarita.

4. Introducción de la rendija

Las antenas de ranura se utilizan normalmente en frecuencias entre los 300 MHz y 24 GHz. La antena de ranura es popular porque se pueden cortar de cualquier superficie en la que se vayan a montar y tienen patrones de radiación que son aproximadamente omnidireccionales (similares a una antena de cable coaxial). La polarización de la antena de ranura es lineal. El tamaño de la ranura, la forma y la cavidad ofrecen variables de diseño que se pueden usar para ajustar el rendimiento. Considerando una lámina conductora infinita, con una ranura rectangular cortada con las dimensiones a y b como se muestra en la figura 31. Si se pueden excitar algunos campos razonables en la ranura, se tiene una antena de ranura [12, 13].

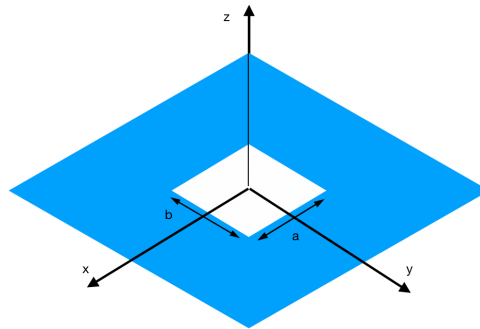


Figura 31. Antena de ranura rectangular

Para tener una intuición sobre las antenas ranuras, primero hay que aprender el principio de Babinet [14]. Este principio relaciona los campos radiados y la impedancia de una antena de apertura o ranura con el campo de su antena dual. El dual de una antena de ranura sería si el conductor y el aire se intercambiaran, es decir, la antena de ranura se convirtiera en una losa de metal en el espacio. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de antenas duales:



Figura 32. Antena dual, Antena ranura (Izquierda), Antena dipolo (Derecha)

Hay que tener en cuenta que si se aplicara una fuente de voltaje en el extremo corto de la antena de ranura se induciría una distribución del campo eléctrico dentro de la ranura y las corrientes que viajan alrededor del perímetro de la ranura contribuirían a la radiación. La antena dual es similar a una antena dipolo. La fuente de voltaje se aplica en el centro del dipolo, de modo que la fuente de voltaje gira. El principio de Babinet relaciona estas dos antenas. El primer resultado establece que la impedancia de la antena de la ranura (Z_s) está relacionada con la impedancia de su antena dual (Z_c) por la relación:

$$Z_c Z_s = \eta^2 / 4$$

En este capítulo del proyecto se va a mostrar detalladamente la creación de la rendija [15].

4. 1. Diseño de la rendija

Para esta parte del proyecto se va a describir la rendija que se ha tenido que simular por separado, ya que, el simulador no era tan potente como para analizar estructuras tan grandes. Por ello, se tuvo que realizar un segundo esquemático totalmente distinto al anterior. El primer esquemático estaba formado por el sustrato de PMMA y la antena Bow-tie, estos eran los principales elementos del primer esquemático. Mientras que, para el segundo esquemático, se ha cambiado totalmente el diseño, ya que en este, únicamente se va a simular la parte de la rendija. La finalidad de este proceso es conseguir juntar estos dos esquemáticos formados por la rendija y nuestra antena Bow-tie y poder realizar una simulación total si el simulador lo permite.

Para este esquemático se han realizado tres diseños, cada uno de ellos con un material distinto para el sustrato. Esto se ha hecho para poder comparar cuál de ellos ofrece una mejor respuesta en la antena. Como ya se sabe y se ha citado anteriormente, la antena rendija que se está realizando sirve para detectar la respuesta del THz, mientras que la antena Bow-tie es para detectar la respuesta en el visible. Pues bien, esta antena rendija que se está diseñando, está formada por un sustrato que en cada uno de los tres diseños es de un material distinto. También en la superficie de dicho sustrato se ha añadido una capa de oro, pero para poder simularlo en un simulador electromagnético se modela con un modelo analítico que se denomina Drude. El modelo de Drude es un modelo analítico que aproxima la permitividad eléctrica de los metales. En nuestros software, se usa este modelo para definir la permitividad del oro en cada región del espacio. En esta capa de Drude es donde estará el boquete que proporciona la rendija y donde se introducirá la antena Bow-tie.

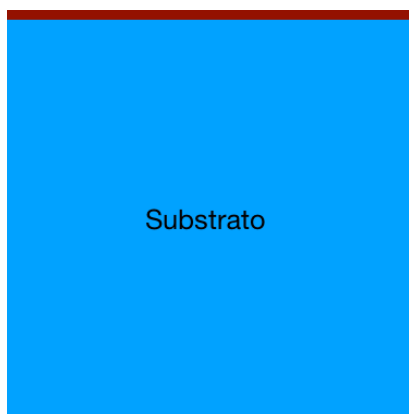


Figura 33. Sustrato más rendija (Alzado)

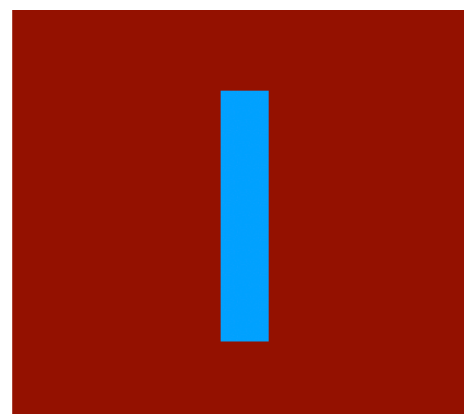


Figura 34. Sustrato más rendija (Planta)

Este sería el aspecto del diseño para el siguiente esquemático, la figura 34 corresponde con la vista de la planta y la figura 33 corresponde con la vista del alzado o de la vista del perfil derecho o izquierdo, ya que es la misma para los tres casos. Con esta estructura se pretende realizar diversas simulaciones con las que finalmente conseguir obtener una respuesta a 10 μm , la respuesta en la banda de THz. Para obtener esta respuesta, se van a realizar simulaciones con tres materiales distintos en el sustrato y para cada uno de ellos se va a tener que adaptar la periodicidad de la simulación para que esta no interfiera en la respuesta. Por tanto, hay que realizar un amplio abanico de simulaciones y comparar cuál de todas las respuestas es la más conveniente para el esquemático. Este proceso se tiene que realizar tres veces, una vez para cada material y, en este punto, cuando ya se tenga el periodo adaptado para cada material, se empezará a buscar la respuesta a 10 μm . Este proceso resulta ser laborioso, ya que se tienen que realizar muchas simulaciones para poder compararlas y elegir la más óptima. Es un proceso extenso y hay que tener en cuenta muchos parámetros, pero finalmente siguiendo los pasos adecuados se puede obtener la respuesta deseada.

A continuación se va a analizar la misma estructura para los tres distintos materiales: Aire, Silicio y Cuarzo.

4. 1. 1. Rendija rectangular con substrato de aire

Para dicha rendija con substrato de aire, se puede imaginar que el esquemático es el mismo que si no hubiese substrato, es decir, solamente se va a simular la capa de Drude con la rendija situada en el centro. Para hacerse una idea, seria lo mismo que en la figura 33 y 34 pero sin él substrato. Con este simple diseño se empezaron a hacer simulaciones fijando la longitud de la rendija en 1700 nm para tener una longitud de referencia y también se comenzó a hacer variaciones en el periodo para determinar a partir de que valor la respuesta es independiente del periodo.

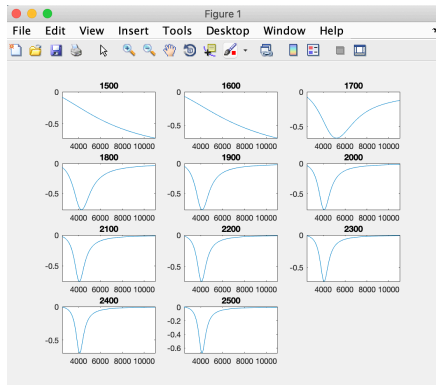


Figura 35.

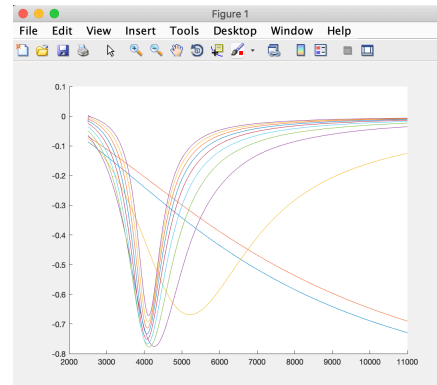


Figura 36.

Analizando las figuras anteriores, se puede observar que lo que interesa en este nuevo esquemático es el espectro de transmisión para observar si la antena consigue una respuesta cerca de las 10 μm . En este punto se está analizando la periodicidad de la antena y, por tanto, se observa que a partir de los 2300 nm la respuesta parece ser independiente del periodo. De este modo, para continuar con la rendija, se fijó el periodo de simulación en 2300 nm y se empezaron a realizar variaciones en la longitud de la rendija para conseguir acercarse a las 10 μm .

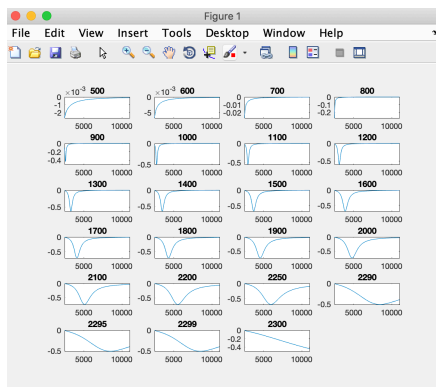


Figura 37.

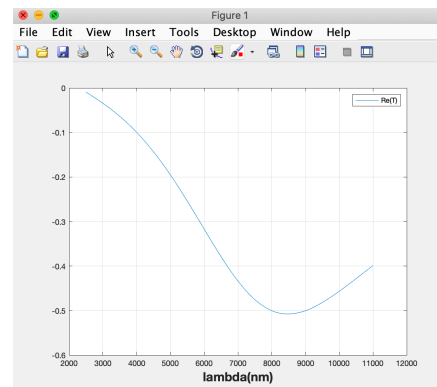


Figura 38.

En la figura 37, se pueden ver los espectros de transmisión que se obtienen al simular con distintas longitudes en la rendija. El objetivo era conseguir una respuesta en 10 μm y empezó a acercarse a este valor a partir de los 2200 nm de longitud de la rendija, pero lo máximo que se obtiene es una respuesta a la longitud de onda de 8500 nm con una longitud en la rendija de 2295 nm. Es posible que con el substrato de aire no se pueda llegar a conseguir esa respuesta porque, si se observa la gráfica, cuando se simula a la misma longitud en la rendija que el valor del periodo, 2300 nm, el espectro de transmisión cae en picado. Es posible que se deba a un efecto de la continuidad de la rendija. En los siguientes puntos se va a analizar el mismo esquemático con distinto material en el substrato para de esta forma comparar si esta respuesta se debe a la periodicidad o al substrato de aire.

4. 1. 2. Rendija rectangular con sustrato de Silicio

En esta parte del proyecto se introdujo un sustrato de Silicio que tiene un índice de refracción de 3.42, por tanto, este segundo diseño está formado por un sustrato físico, no como el anterior, que estaba formado solamente por la capa que define la permitividad de los metales y es denominada “Drude”. Este diseño, corresponde con las figuras 33 y 34.

Para este nuevo esquemático se van a realizar los mismo pasos que en el diseño anterior, primero se tiene que determinar la respuesta de la periodicidad y más tarde buscar la longitud de la rendija para la cual se consigue obtener una respuesta a 10 um con el nuevo sustrato de Silicio.

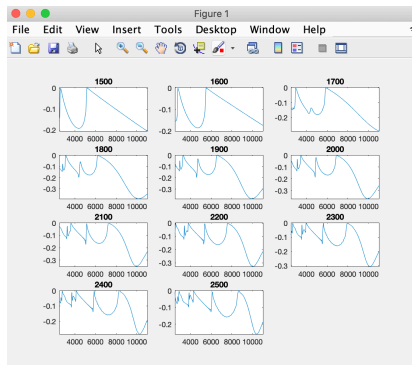


Figura 39.

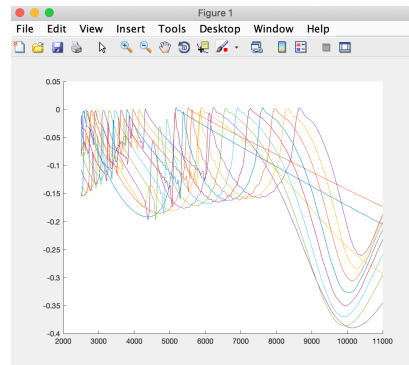


Figura 40.

Para este diseño, también se ha fijado la longitud de la rendija en 1700 nm para conseguir obtener el valor del periodo para el cual la respuesta no experimentaba cambios por la misma periodicidad. En este diseño se ha decidido fijar nuestro periodo en 2000 nm, ya que, a partir de este valor, la respuesta parece estabilizarse. Al disponer de un periodo adecuado para el esquemático con el sustrato de Silicio, el siguiente paso consiste en empezar a simular con distintas longitudes en la rendija para observar cuál de ellas es más cercana para la señal en THz o 10 um aunque en este diseño, a pesar de haber realizado una gran cantidad de simulaciones para distintas longitudes de la rendija, el resultado aparece en la figura 39. Esto es debido a que con la fijación de la longitud de la rendija en 1700 nm y simular con un periodo de 2000 nm, se ha encontrado una respuesta a 10 um. Todas las simulaciones hechas a partir del periodo seleccionado de 2000 nm, es posible que no hubieran hecho falta, aunque también se podría haber encontrado una mejor respuesta con todas esas simulaciones. Por tanto, para este diseño el periodo será de 2000 nm y la longitud de la rendija de 1700 nm.

