

# **Estudi d'Antenes a la banda dels THz**

Treball final de màster de Tomas Rabinal Behrs

**Màster en enginyeria de  
Telecomunicacions per la Universitat  
Oberta de Catalunya**

**Semestre Gener-Juny 2018**

**Professors: Dr. Jaume Anguera  
Dra. Aurora Andújar**

# Índex

Introducció i Motivació .....	1
1. Conceptes generals antenes RF, nanoantenes i THz .....	3
1.1 Principals paràmetres de les antenes .....	3
1.2 Conceptes generals sobre THz i nanoantenes .....	5
1.3 Diferències entre antenes RF y antenes òptiques.....	7
2. Tipus de materials de les nanoantenes.....	9
2.1 Materials.....	9
2.2 Per què l'or o metalls nobles en estructures nanomètriques?.....	16
3. Aplicacions de les nanoantenes .....	20
4. Tipus d'antenes .....	31
5. Processos i fabricació .....	35
5.1 Electron beam lithography.....	35
5.2 Solid-State superionic stamping.....	36
5.3 Laser micromachining.....	37
5.4 Sintetització de nanotubs.....	37
6. Caracterització.....	39
6.1 Instrumentació i conceptes generals .....	39
6.2 Espectroscopia no lineal.....	45
6.3 Anàlisi i resposta lineal.....	46
6.4 Caracterització d'antenes d'or, grafè i plata .....	48
7. Sumari.....	52
8. Bibliografía i recursos web.....	55

# ÍNDIX D'IL·LUSTRACIONS

FIGURE 1 (MYDARKSKY.ORG) .....	6
FIGURE 2 "OBLEES DE SILICI" [10]                      FIGURE 3 "OBLEA DE SILICI FOTOLITOGRAFIADA" [11] .....	12
FIGURE 4 "ESTRUCTURES ISOTRÒPICA I ANISOTRÒPICA DE LES OBLEES" [12] .....	13
FIGURE 5 "ANTENA AMB CRISTALL (EMXT)" [13] .....	14
FIGURE 6 "FOTODENSITAT ABSORBIDA PER AL CAMP ELECTRIC EN THZ MESURADA PER A LES DIFERENTS CAPES GRUIXUDES DE MATERIAL NBN" [16] .....	16
FIGURE 7 "ES TRACTA DE LA FUNCIÓ DIELECTRICA COMPARATIVA DEL NICKEL I L'OR" .....	17
FIGURE 8 "ESPECTRE PICS D'ABSORCIÓ A LES DIFERENTS FREQUÈNCIES" [3] .....	22
FIGURE 9 "EFICIÈNCIA DE RADIACIÓ D'UN DIPOL DE PLATA" [22]      FIGURE 10 "EFICIÈNCIA DE RADIACIÓ D'UN DIPOL D'OR" [22] ..	23
FIGURE 11 "NIVELLS D'ATENUACIÓ ALS DIFERENTS ENTORNS ATMOSFÈRICS I FREQUÈNCIA" [26] .....	25
FIGURE 12 [27] .....	25
FIGURE 13 [26] .....	26
FIGURE 14 "GEOMETRIA DE LA ANTENA 2D" [30]                      FIGURE 15 "GEOMETRIA DE LA ANTENA 3D" [30] .....	28
FIGURE 16 "SIERPINSKI TRIANGLE APLICAT A BOWTIE" [33] .....	31
FIGURE 17 "KOCH ISLAND & SIERPINSKI FRACTALS" [34] .....	31
FIGURE 18 "ANTENA HILBERT & ESPIRAL" [36] .....	32
FIGURE 19 "ANTENES BOWTIE, DIPOLS I YAGUI" [37] .....	33
FIGURE 20 "ESTRUCTURES ESPIRALS, FRACTALS I CRLH" [37] .....	34
FIGURE 21 "ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY" .....	36
FIGURE 22 "SUPERIONIC STAMPING" .....	36
FIGURE 23 "VNA UNIVERSITY OF GLASGOW" [43] .....	40
FIGURE 24 (COMPANY COHERENT) LÀSER .....	40
FIGURE 25 .....	41
FIGURE 26 "COMPANY LAKESHORE CRYOTRONICS, ANALITZADOR D'ESPECTRES" .....	42
FIGURE 27 [44] .....	43
FIGURE 28 [45] .....	44
FIGURE 29 [46] .....	44
FIGURE 30 .....	46
FIGURE 31 "GRÀFIC DE LINEARITAT EN RESSONÀNCIA I EL TAMANY DE LES ANTENES" [49] .....	47
FIGURE 32 "RESSONÀNCIA PLASMÒNICA EN DIFERENTS MIDES" [18] .....	49
FIGURE 33 "RESSONÀNCIA DE CAMP I REFLEXIÓ A LES DIFERENTS FREQUÈNCIES D'UN ARRAY DE NANO ANTENES DE CON" [51] .....	50
FIGURE 34 "CROSS SECTION A LONGITUD D'ONA D'UNA ANTENA DE CON PER A DIFERENTS VALORS DE REFLEXIÓ" [18] .....	50