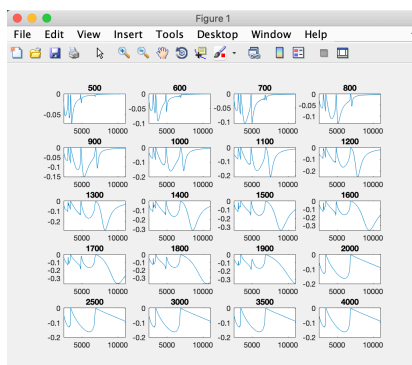


Figura 41.

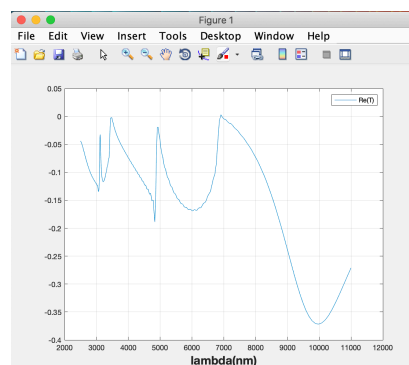


Figura 42.

Como se puede observar, la figura 42 corresponde con la descrita en el párrafo anterior, la simulada con un periodo de 2000 nm y con una longitud de la rendija de 1700 nm. Con este diseño se obtiene una respuesta justo a 10 um.

4. 1. 3. Rendija rectangular con sustrato de Cuarzo

Para este diseño es un poco más complicado, el problema surge porque el índice de refracción del Cuarzo es menor que el del Silicio y por tanto hay que hacer toda la simulación más grande para conseguir obtener la respuesta a 10 μm , incluyendo el periodo. En Cuarzo, si la longitud de la rendija son 2000 nm y el periodo también son 2000 nm, la respuesta no sirve, porque en este caso se está creando una rendija continua, por lo tanto se tienen que aumentar dichos valores.

En este punto, se decidió aumentar el valor del periodo a 4000 nm y a partir de aquí realizar las pruebas necesarias para obtener la respuesta a 10 μm . Se empezó con longitudes de 1500-2500 nm en la rendija, pero como se ha dicho anteriormente, para el Cuarzo todo el proceso debía de ser mayor. En este caso, se empezaron a realizar simulaciones a partir de los 3000 nm de longitud de la rendija y como se verá a continuación, empezó a acercarse a la respuesta deseada.

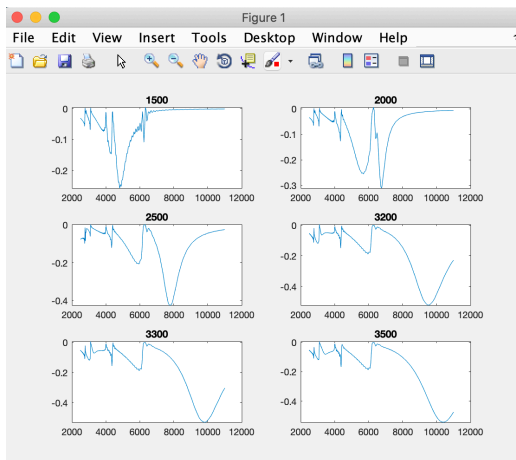


Figura 43.

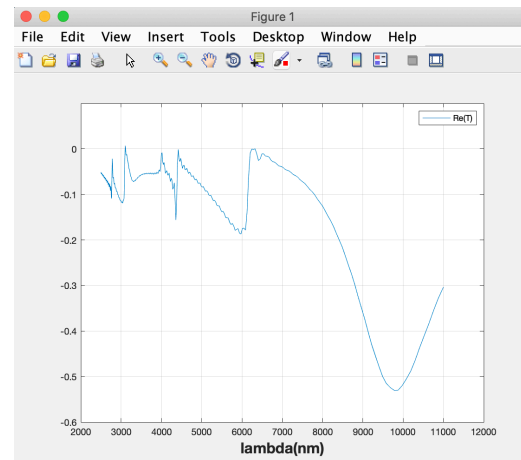


Figura 44.

Como se puede ver en la figura 43, con longitudes de la rendija alrededor de los 2000 nm, la respuesta del espectro de transmisión era un poco mayor que la mitad del valor que se pretendía conseguir. Pero si se observan las siguientes simulaciones, se ve que a partir de los 3000 nm de longitud, la respuesta ya empieza a acercarse a los 10 μm . Para concluir con este diseño se ha decidido que con un periodo de 4000 nm y un longitud de la rendija de aproximadamente 3300 nm se consigue la respuesta deseada a las 10 μm .

Estas tres estructuras analizadas con distintos materiales para los sustratos: Aire, Silicio y Cuarzo, han servido para conseguir obtener una respuesta en el THz a 10 μm con la rendija. La rendija como se ha explicado varias veces, estará formada por una de estas tres estructuras. El objetivo de esta rendija que se acaba de evaluar consiste en juntarla con la estructura creada en el punto 3, la estructura que contiene la antena Bow-tie. Estas dos estructuras conjuntas formarían el total del detector, capaz de convertir las señales en THz y captarlas mediante detectores convencionales.

Llegados a este punto el objetivo era bastante claro, crear una nueva estructura que estuviese formada por la rendija, con cualquiera de los tres sustratos evaluados, y también por la antena Bow-tie analizada en el capítulo 3. En este punto del proyecto se comprobó que no se podían realizar simulaciones tan amplias con el software utilizado, porque estas utilizarían demasiado tiempo en sus simulaciones y se necesitaban resultados “rápidos” para continuar con el proceso de mejora del diseño. Es decir, no se podían juntar ambos esquemáticos y simular, ya que, este proceso era demasiado complejo. Sin embargo, surgió una alternativa. Se decidió diseñar un nuevo esquemático, con el que se pudiera conseguir prácticamente el mismo resultado que con la rendija pero sin utilizar ese mismo diseño. Por lo tanto, se decidió introducir dos rectángulos de oro a los costados de la antena Bow-tie para que realizasen la misma función que la rendija. Con este diseño, se consiguió encerrar la antena Bow-tie dentro de una superficie de oro, cumpliendo su función de rendija y al mismo tiempo incrementando el confinamiento de campo eléctrico en el visible.

Con este nuevo diseo tambi3n se tenian que analizar las dimensiones de dichos rect3ngulos para que su respuesta fuese lo mas 3ptima posible y parecida a la de la rendija. Tambi3n fue necesario estudiar a qu3 distancia deberian de estar situadas respecto a la antena Bow-tie, ya que, cualquier modificaci3n conlleva a un cambio notable en la respuesta del nanodetector.

A continuaci3n se va a analizar el esquem3tico diseado para respaldar la funci3n de la rendija.

4. 2. Diseo de la rendija improvisada

En esta parte del proyecto se incorporaron las placas met3licas a los lados de la antena Bow-tie para ver si de este modo se conseguiria crear un diseo que pudiera optimizar constantemente y maximizar su rendimiento. Del mismo modo, los objetivos eran aumentar y concentrar m3s la seal en el gap y obtener una respuesta en el THz. Se decidi3 empezar haciendo pruebas con dos placas met3licas de oro con unas dimensiones de (4000x500x50 nm). Las placas se situaron cada una a un lateral de la antena Bow-tie. Hay que tener en cuenta que cuanto m3s cercanas est3n las placas entre si, mayor ser3 la cantidad de seal concentrada en el gap, pero hay que saber, que la antena Bow-tie tiene que estar situada entre las dos placas, por tanto, no pueden estar tan juntas.

Con estas placas met3licas introducidas, la intenci3n era conseguir el mismo resultado que con la rendija diseada en el capitulo anterior y de este modo poder optimizar el diseo total, ya que ahora las respuestas son totalmente distintas, porque se ha introducido la antena Bow-tie en el interior de la rendija.

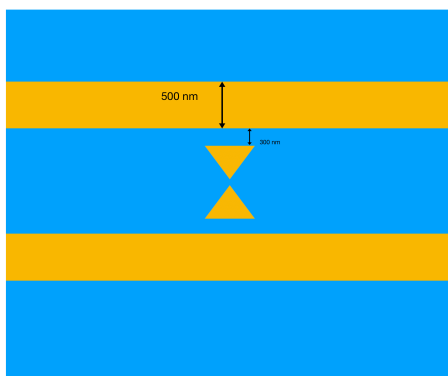


Figura 45. Nanodetector

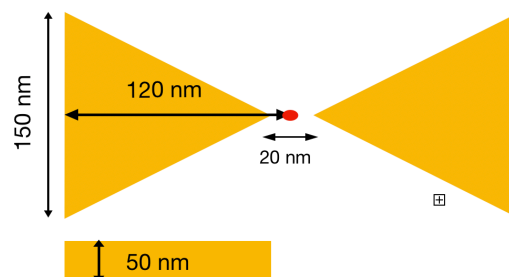


Figura 46. Antena Bow-tie

En estas dos im3genes se puede observar el nuevo esquem3tico diseado. El prop3sito de este diseo es conseguir, con las dos nuevas placas met3licas de oro, concentrar en el gap de la antena el mayor valor de campo posible. Estas dos placas ayudaran a almacenar y concentrar el campo el3ctrico emitido por la seal en la antena. Tambi3n hay una pequea modificaci3n en la antena Bow-tie: se ha reducido el tamao del gap, otra vez, a 20 nm, pero se han conservado el nuevo tamao del tri3ngulo. Esa pequea reducci3n que se hizo en el estudio anterior para situar el pico del espectro alrededor de la lambda deseada sigue presente.

Para saber donde se tendrían que situar las dos placas de oro se decidi3 hacer un barrido desde los 15 nm hasta los 300 nm de separaci3n entre la Bow-tie y la placa para decidir en qu3 punto la seal se comporta u obtiene una mejor respuesta. A continuaci3n aparecen algunas im3genes de espectros de reflexi3n y transmisi3n para diferentes longitudes de separaci3n, tambi3n hay una imagen para evaluar la cantidad de campo concentrado para cada diseo.

En los espectros de reflexi3n se pueden observar que con una separaci3n de 300 nm entre la Bow-tie y la placa el resultado es bastante bueno, ya que, la seal consigue su pico cerca de los 800 nm. Es una distancia bastante interesante, porque se podria decir que existe demasiada separaci3n, pero con ella se consigue aumentar el campo y situar el pico de la seal a la longitud de onda deseada. Comparando con las distintas distancias evaluadas, se puede ver que con una separaci3n de 15 nm se obtiene el pico del espectro de reflexi3n cerca de los 1100 nm y cerca de la longitud de onda deseada (780 nm) se comporta como una seal casi constante.

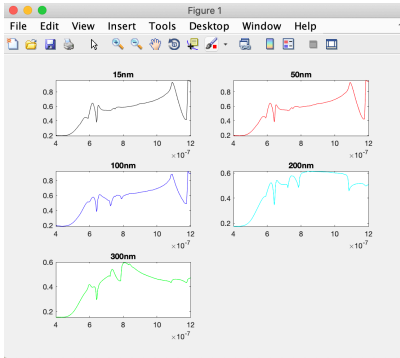


Figura 47. Espectro de reflexión

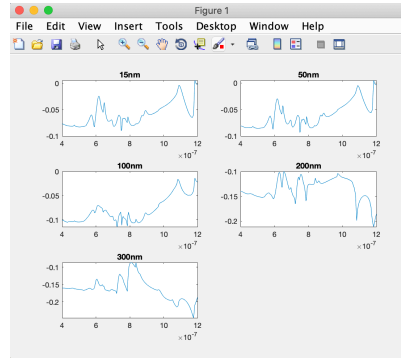


Figura 48. Espectro de transmisión

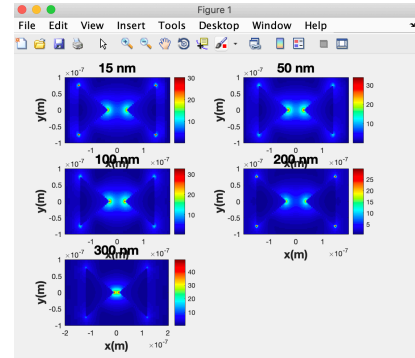


Figura 49. Campo eléctrico

En estas tres imágenes se pueden observar perfectamente las diferencias que se consiguen al mover las placas metálicas a diferentes longitudes de separación de las Bow-ties, pero donde mejor se observan las diferencias es en la primera imagen, la que muestra los espectros de reflexión de la antena. Como se ve, cuando las placas están cerca a la antena Bow-tie, como con 15 y 50 nm de separación, la respuesta pico o el valor más alto de la señal aparece en el punto donde están situadas las placas. Se pueden observar dos pequeños picos en los puntos donde están situadas ambas placas. En el momento en que se empiezan a separar las placas de la antena Bow-tie, como es en los casos para 200 y 300 nm de separación, se observa que todo el valor de campo se concentra cerca de la longitud de onda de 800 nm, como se quiere.

Se puede ver que todas las simulaciones realizadas con las distintas distancias están alrededor de los 25 y 30 V/m, a excepción de una, la del esquemático con una distancia de separación de 300 nm. Con este nuevo esquemático, que puede ser un poco grande, se obtiene una respuesta de campo casi igual a 50 V/m y a una longitud de onda cerca de los 800 nm. Con este nuevo esquema se consigue una respuesta de campo bastante interesante con la que se podría afianzar nuestro proyecto.

4. 2. 1. Diversidad de respuestas para diferentes esquemáticos

En este apartado se van a realizar las mismas comparaciones analizadas en el punto 3.2.1, solo que con una pequeña diferencia. Como se ha podido observar, en este último apartado se ha realizado un cambio significativo en la antena, en este punto se hace referencia a las figuras 45 y 46. En este diseño la intención ha sido mantener el gap de 20 nm inicial, para conseguir un mayor confinamiento de la señal en la antena y también se han mantenido las dimensiones de la Bow-tie que corresponden también con los de la figura 24. A continuación se van a evaluar distintas estructuras para realizar una comparación de como afectan ciertos componentes, en concreto los metálicos, al nanodetector. Para ello, se compararán esquemáticos con pequeñas modificaciones, que se centrarán en la eliminación de componentes metálicos del diseño para analizar la mejoría de los nuevos esquemáticos respecto a los esquemáticos sin metales.

En este apartado se ha aumentado el número de comparaciones y se van a observar 6 distintas para poder identificar los cambios.

- Substrato de PMMA con Bow-ties
- Substrato de PMMA con Bow-ties y tiras metálicas
- Substrato de PMMA con Bow-ties y tiras metálicas y un gap de 10 nm
- Substrato de PMMA con tiras metálicas (Sin Bow-ties)
- Substrato de PMMA, sin Bow-ties y sin tiras de oro
- Substrato de PMMA con Bow-ties y rodeadas de oro (Ejemplo: figura 12)

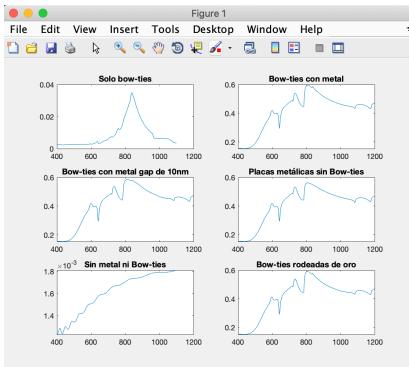


Figura 50. Espectro de reflexión

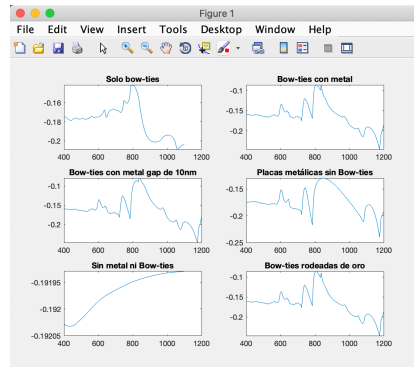


Figura 51. Espectro de transmisión

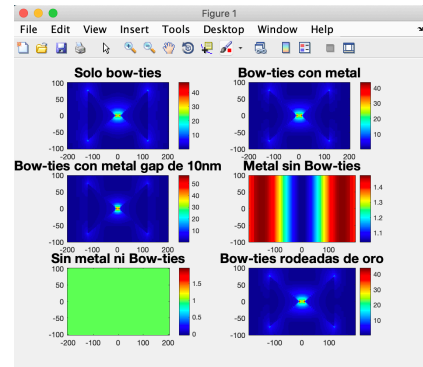


Figura 52. Campo eléctrico

A simple vista se pueden identificar diferentes espectros y respuestas de la antena, por tanto, van a ser analizadas detalladamente. El análisis se centrará en los espectros de reflexión y la respuesta del campo eléctrico, es decir, figuras 50 y 52. En primer lugar se observa el espectro de reflexión del sustrato con las Bow-ties, con este diseño se obtiene una respuesta cerca de los 850 nm y un valor bastante elevado de campo, 40 V/m. Si se compara con el siguiente diseño, el de la introducción de las tiras de oro, se observa una diferencia considerable en el espectro de reflexión. En este diseño, la respuesta aparece alrededor de los 800 nm, la longitud de onda deseada. Y también se obtiene prácticamente el mismo valor de campo eléctrico.

Seguidamente, se ha realizado un análisis de la estructura que contiene solamente la antena Bow-tie, pero en este se ha reducido el tamaño del gap en 10 nm. Este es un diseño complicado de realizar en la realidad, ya que se habla de dimensiones nanométricas, pero se ha realizado la simulación para observar las diferencias. Como se puede ver, el espectro de reflexión es prácticamente el mismo, solo que la respuesta del campo es 10 V/m mayor que si se compara con el diseño de 20 nm en el gap.

Para el siguiente diseño, que contiene solamente el sustrato y las tiras de oro, se puede ver que el espectro de reflexión disminuye un poco su valor y si se observa su respuesta de campo, se puede decir que es un valor muy reducido comparado con los modelos anteriores, por tanto, se puede añadir que la antena Bow-tie tiene un fuerte papel en el nanodetector para confinar mayor valor de campo. En este diseño también se observa que todo el campo aparece confinado alrededor del oro.

En quinto lugar, se tiene el diseño formado solamente por el sustrato de PMMA. Aquí es fácil identificar que al no existir ningún componente de metal en el diseño, no se consigue captar ningún valor de campo eléctrico.

Finalmente, para el último diseño se ha introducido una mayor cantidad de oro para observar si sería posible aumentar el valor de campo, es decir, a mayor oro, mayor campo. Pero esto no funciona de este modo y por tanto se observa prácticamente el mismo resultado que el diseño que solamente contiene las tiras de oro en los costados.

También se han analizado los valores del campo eléctrico al cuadrado, ya que, son los que interesan en este proyecto, para compararlos con los valores de $|E|^2$ de los esquemáticos sin metales. Esta relación permite calcular la mejora del nanodetector.

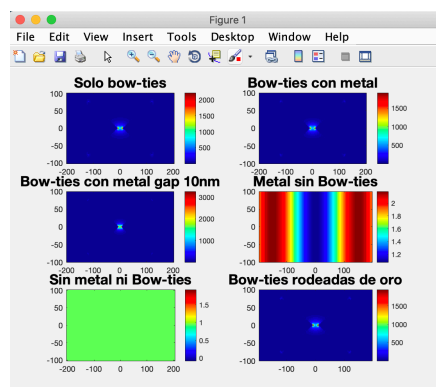


Figura 53. Campo $|E|^2$

En la figura 52, se ven los mismos resultados que en la figura 53 pero elevados al cuadrado, ya que, estos marcarán la diferencia de la nanoantena.

La idea principal de el nanodetector estaba alcanzada pero se necesitaba conseguir que la respuesta fuese lo bastante buena para poder aplicarla en la realidad, por ello, se tenían que realizar una gran cantidad de simulaciones con el objetivo de optimizar dicha señal hasta llegar al punto deseado.

En este punto del proyecto, se había diseñado una antena rendija para obtener una respuesta en el THz a 10 μm y una antena Bow-tie para conseguir un confinamiento de campo en el visible a la longitud de onda de 780 nm. Con estos dos diseños juntos se obtiene el diseño del nanodetector pero para que este sea lo suficientemente bueno, tiene que ser optimizado y conseguir las respuestas que obtienen por separado, las consigan conjuntamente. Por lo que, en el siguiente capítulo se van a analizar una serie de estructuras con las que se estudiará la respuesta de este diseño, modificando sus elementos y analizando cuál de ellos ayuda o dificulta en el alcance de los objetivos. Aparecen una buena diversidad de estructuras que son comparadas al final conjuntamente, algunas de ellas incluso no servirán para el diseño del nanodetector, ya que, en algunas se ocupa el espacio donde estaría situada la rendija pero todas las respuestas son importantes para más tarde poder sacar conclusiones firmes.

5. Adaptaci3n de la rendija con la antena Bow-tie

En el siguiente apartado se va centrar en intentar conseguir optimizar el nanodetector al m3ximo, introduciendo y suprimiendo nuevos componentes de oro y en algunas ocasiones incluso se variar3n las dimensiones de la Bow-tie. Esto, m3s que nada, es un apartado dedicado para algunas de las estructuras que se han simulado y estudiado con la intenci3n de mejorar el dise1o. Algunas de estas estructuras no tienen un dise1o a fin con los objetivos, ya que, uno de los objetivos es simular la rendija dise1ada en el [capitulo 4](#) con la antena Bow-tie en su interior. Esta rendija no es posible de dise1ar si no se respeta su longitud con la que se obtiene la respuesta en el THz porque el dise1o necesita un espacio relativamente largo para que la rendija consiga la detecci3n de las frecuencias en el infrarrojo.

En este punto del proyecto se hab3a conseguido dise1ar un esquem3tico con un periodo de simulaci3n adecuado para que no interfiriese en la respuesta, tambi3n se obten3a el m3ximo valor en los espectros de reflexi3n en la longitud de onda de 780 nm y por 3ltimo, se hab3a dise1ado una antena que captaba un valor elevado de campo el3ctrico, se hab3a alcanzado un valor de campo entre 40 y 50 V/m. Pero de todos modos la intenci3n era continuar optimizando la antena para llegar a un punto donde la se1al obtenida fuera la deseada. Para esta parte del proyecto, se decidi3 introducir m3s elementos de oro que pudieran completar la rendija y conseguir una respuesta lo m3s parecida posible al nanodetector completo, es decir, un esquem3tico donde juntar la rendija y la antena Bow-tie pero sin realizar una simulaci3n en la banda de THz, solamente mejorando la respuesta de campo en el visible. Para ello se estudian una serie de estructuras para evaluar cu3l de ellas es capaz de concentrar mayor valor de campo en el punto deseado.

Se decidi3 crear siete estructuras distintas para compararlas entre ellas y conseguir obtener el mejor resultado posible. Para todas las estructuras que se van a analizar se ha utilizado el mismo sustrato con las mismas dimensiones, el PMMA de 4000x4000x10000 nm. Para la antena Bow-tie, se ha elegido la estructura que corresponde con la figura 46, menos para una 3nica excepci3n, para la cual se ha empleado la misma estructura pero cambiando el grosor del tri3ngulo.

Estructura 1

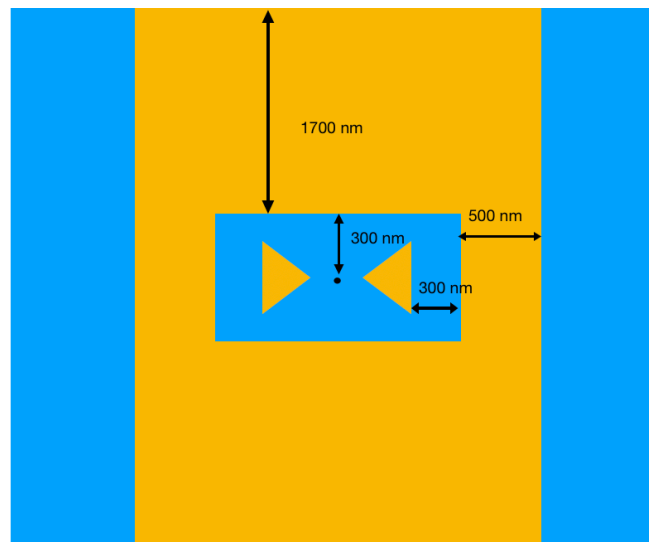


Figura 54. Estructura 1

Esta primera estructura es la misma que la dise1ada en la figura 45, pero aqu3 se han a1adido dos rect3ngulos de oro con la intenci3n de concentrar mayor valor de campo el3ctrico en el visible. A continuaci3n se va a observar la respuesta del campo con los espectros de reflexi3n y transmisi3n para m3s tarde poder comparar estos resultados con los obtenidos en las siguientes estructuras.

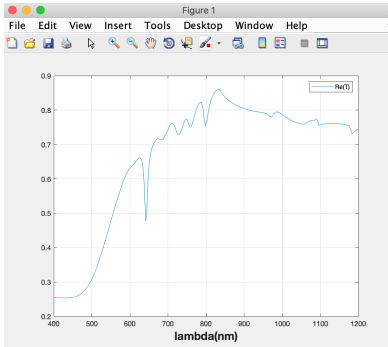


Figura 55. Espectro de reflexión

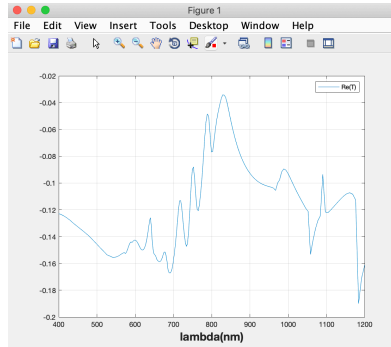


Figura 56. Espectro de transmisión

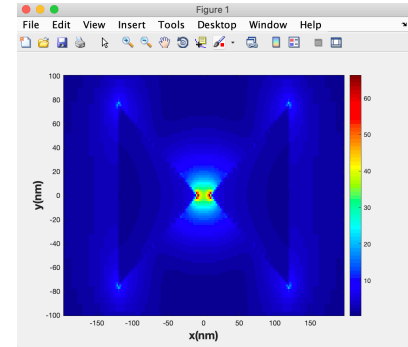


Figura 57. Campo eléctrico

En esta estructura se identifica a primera vista que los espectros son distintos que los que se habían analizado anteriormente. Con este nuevo diseño se obtiene mayor cantidad de señal y además este valor no decae drásticamente, sino que disminuye lentamente sin bajar de los 0.7 T hasta una longitud de onda de 1200 nm. Con esta estructura se detecta también una mayor cantidad de campo eléctrico, lo que resulta ser una primera optimización para este proyecto. Solo existe un pequeño inconveniente: para esta estructura se ha utilizado un diseño con el que no sería posible la respuesta a 10 um en el THz, ya que se ha cambiado por completo la forma de la rendija.

Estructura 2

Para esta estructura, se ha decidido intentar conseguir la misma respuesta que en el esquemático anterior, solo que reduciendo su coste de fabricación, por tanto el principal objetivo es quitar o reducir las placas metálicas hasta el punto en el que se consiga una respuesta similar pero con menor cantidad de oro.

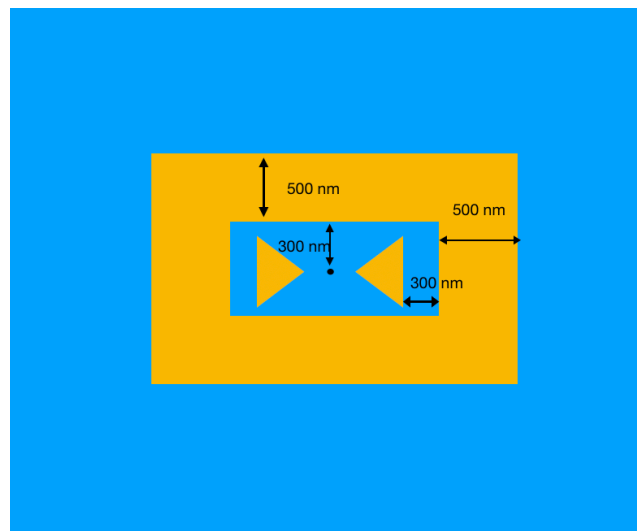


Figura 58. Estructura 2

Como se ha dicho anteriormente, con este modelo se ha conseguido reducir notablemente la cantidad de oro en la nanoantena, pero se continua con el mismo problema de la rendija. Si, por lo contrario, se ampliara la superficie de la rendija como en la figura 34, la que corresponde con la rendija diseñada, se obtendría una respuesta en el THz, pero no se conseguiría maximizar el valor de campo en el gap. Seguidamente se van a evaluar algunas estructuras, con las que se pretende conseguir la captación de ambas respuestas.

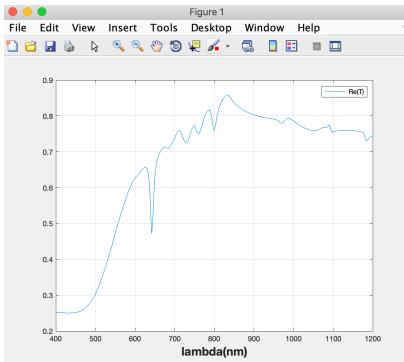


Figura 59. Espectro de reflexión

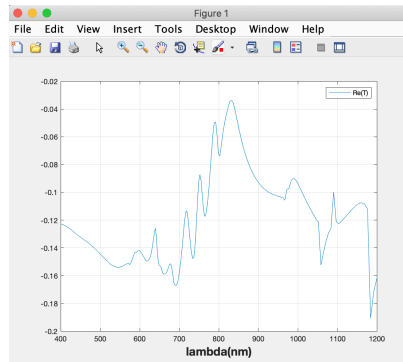


Figura 60. Espectro de transmisión

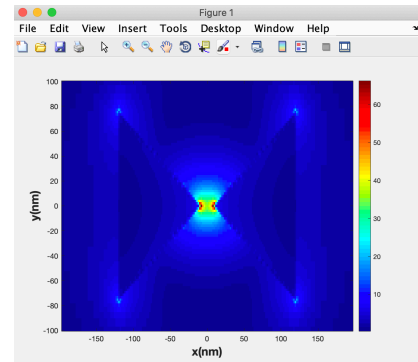


Figura 61. Campo eléctrico

Y como se ha dicho anteriormente, con esta estructura se ha conseguido la misma respuesta que con el primer diseño pero se ha reducido considerablemente la cantidad de metal en la nanoantena.

Estructura 3

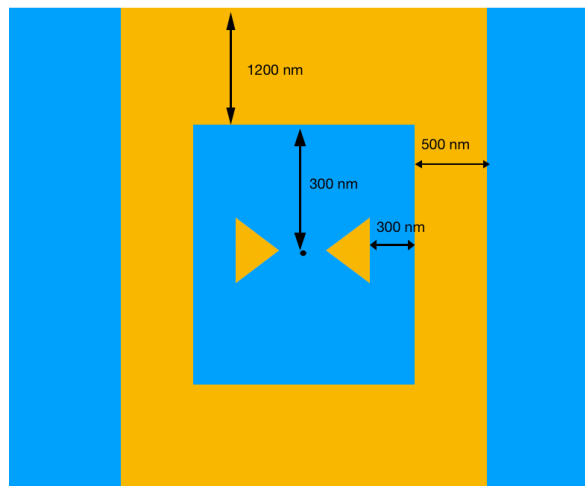


Figura 62. Estructura 3

Para esta tercera estructura se ha optado por ampliar el espacio entre placas. La intención es conseguir, con un mismo esquemático, una maximización de campo en el visible y una respuesta a 10 μm , por este motivo se ha ampliado el tamaño de la rendija, para poder analizar el valor de campo en el visible con una rendija similar a la diseñada en el apartado 4.1. Este capítulo se centra únicamente en la maximización del campo en el visible, porque con la rendija ya obtenemos el resultado a 10 μm .

Para esta estructura, como se verá a continuación, los espectros de reflexión y transmisión no experimentan ninguna variación, ya que, las estructuras son bastante similares y solamente observaremos modificaciones en el valor del campo eléctrico. Como se ha dicho, la respuesta del campo eléctrico sí que experimenta algunos cambios. Esto se debe por la situación y dimensiones de los componentes, al ser los esquemáticos similares, los espectros obtienen sus máximos en la misma posición, pero lo que sí que varía es el valor de esos espectros. Por este motivo el valor de campo sufre un ligero cambio.

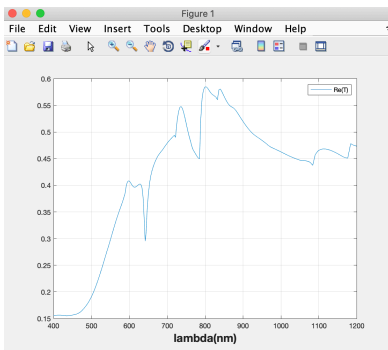


Figura 63. Espectro de reflexión

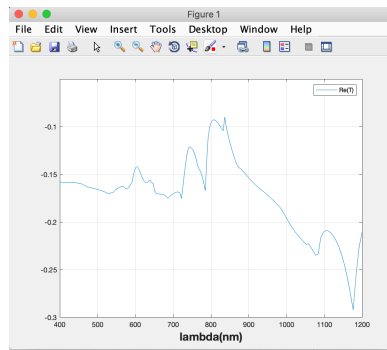


Figura 64. Espectro de transmisión

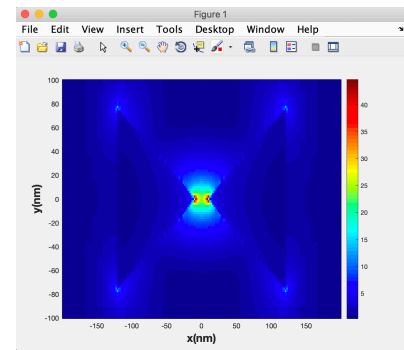


Figura 65. Campo eléctrico

Como se ha comentado anteriormente, los espectros de reflexión y transmisión son prácticamente iguales que en las estructuras anteriores, la diferencia para este diseño aparece con la respuesta del campo eléctrico. En este, el campo eléctrico disminuye notoriamente llegando a reducir su valor 20 V/m comparado con los diseños anteriores.

Estructura 4

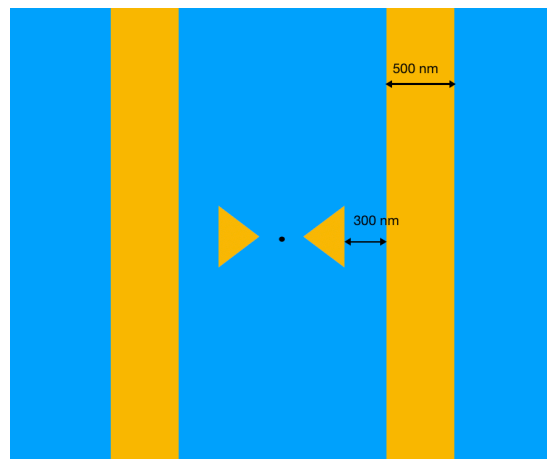


Figura 66. Estructura 4

Esta estructura es la misma que se ha simulado a principios del apartado 4.2, en la figura 45. Esto se debe a el interés de conseguir modificar esta primera estructura en la que se obtuvo el mejor resultado hasta el momento, separando las placas metálicas de oro 300 nm de la antena a la Bow-tie. Se ha introducido también en este apartado porque finalmente se quiere realizar una comparación de todas las estructuras juntas para poder identificar cuál de ellas ofrece un mejor rendimiento de la nanoantena.

A continuación aparecen los espectros y la respuesta de campo de este diseño, ya mencionado anteriormente, es la respuesta que aparece en las figuras 47, 48, 49, con una separación de placas de 300 nm. Pero lo más característico de este diseño se verá en la siguiente estructura, porque el siguiente diseño es el mismo pero con una pequeña modificación que cambia por completo la respuesta del campo, los espectros corresponden en sus respectivas posiciones, como ya hemos explicado anteriormente.

Por tanto, en el siguiente paso se verán las diferencias que se pueden conseguir solamente con una simple modificación.

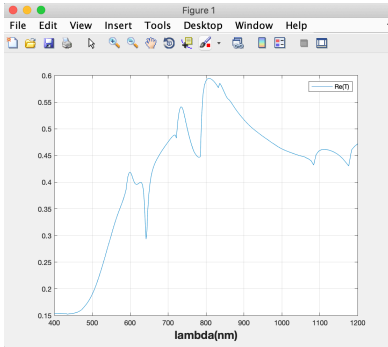


Figura 67. Espectro de reflexión

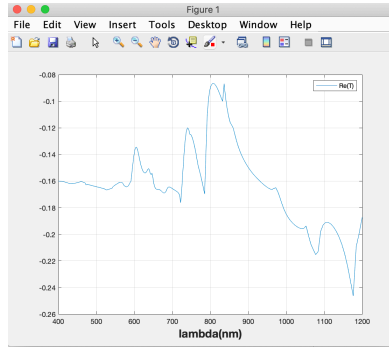


Figura 68. Espectro de transmisión

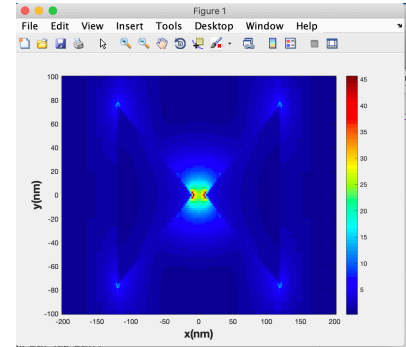


Figura 69. Campo eléctrico

Estructura 5

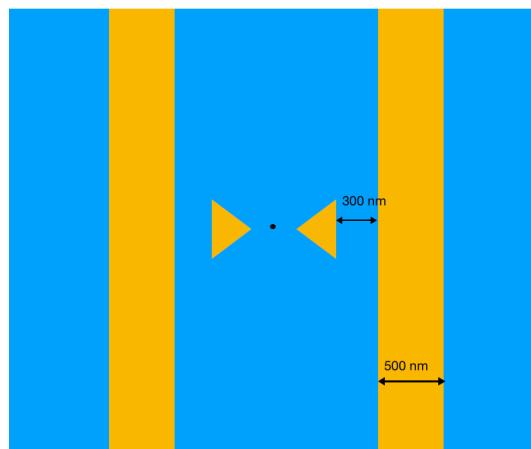


Figura 70. Estructura 5

Aquí podemos observar la misma estructura que en el apartado anterior, solo que, el grosor de la antena Bow-tie ha sido reducido a 24 nm, mientras que en el esquemático anterior la antena tenía un grosor de 50 nm. Con este nuevo diseño, se pensó que podría ser posible concentrar mayor cantidad de campo, ya que las placas metálicas eran más gruesas que la nanoantena Bow-tie y podrían captar mayor cantidad de señal y por tanto se realizó el experimento.

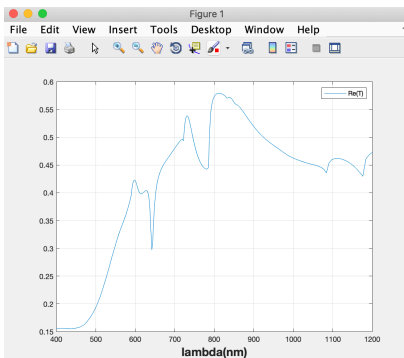


Figura 71. Espectro de reflexión

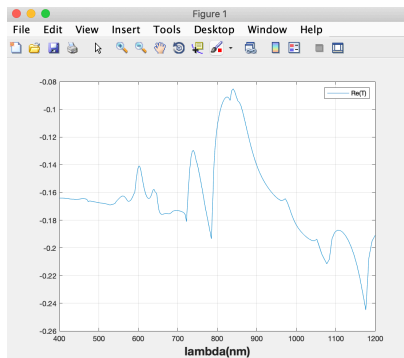


Figura 72. Espectro de transmisión

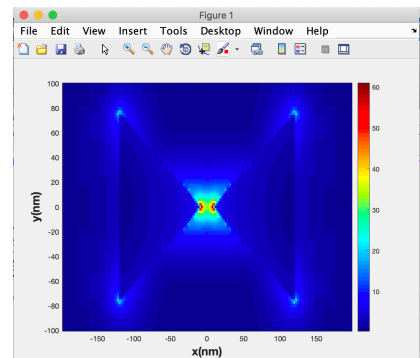


Figura 73. Campo eléctrico

A simple vista, es fácil identificar que los espectros de reflexión y transmisión son muy similares a los espectros evaluados anteriormente en los que únicamente cambiaba el grosor de la Bow-tie. En este esquemático, existe una mejora y una diferencia respecto al esquemático anterior, ya que, reduciendo el grosor ha sido posible aumentar la respuesta del campo eléctrico en la nanoantena, un aumento de 15 V/m, con los que se consigue captar un total de 60 V/m.

Estructura 6

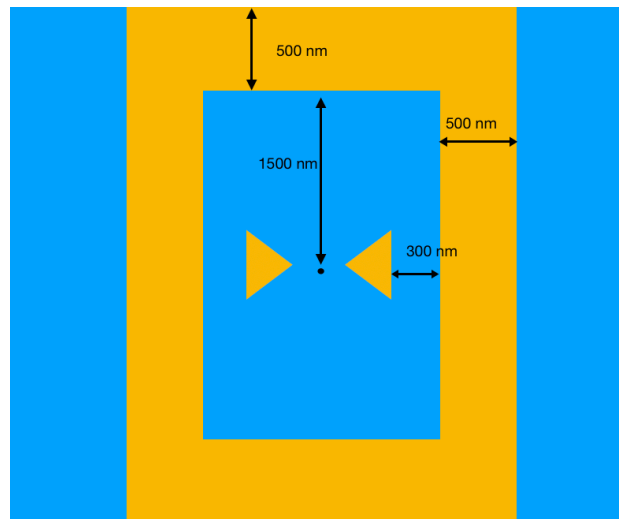


Figura 74. Estructura 6

Para esta penúltima estructura, la intención ha sido introducir unas placas metálicas paralelas al eje horizontal que atraviesa la antena Bow-tie a una distancia suficientemente separadas para que no interfieran con la respuesta de la rendija y al mismo tiempo consiga aumentar el valor de campo en el gap. Como se puede comprobar, es la misma estructura que la analizada en la figura 62, pero en este diseño las tiras de oro son más estrechas. Este diseño se ha hecho para poder compararlo con el de la tercera estructura, como se verá a continuación.

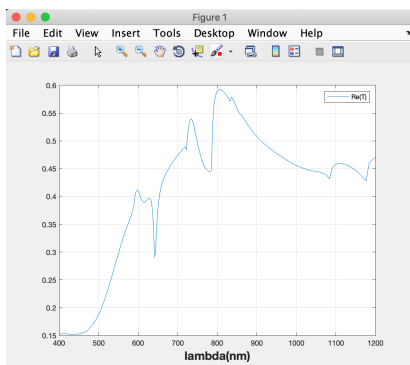


Figura 75. Espectro de reflexión

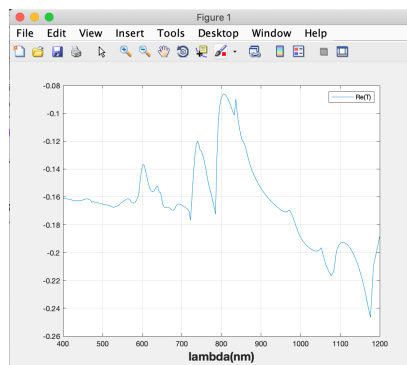


Figura 76. Espectro de transmisión

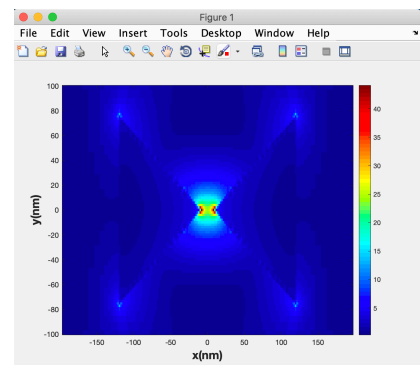


Figura 77. Campo eléctrico

Para este esquemático, es fácil darse cuenta que se obtiene casi el mismo resultado que con la estructura tercera. Al reducir el ancho de las tiras de oro el resultado continúa siendo prácticamente el mismo, se ve que los espectros de la señal obtenida en la nanoantena son bastante similares y la respuesta del campo es la misma, se consigue un valor de 40 V/m.

Estructura 7

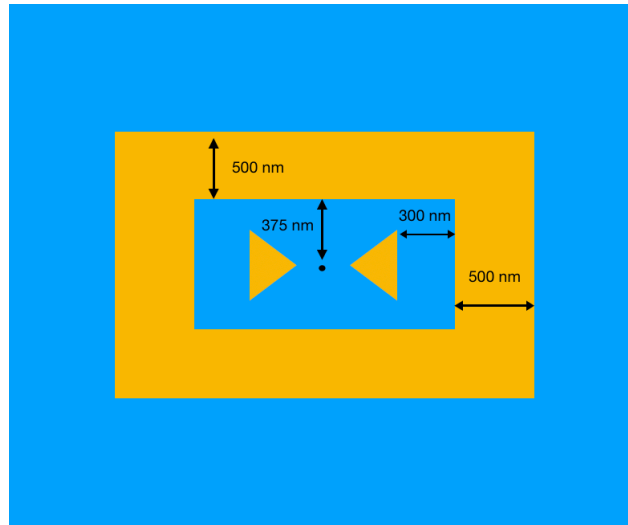


Figura 78. Estructura 7

Para esta última estructura, se ha decidido aumentar la distancia de separación entre las placas paralelas a la antena Bow-tie, dejando un espacio de 375 nm de aire entre el centro de la antena y la placa, una diferencia de 75 nm con respecto a la estructura 2. Esa es la única diferencia que existe entre ambas estructuras, por tanto, el resultado no debería ser tan diferente respecto a la segunda estructura diseñada.

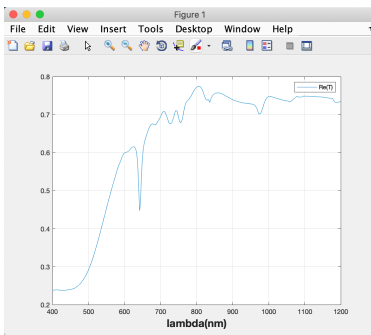


Figura 79. Espectro de reflexión

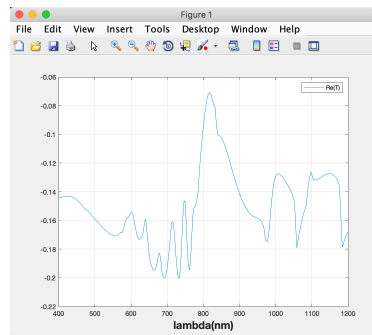


Figura 80. Espectro de transmisión

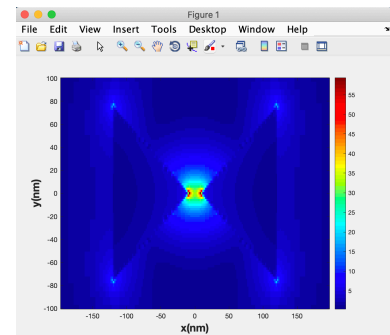


Figura 81. Campo eléctrico

Para esta estructura la respuesta obtenida en los espectros es prácticamente la misma, pero si se analiza detalladamente se observa una variación en los valores máximos que aparecen en los espectros y en la respuesta del campo. Por ejemplo, en esta estructura, el máximo valor obtenido en el espectro de reflexión ronda casi los 0.8T mientras que en la estructura a comparar dicho valor está cerca de los 0.9T, por tanto se obtiene un mayor valor de campo. Tampoco se observa una gran diferencia, pero claro, a mayor valor de campo mejor rendimiento de la nanoantena.

En esta estructura anterior la única variación que existe respecto a la estructura 2 corresponde con la distancia de separación de las placas. En verdad, se está utilizando prácticamente la misma cantidad de oro, por tanto económicamente se está hablando de la misma estructura y es fácil apreciar que con la misma estructura y la misma cantidad de oro, el segundo diseño resulta ser mejor.

5. 1. Comparación de todos los modelos diseñados

En esta parte del proyecto se observarán las diferencias que existen entre las siete estructuras anteriores, mediante comparaciones conjuntas. Esto servirá para estudiar los diseños con mejor detalle y realizar las comparaciones de una manera más sencilla. De este modo se van a observar los espectros de reflexión y transmisión y la respuesta del campo eléctrico en las mismas gráficas para poder identificar las diferencias que existen entre ellas de forma más rápida.

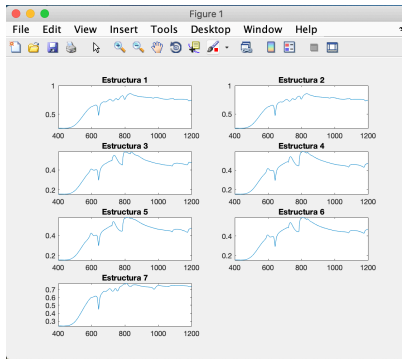


Figura 82. Espectro de reflexión

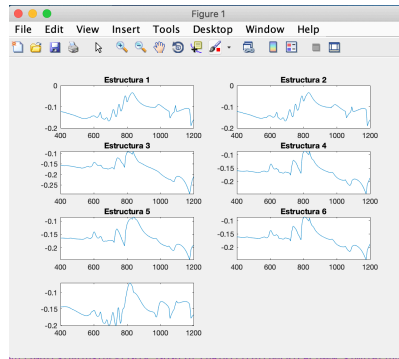


Figura 83. Espectro de transmisión

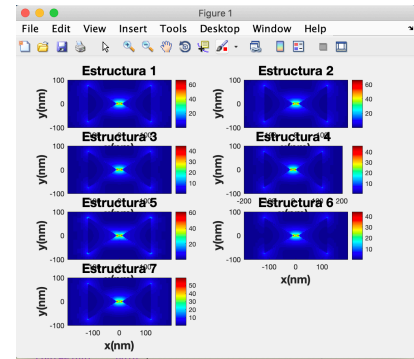


Figura 84. Campo eléctrico

En la figura 82 aparecen los espectros de reflexión para todas las estructuras diseñadas anteriormente. Como se puede ver, estos son prácticamente los mismos pero se pueden encontrar algunas diferencias con los espectros de la estructura 1, 3 y 7, ya que, estas estructuras poseen algunas diferencias respecto al resto, que se podría decir que son relativamente parecidas. Lo mismo pasa con los espectros de reflexión, se observan diferencias en las mismas estructuras.

Respecto a la respuesta del campo eléctrico es posible identificar que a mayor cantidad de oro, mayor es el confinamiento de la señal, pero esto también depende de la posición de estas, porque si se compara la estructura 2 con la 4, a simple vista se puede observar que se obtiene mayor valor de campo al situar mayor cantidad de oro más cerca de la nanoantena Bow-tie que separando las tiras en los costados de esta. Sin embargo, si se realiza la comparación entre la estructura 2 y la 3, es fácil identificar que en la estructura 2 al estar las placas de oro más cercanas a la Bow-tie y de tener unas dimensiones relativamente normales, en el esquemático se obtiene una respuesta mucho mejor que en la estructura 3 donde se ha introducido demasiado oro en una posición poco conveniente para la nanoantena.

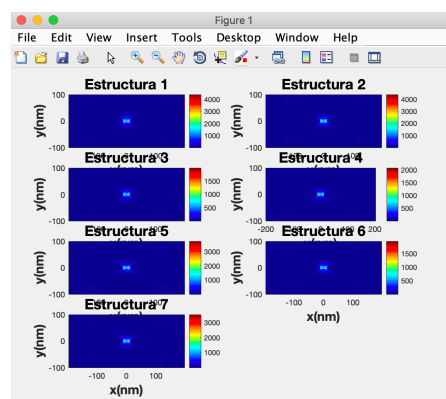


Figura 85. Campo $|E|^2$

Todas las estructuras hacen pensar cual será la más conveniente para el diseño final, pero realmente todavía no se pueden realizar decisiones firmes, ya que, se tienen que realizar comparaciones de estos diseños con el diseño realizado por los compañeros de EPFL [10] y esto podría proporcionar algunas ideas de modificación del proyecto estudiado. Cabe añadir que la mejor respuesta obtenida hasta el momento ha sido la de la figura

70, pero este diseo de las Bow-ties es bastante parecido al diseo realizado por los compaeros de EPFL, que será estudiado y comparado a continuaci3n.

Gracias a esta estructura citada anteriormente, la que corresponde con el diseo de EPFL, surgi3 la idea de modificar el diseo que est siendo estudiado para ver si de este modo sera posible mejorar la captaci3n de la seal de campo en el visible. Para ello, se redujo el grosor de la antena Bow-tie, como se ha visto en la estructura numero 5 y con ello se obtuvo un resultado bastante parecido al del estudio realizado por la Politècnica de Lausana . Este era el objetivo principal, crear una nanoantena dual alternativa a la diseada por EPFL. Si se realiza una comparaci3n de los resultados de la estructura 5 con los que se verán a continuaci3n el resultado es bastante bueno en similitud y en la cantidad del valor de campo captado en el visible.

6. Comparaci3n con la Antena Dual EPFL

Este capítulo va a centrarse en la comparaci3n del nanodetector dise±ado por la Escuela Politècnica Federal de Lausana [10] con el que está siendo estudiado. Se podra decir que este proyecto consiste en un dise±o alternativo del nanodetector de EPFL, ya que, se ha utilizado este dise±o un poco como referencia para el estudio de este proyecto. La finalidad de ambos proyectos es la misma: conseguir un nanodetector que pueda convertir esa radiaci3n de THz a una radiaci3n del visible que se pueda detectar con detectores convencionales.

Para ello, se va a analizar dicha estructura paso a paso e identificar las diferencias que aparecen respecto al dise±o que está siendo estudiado. Por ello, se va a comparar este modelo con algunos evaluados también en el capítulo 5 pero, principalmente, este capítulo se centrará con el mejor dise±o evaluado. Este dise±o corresponde con el esquemático que aparece al inicio del capítulo 4.2, las figuras 45 y 46, el cual ya ha sido evaluado y analizado en los anteriores capítulos, pero todavía se realizaran algunas pinceladas sobre dicho dise±o.

Para empezar con este capítulo, es importante recalcar que ambos dise±os constan con un sustrato similar, que tiene un índice de refracci3n entre 1.47 y 1.5. También, ambos utilizan las antenas Bow-tie para poder captar la respuesta de campo eléctrico en el visible. Las diferencias aparecen con los distintos tama±os en las Bow-ties y también con las tiras de oro; estas también sufren modificaciones en sus dimensiones y en la posici3n.

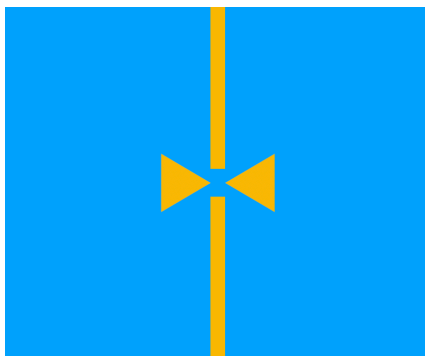


Figura 86. Dise±o EPFL

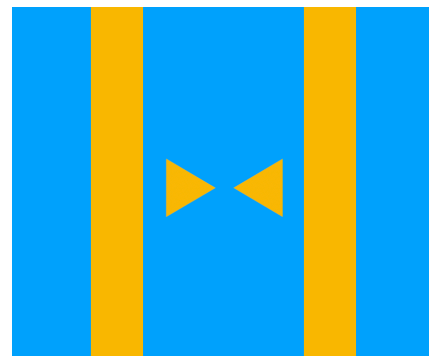


Figura 87. Nuestro nanodetector

En estas dos figuras se pueden observar las diferencias que existen entre ambos esquemáticos. A simple vista solamente se observa una diferencia, la dimensi3n y la posici3n de las placas metálicas, pero más adelante se evaluarán ambos dise±os con más detalle y se podran comparar las diferencias de ambos resultados.

En el dise±o de EPFL, que corresponde con la figura 86, se observa que las placas de oro están muy cerca del gap de la Bow-tie. Con este dise±o se conseguira un fuerte valor de campo en dicho espacio y de este modo también disminuira bastante la cantidad de oro empleada para el esquemático. Para el dise±o que está siendo estudiado, que corresponde con la figura 87, las tiras de oro no solo sirven para confinar una mayor cantidad de campo, sino también para obtener la respuesta a la longitud de onda deseada, 780 nm.

Respecto a las antenas Bow-ties destacan algunas diferencias en las dimensiones. En el dise±o de EPFL la Bow-tie es más peque±a y menos gruesa con lo que abarca un menor espacio sobre el sustrato. Mientras que en el dise±o a estudiar se ha optado por un aumento del tama±o de la nanoantena Bow-tie, aumentando también su grosor.

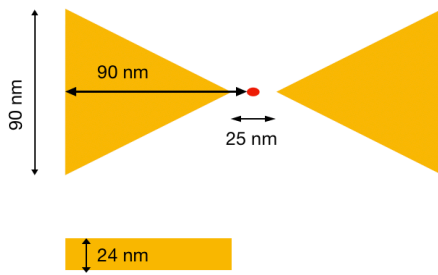


Figura 88. Bow-tie EPFL

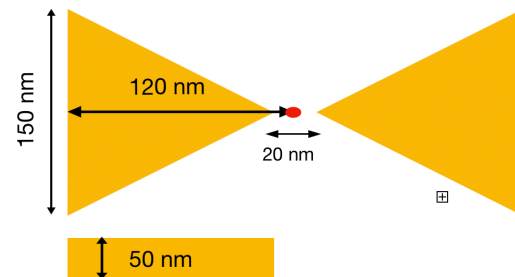


Figura 89. Nuestra Bow-tie

En estas dos figuras se pueden observar las diferencias de tamaño en las antenas Bow-tie. Hay dos características que destacar: la primera de ellas es la posibilidad de obtener un mayor valor de campo con una antena más estrecha y, la segunda, el tamaño del gap del diseño de EPFL, siendo este de 25 nm. Este pequeño aumento del gap ayuda a situar la respuesta en el visible cerca de los 800 nm pero, por el contrario, esta modificación reduce el valor de campo. Por ello sitúan las tiras de oro en la parte superior e inferior del gap para conseguir rodear el gap de oro y aumentar el valor del campo. El efecto que se consigue al aumentar el tamaño del gap en el diseño de EPFL se consigue, en el diseño estudiado, con la incorporación de las tiras de oro a los costados de la antena Bow-tie, es decir, al introducir la rendija. Estos procesos son interesantes, ya que se consiguen los mismos objetivos pero por distintos caminos. Una de las alternativas que parece interesante para implantar en el proyecto es la reducción del grosor de la antena Bow-tie como se ha hecho en el diseño de la Politécnica de Lausana. Por este motivo, en el capítulo 5, la estructura 5 ha sido evaluada con las mismas dimensiones pero reduciendo el grosor de la nanoantena Bow-tie. Con esta pequeña modificación se mejora bastante la captación de campo en el gap del diseño a estudiar.

Respecto a las tiras de oro también se experimentan ciertas modificaciones, a parte de la posición de cada una de ellas. La finalidad de las placas de oro en este proyecto es conseguir mayor valor de campo y, al mismo tiempo, situar la respuesta a la longitud de onda deseada. A continuación se verán las diferencias de las tiras respecto a ambos diseños:

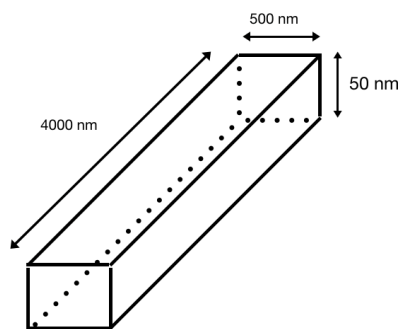


Figura 90. Dimensiones de nuestra rendija provisional

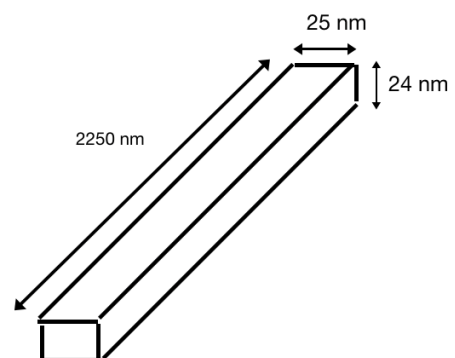


Figura 91. Estructura EPFL

Existen ciertas diferencias a comparar entre ambos proyectos. Para este proyecto, el que corresponde con la figura 90, se ha optado por introducir una tira de oro más ancha y más gruesa con la intención de confinar mayor campo. Por lo contrario, en el modelo de EPFL se observa un diseño más estrecho y menos grueso. Este modelo creado por los compañeros de EPFL es tan estrecho debido al modo que han elegido de implementación. Este diseño emplea la rendija para completar una superficie de oro que rodee el gap de la antena Bow-tie, por lo tanto, con ese tamaño consiguen su objetivo perfectamente.

Estos dos diseños que tienen la misma finalidad son muy distintos, pero de un modo u otro consiguen complementarse para obtener la mejor respuesta posible.

A continuación se van a comparar los resultados de ambos diseños para observar cuál de ellos es mejor y si se pueden realizar ciertas mejoras sobre este diseño, ya que, el diseño de EPFL puede ser una fuente de inspiración a la hora de crear un nuevo esquemático.

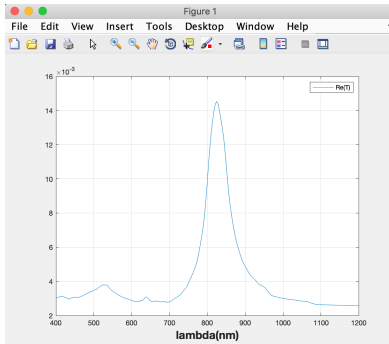


Figura 92. Espectro de reflexión EPFL

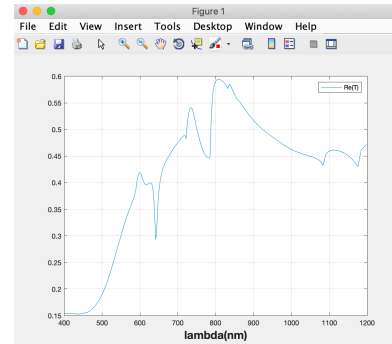


Figura 93. Espectro de reflexión de nuestro diseño

Respecto al espectro de reflexión se puede observar que el de la figura 92, que corresponde al diseño de EPFL, obtiene una respuesta mucho más limpia de interferencias que la mostrada en este proyecto. En dicho espectro aparecen tantas interferencias por las tiras de oro y también por la modificación de la periodicidad. El pico del espectro aparece en la misma posición para ambos diseños, solo que en la respuesta de este proyecto el valor de (T) es mucho más grande que en el diseño a comparar.

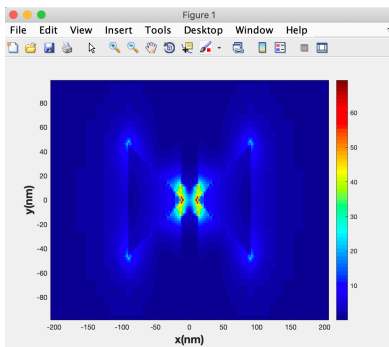


Figura 94. Campo eléctrico EPFL

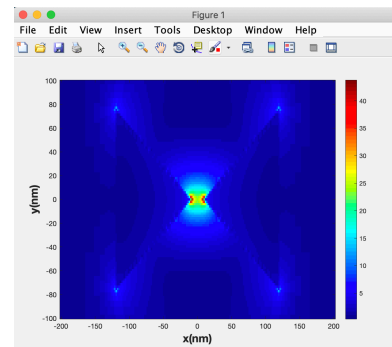


Figura 95. Respuesta de campo para nuestro diseño

Comparando la respuesta del campo eléctrico de ambos diseños, se observa una gran diferencia en los resultados obtenidos. El diseño realizado por la Politécnica de Lausana obtiene una cierta ventaja sobre el diseño estudiado, ya que, consigue obtener un valor de un poco más de 60 V/m en el gap de la Bow-tie. Este resultado es bastante elevado comparado con los 40 V/m que se obtiene en este diseño.

En este punto fue donde se decidió intentar realizar algunas modificaciones para este proyecto con la finalidad de optimizar el nanodetector al máximo. Uno de los primeros pasos que se hicieron, que se verá a continuación, fue simular el diseño a estudiar con la antena Bow-tie diseñada por los compañeros de EPFL. Más tarde, al conseguir analizar este diseño se continuó realizando pruebas para saber qué faltaba en este diseño para conseguir una respuesta mejor o similar que la de EPFL. Después de analizar varios estudios sobre los nuevos diseños, que contenían una pequeña mezcla de ambos proyectos, se encontró una pequeña diferencia que podría resultar el problema de la poca captación de campo.

En el siguiente capítulo se analizarán algunas estructuras para determinar cuál es el inconveniente que marca la diferencia entre ambos diseños.

6. 1. Optimización del diseño estudiado

Como se ha dicho anteriormente, se necesitaban realizar varias simulaciones en este proyecto con distintos diseños empleados en el proyecto de EPFL para encontrar dónde estaba el problema. En primer lugar, se decidió analizar la estructura estudiada con la antena Bow-tie del diseño de los colaboradores para analizar su respuesta y compararla con resultados anteriores.

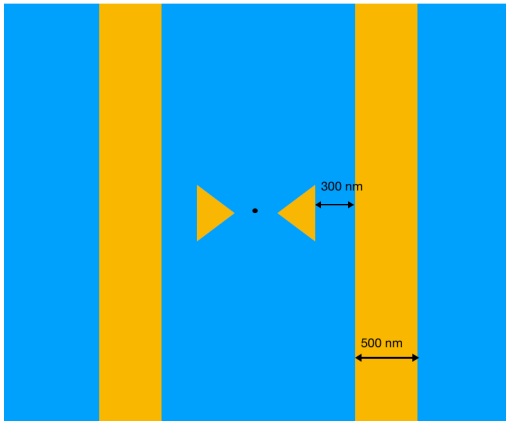


Figura 96. Estructura del nanodetector

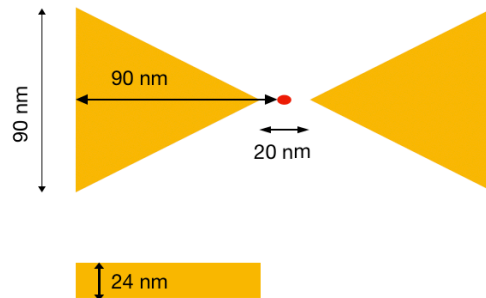


Figura 97. Bow-tie EPFL

Aquí se puede observar la misma estructura estudiada en este proyecto con la diferencia de que se ha modificado totalmente la antena Bow-tie (figura 97). Esta antena corresponde con la misma del diseño de EPFL y, al compararla con la figura 88, se observa que son prácticamente las mismas, sólo varía la longitud del gap en 5 nm de diferencia.

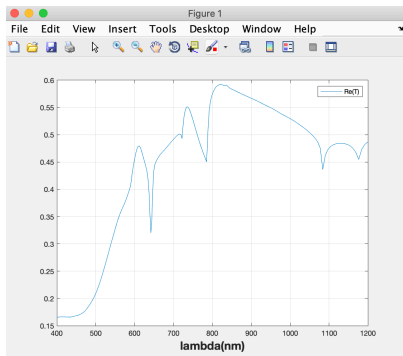


Figura 98. Espectro de reflexión

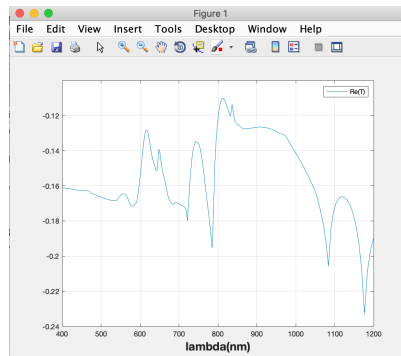


Figura 99. Espectro de transmisión

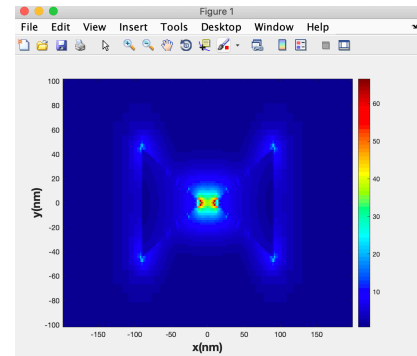


Figura 100. Campo eléctrico

Con este diseño se obtienen los espectros de reflexión y transmisión con gran similitud respecto a los espectros anteriores. Se llega a los mismos valores de amplitud pero, en este caso, el campo eléctrico obtenido en la nanoantena estudiada es más elevado, llegando a 60 V/m, un valor bastante adecuado para este diseño. Con esta respuesta sería más que suficiente para hacer vibrar las moléculas con las que más tarde se podría detectar la señal en THz. En este diseño hay cierta incertidumbre, ya que no se sabe si estos resultados han sido obtenidos por el cambio de dimensiones del triángulo o por haber reducido el grosor de estos y, por lo tanto, se decidió continuar con una serie de nuevas estructuras con las que comparar resultados y ver cuál de todas las diseñadas era capaz de obtener un mayor rendimiento. A pesar de que el valor obtenido con esta estructura es bastante bueno, porque se consigue la respuesta a la longitud de onda deseada y también un valor de campo bastante envidiable, la intención sigue siendo perfeccionar la antena Bow-tie para obtener un resultado todavía mejor, ya que en este punto se está utilizando la Bow-tie del diseño de EPFL. Sin embargo, sino se obtuviera ningún resultado mejor o similar, perfectamente se podría plantear la idea de seleccionar esta estructura anterior con la que, después de un largo estudio, se ha obtenido una de las mejores respuestas de todo este proyecto.

Despu3s de haber hecho un estudio con distintas estructuras en este proyecto podemos afirmar que ambos procesos, el cambio de dimensiones del tri3ngulo y la reducci3n del grosor de estos, influyen en la respuesta obtenida. En relaci3n con las dimensiones del tri3ngulo, lo que se consigue al reducir o ampliar su longitud es que la respuesta se mueva a lo largo de la longitud de onda. Por los estudios realizados se ha observado que a mayor longitud del tri3ngulo, la respuesta se obtiene a mayor longitud de onda y cuanto menos gruesa sea la Bow-tie, mayor confinamiento de campo se obtiene en el gap de la antena. Por lo tanto, se ha dise1ado una nueva antena Bow-tie con la que se consigue una respuesta muy apropiada para nuestro proyecto.

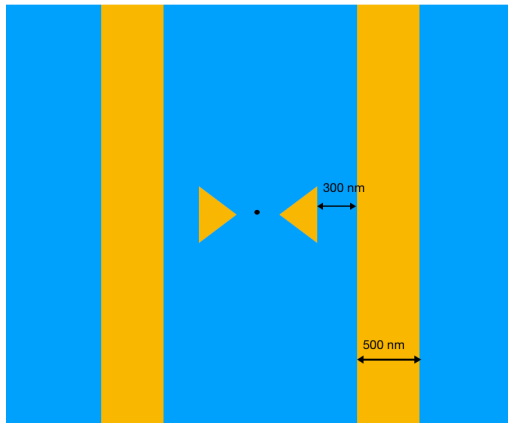


Figura 101. Estructura del nanodetector

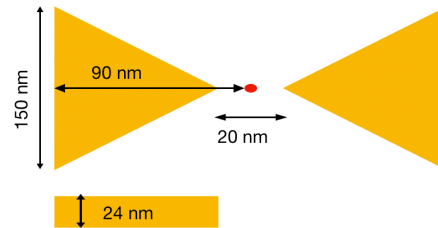


Figura 102. Bow-tie optimizada

En este nuevo dise1o, lo 3nico que se observa es un cambio en la antena Bow-tie, figura 102. En esta figura se puede observar una modificaci3n de la longitud de los tri3ngulos para conseguir la respuesta m3s cerca a la longitud de onda de 780 nm. De la misma forma, se ha conservado la amplitud del tri3ngulo, para conseguir confinar la misma cantidad de campo el3ctrico. Finalmente, se ha reducido el grosor de esta nanoantena Bow-tie a pr3cticamente la mitad, ya que, se ha observado despu3s de varias simulaciones, que con ese grosor espec3fico se consigue obtener un acierto en la respuesta del campo. La modificaci3n realizada en esta antena Bow-tie se puede comparar perfectamente con las figuras 89 y la 102, ah3 se perciben las diferencias entre ambas. A continuaci3n se van a analizar los espectros y resultados obtenidos con este nuevo dise1o:

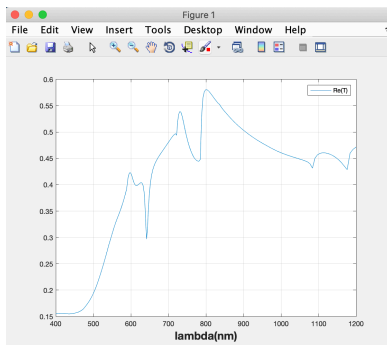


Figura 103. Espectro de reflexi3n

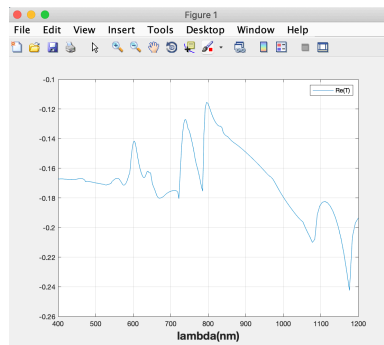


Figura 104. Espectro de transmisi3n

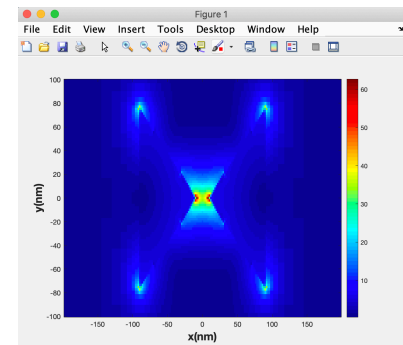


Figura 105. Campo el3ctrico

Si se analizan con detalle los espectros de reflexi3n y transmisi3n, se ha conseguido mover la respuesta muy cerca de los 790 nm de longitud de onda, por lo tanto, es una buena caracter3stica a tener en cuenta, ya que, la intenci3n es acercarse lo m3ximo posible a los 780 nm. Si se compara con la respuesta de EPFL que corresponde con la figura 85, el espectro de reflexi3n alcanza su m3ximo alrededor de los 840 nm. Con esta serie de modificaciones realizadas, se ha conseguido una respuesta 50 nm m3s a la izquierda, que es bastante significativa para este nanodetector dise1ado. Respecto al campo el3ctrico, se puede visualizar en la figura 105 que los tri3ngulos son diferentes que en los espectros anteriores y con esta antena Bow-tie se consiguen sobrepasar los 60 V/m.

Como se ha hecho en varios apartados del proyecto, como en el [capítulo 4.2.1](#), se ha comparado el diseño estudiado con la misma estructura pero sin metales. Este proceso se hace por el siguiente motivo: lo interesante es el valor de la potencia de la fuente con la que iluminamos. El valor absoluto de campo no aporta información en este proyecto. Se necesitan valores normalizados de campo con respecto a la misma estructura sin metales, eso es lo que dará la mejora. De hecho, el parámetro clave es $|E/E_0|^4$, donde E es el campo con metales (antena Bow-tie y antena rendija) y E_0 es el campo sin metales. Por este motivo en apartados anteriores se realizaban las comparaciones o se mostraban los resultados de E^2 , para hacerse la idea de la mejoría de los diseños analizados.

En este capítulo se ha conseguido obtener un diseño que ofrece los resultados esperados en este proyecto, dicho diseño correspondiente a las figuras 101 y 102. Con este diseño se pretende construir esta estructura física para realizar pruebas reales y comparar y analizar si realmente esta estructura es capaz de alcanzar sus objetivos. Este proceso conlleva realizar un gran paso para este proyecto, ya que, todos los resultados obtenidos hasta ahora proceden de simuladores y la respuesta podría cambiar totalmente con un experimento real de este proyecto estudiado. Por ese motivo, se va a realizar la comparación del campo eléctrico obtenido en algunas estructuras respecto a las estructuras sin metales y de este modo observar la mejoría de la señal percibida.

Se van a comparar 3 diseños analizados anteriormente: el diseño de EPFL, la primera estructura diseñada en este proyecto, que corresponde con la del inicio del [capítulo 4.2](#) y la nueva estructura de la figura 101. Aquí se va a comparar solamente el parámetro $|E/E_0|^4$ de las estructuras citadas. Estas estructuras han sido evaluadas en la banda del visible, para determinar el valor de campo para las diferentes Bow-ties.

	E	E_0	$ E/E_0 ^4$
Diseño EPFL	69.46 V/m	$9.5091 \cdot 10^{-1}$	$28.4696 \cdot 10^6$
Diseño 1 (Fig. 45, 46)	43.79 V/m	$9.5050 \cdot 10^{-1}$	$4.5049 \cdot 10^6$
Diseño 2 (Fig. 101, 102)	62.74 V/m	$9.4427 \cdot 10^{-1}$	$19.4891 \cdot 10^6$

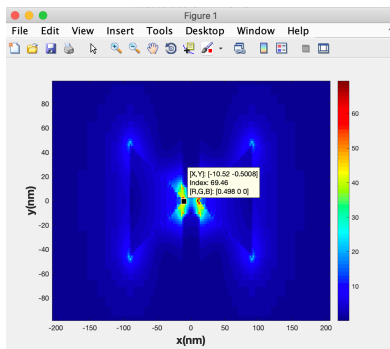


Figura 106. Diseño EPFL

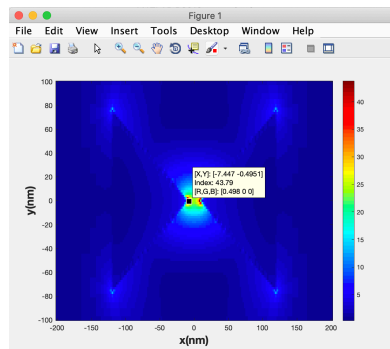


Figura 107. Diseño 1

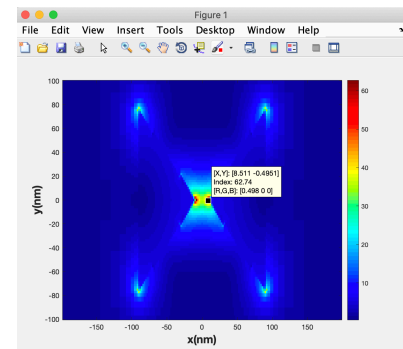


Figura 108. Diseño 2

En estos tres diseños que estamos comparando, para el valor del campo eléctrico sin metales, E_0 , hemos obtenido prácticamente los mismos valores y esto se debe a que el sustrato utilizado es bastante similar en los tres casos. Para los dos diseños analizados en este proyecto se ha utilizado el sustrato de PMMA, con un índice de refracción entre 1.4905, la pequeña variación que aparece entre ellos se debe a que la respuesta se obtiene a distintas longitudes de onda, por lo tanto, también varía la respuesta sin antenas. Por otro lado, en el diseño de EPFL, utilizan como sustrato un material con un índice de refracción de 1.47, la diferencia es mínima. Sin embargo, en el momento de calcular los valores de campo con las estructuras completas, es decir, con antenas, sí que se observa una ligera variación en los valores. Estas pequeñas diferencias en los valores hacen que al calcular el parámetro de la potencia de la fuente con la que iluminamos $|E/E_0|^4$ se obtenga una gran diferencia en los resultados finales. Se puede ver en la gráfica que, aunque el segundo diseño consigue sobrepasar con una gran ventaja el primer diseño, este todavía queda muy atrasado respecto al valor obtenido con el diseño de EPFL. Puede que en un futuro con esta nanoantena ya construida, el valor obtenido sea diferente y supere al diseño de EPFL, pero de momento este es el resultado obtenido.

7. Simulaci3n de todo el sistema a frecuencias THz

Despu3s de todo el proceso de la obtenci3n de la rendija y tambi3n de la optimizaci3n de nuestra antena Bow-tie, se ha conseguido crear dos esquem3ticos con los que se alcanzan nuestros objetivos: confinamiento m3ximo en el visible y respuesta en el THz a 10 μm . En este capitulo se va a mostrar el nanodetector que se obtendr3a al juntar ambos diseos que se han realizado por separado, es decir, la parte de la rendija que corresponde con el [capitulo 4](#) y tambi3n la parte con las Bow-ties que corresponde con el [capitulo 3](#).

El proceso de simulaci3n en este caso es complicado, ya que la simulaci3n completa consta de un gran tamao y los resultados del simulador podr3an ser err3neos. Pero como las simulaciones realizadas por separado, vistas a lo largo del proyecto, han resultado ser un 3xito, finalmente, despu3s de tantas modificaciones y simulaciones, se ha conseguido obtener los resultados deseados.

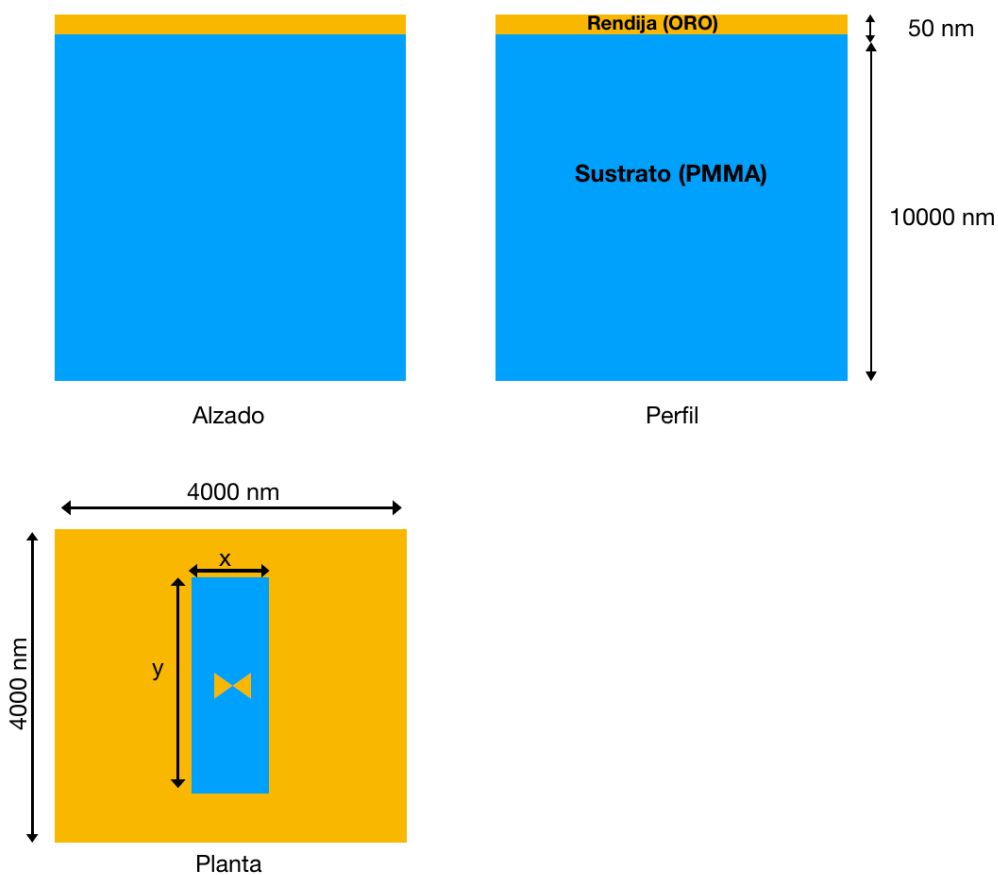


Figura 109. Estructura final de nanodetector

En esta figura numero 109 se tienen especificadas las vistas del nanodetector diseado. Se tiene una visi3n detallada del diseo para poder hacerse una idea del diseo de este nanoantena. Con este diseo se pretende detectar campos el3ctricos muy altos al iluminar en dos reg3menes frecuenciales muy diferentes: En el visible, longitud de onda de 750 nm para la cual se utiliza la Bow-tie y THz/infrarrojos. Para ello se usa la rendija, cuya longitud se fija para resonar a una cierta longitud de onda de THz/infrarrojos.

Para concluir con este proyecto, se propuso realizar una simulación completa con ambas estructuras conjuntas. Para este proceso se tuvo que ampliar el espectro de frecuencias para poder conseguir la respuesta de infrarrojos a 10 μm y, al mismo tiempo, conseguir un máximo confinamiento de campo en el visible a 780 nm. Lo que antes se estaba realizando por separado, en los diversos estudios de la rendija y de la Bow-tie, se va a concentrar en este capítulo. La simulación de este esquemático resultó ser un poco más complicada y sobretodo mucho más duradera, llegando a sobrepasar las 40 horas de simulación. En este esquemático se utilizó la estructura que aparece detallada en la figura 109. Para ser más específicos se utilizó la Bow-tie que corresponde con la figura 102, la última que ha sido optimizada y con la que se ha obtenido un valor de campo bastante razonable para nuestro diseño. Respecto a la rendija, se ha seleccionado la que corresponde con el [capítulo 4.1.3](#). Este diseño se caracteriza por el sustrato de cuarzo. Se ha elegido este diseño porque el cuarzo tiene un coeficiente de refracción muy similar al del PMMA, cerca de 1.5. Con este diseño, se obtuvo la respuesta en el THz con un periodo de simulación de 4000 nm y con una longitud de la rendija de 3300 nm (variable “y” de la figura 109). Para la separación entre la antena Bow-tie y la rendija, que ambas mantienen el mismo grosor, 50 nm, se decidió mantener la misma distancia evaluada en el [capítulo 4.2](#), 300 nm entre ambas antenas.

Con este nuevo esquemático se obtuvieron los siguientes resultados:

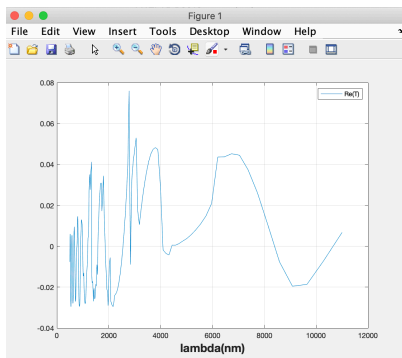


Figura 110. Espectro de reflexión

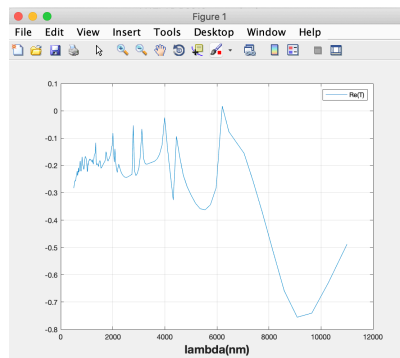


Figura 111. Espectro de transmisión

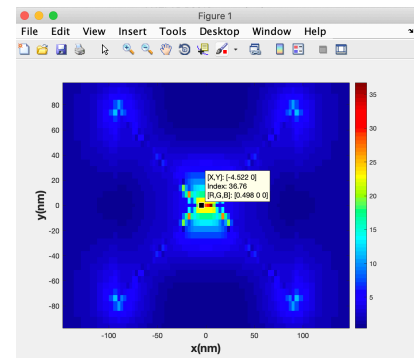


Figura 112. Campo eléctrico

En las figuras 110 y 111, que corresponde con la respuesta de reflexión y transmisión del nanodetector, se puede visualizar que el espectro analizado es mucho más amplio que para todos los analizados anteriormente, abarcando longitudes de onda desde los 500 nm hasta alcanzar los 12000 nm, con el objetivo de obtener ambos resultados, visible e infrarrojo.

El espectro de reflexión es bastante complejo de analizar, ya que se obtienen una gran cantidad de picos a lo largo de todo el espectro. Sin embargo, si se analiza el valor de campo a lo largo de todo el espectro, se obtiene el máximo valor de campo a la longitud de onda de 780 nm, un valor que, comparado con los resultados anteriores, es relativamente bajo, 36 V/m. Es posible que este valor haya decaído por la ampliación del espectro o simplemente por algún factor al introducir la rendija. Respecto a la respuesta del campo, cabe destacar que por un error en el mallado la calidad de la imagen es bastante deficiente.

Respecto al espectro de transmisión, se observa que se continua alcanzando la respuesta de infrarrojos a 10 μm , pero cabe destacar un pequeño detalle: en este punto, ya no se obtiene la respuesta exactamente a 10 μm , sino que la respuesta aparece un poco más a la izquierda. Esta pequeña variación surge por la introducción de la antena Bow-tie, que modifica la respuesta en el espectro.

Analizando el valor de campo del nanodetector respecto a la estructura sin metales, como se ha hecho en el capítulo anterior, se identifica un fuerte caída de dicho valor respecto a las estructuras previamente analizadas.

$$E = 36 \text{ V/m}$$

$$E_0 = 9.5 \cdot 10^{-1}$$

$$|E/E_0|^4 = 2.15 \cdot 10^{-6}$$

Para finalizar, cabe añadir, que se esperaba conseguir un mayor confinamiento de campo en el visible, parecidos a los evaluados con la rendija improvisada, [capítulo 4.2](#) y siguientes. Sin embargo, este valor obtenido resulta ser también bastante elevado. En este momento, se continúan realizando simulaciones con este esquemático para ver si es posible optimizar la respuesta y obtener un valor de campo superior y poder introducirlo en el proyecto, pero esta resultando ser bastante complicado, ya que se tienen que tener muchos factores en cuenta y el que más perjudica es el factor tiempo.

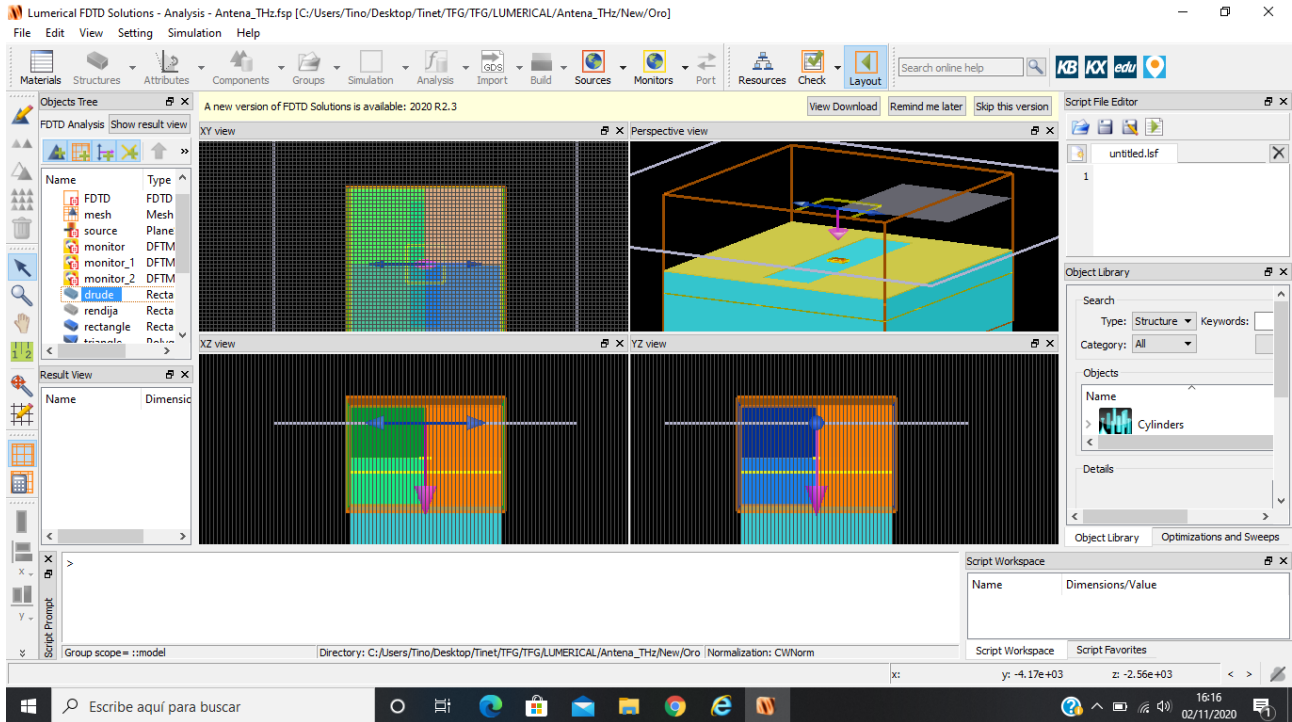


Figura 113. Simulación del nanodetector con Lumerical

8. Conclusión

En este proyecto, el objetivo principal desde el primer momento fue conseguir un alto valor de campo eléctrico en el gap de la Bow-tie para, de este modo, convertir esa radiación de THz en una radiación del visible que se pudiera detectar con detectores convencionales. Partiendo del primer diseño, el cual, ya se sabía de qué materiales y con qué componentes se quería diseñar, se empezó con una primera estructura para orientarse con qué tipo de diseños se estaba trabajando. Al obtener el primer resultado, se empezaron a analizar los resultados y realizar variaciones con la finalidad de alcanzar el objetivo. Este proceso de análisis fue largo, ya que las simulaciones eran bastante extensas, estas podían tardar aproximadamente siete u ocho horas. De este modo, cuando se detectaba un error o un problema con el que no se contaba, se tardaba varios días en conseguir solucionarlo porque solamente se podían realizar como máximo 3 simulaciones diarias y las modificaciones eran mínimas, porque no se quería cambiar por completo la respuesta del diseño. Se han realizado muchas modificaciones en este proyecto para poder conseguir finalmente una estructura suficientemente atractiva que corresponde con las figuras 101 y 102, añadiendo a esta la parte de la rendija, que corresponde con las figuras 33 y 34. Esto forma la totalidad del nanodetector diseñado en este proyecto, que podemos ver en la figura 109.

Este proyecto se realiza en el marco del Proyecto Europeo THOR. El propósito es conseguir darle vida a este diseño, construir este nanodetector y poder emplearlo en los días venideros para convertir las radiaciones de THz a una radiación del visible que se pueda detectar con detectores convencionales. Este proyecto ha sido elaborado gracias a la colaboración de varias universidades, la Universidad Politécnica de Valencia entre ellas, y podría marcar un gran cambio para las tecnologías modernas. La parte del proyecto que nos correspondía consistía en el diseño óptimo de este nanodetector, que en este momento se encuentra en proceso de construcción y en un futuro cercano se introducirán las moléculas en el interior del gap de la nanoantena diseñada para observar los resultados reales obtenidos de este detallado proyecto. Esta visión audaz, que se basa en los fundamentos de la interacción luz-materia, supera por completo cualquier paradigma tecnológico anterior relacionado con la medición de la vibración molecular THz, así como su posible manipulación.

9. Bibliografía

- [1] Nanophotonics Technology Center (NTC), as a research institute from the Universitat Politècnica de València (UPV)
- [2] Single-molecule optomechanics in ‘picocavities’. Felix Benz, Mikolaj K. Schmidt, Alexander Dreismann, Rohit Chikkaraddy, Yao Zhang, Angela Demetriadou, Cloudy Carnegie, Hamid Ohadi, Bart de Nijs, Ruben Esteban, Javier Aizpurua, Jeremy J. Baumberg. *Science* 354, 725-728 (2016): “ <https://culturacientifica.com/2016/11/14/la-optica-se-atmica-la-lente-mas-pequena-del-mundo/> “
- [3] Terahertz Detection Enabled by Molecular Optomechanics. Nanophotonics Technology Center – Universitat Politècnica de València: “THOR”
- [4] Wikipedia: “Espectroscopia infrarroja”
- [5] Alejandro Martínez, Nanophotonics, “Plasmonics”, 60
- [6] Wikipedia: “Espectroscopia Raman”
- [7] Edinburgh Instruments, “What is Raman Spectroscopy?”
- [8] Rekodbyte, “Nanoantenas: Un salto de eficiencia y de utilidad”
- [9] Ángel Cardama Aznar, Jordi Romeu Robert, Juan Manuel Rius Casals, “Antenas”, 319-326 (2004)
- [10] Philippe Roelli, Diego Martin-Cano, Tobias J. Kippenberg, and Christophe Galland, EPFL, Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Physics, Lausanne, Switzerland 2Max Planck Institute for the Science of Light, Erlangen, Germany, “Molecular platform for frequency upconversion at the single-photon level” (Dated: October 28, 2019)
- [11] Nahla A. Hatab, Chun-Hway Hsueh, Abigail L. Gaddis, Scott T. Retterer, Jia-Han Li, Gyula Eres, Zhenyu Zhang, and Baohua Gu, “Free-Standing Optical Gold Bowtie Nanoantenna with Variable Gap Size for Enhanced Raman Spectroscopy.”
- [12] Jose Miguel Miranda Pantoja, “Ingeniería de Microondas: Técnicas experimentales”, capítulo 10.
- [13] Ángel Cardama Aznar, Jordi Romeu Robert, Juan Manuel Rius Casals, “Antenas”, 265-270 (2004)
- [14] Wikipedia: “Principio de Babinet”
- [15] Hyeong-Ryeol Park, Kwang Jun Ahn, Sanghoon Han, Young-Mi Bahk, Namkyoo Park, and Dai-Sik Kim, “Colossal Absorption of Molecules Inside Single Terahertz Nanoantennas.”
- [16] Wikipedia: “Espectro electromagnético”
- [17] Rekodbyte: “Nanoantenas: Un salto de eficiencia y utilidad”