## Introducció i Motivació

L'estudi de la banda de THz ha estat una nova via d'investigació dels últims 20 anys, on l'interès ha estat en molts camps i diferent àrees d'aplicació i segueix sent el focus principal d'estudi de la instrumentació de nova generació basada en electrònica per a THz. El principi el problema estava bàsicament en les possibilitats de fabricar emissors a la freqüència de THz, que en un primer moment es realitzava a partir de polsos continus i més tard a en TDS-THz en el domini del temps. En el 1965 Fritz Zernike va fer passar un feix de làser per una estructura de quars iniciant una nova era a la física del moment. Aquest tipus de feix s'anomenaven T Rays. Les primeres aplicacions eren els escàners dels aeroports, és a dir la obtenció de imatges dels materials a partir de la penetració de la longitud d'ona de la radiació. La segona va ser l'aplicació a la medicina.

El que fa motivant l'estudi d'aquest camp és la capacitat tecnològica que s'ha de tenir per a realitzar estructures i antenes a grandàries de  $10^{-9}$ m. Les nano antenes seran la base de les comunicacions per a rebre i transmetre la informació per a sistemes electrònics a nano escala, un camp molt interessant per exemple seria la medicina. Un altre punt d'interès és que el comportament conductor de les antenes a RF tal i com les hem estudiat i coneixem, no és igual que a freqüències de THz i freqüències òptiques, doncs els mateixos conductors tindran pèrdues molt grans quan es treballa a nano escala, d'aquí que surt la necessitat d'aplicar altres metalls nobles que tinguin un comportament adequat al rang de freqüències, un tema de gran interès que mereix l'estudi.

A més el futur proper més prometedor ens parla d'intel·ligència artificial i d'Internet of Things, doncs sembla que la nano antena torna a ser punt de mira per a la realització de circuits integrats o sensors que es puguin comunicar individualment entre sí sense centralització de dades. La incorporació de nano antenes als circuits integrats és la nova generació.

En aquest treball intentarem ajuntar coneixements respecte a les nano antenes, la banda de THz i sobre tot i més excitant descobrir totes les portes possibles que obrin nous camps d'aplicacions actuals i de futur.

Farem un anàlisi general de les antenes així com els seus paràmetres principals, compararem les antenes a freqüències diferents (RF i òptiques). Estudiarem recursos d'altres autors que hagin aportat coneixement gràcies als resultats, l'experiència i conclusions aportades.

Analitzarem els materials més utilitzats a les antenes, veurem els tipus de nano antenes que s'han pogut realitzar, analitzarem els processos principals que comporten fabricar les nano estructures i farem un repàs a les diferents possibilitats i tecnologies per a la caracterització de les nano antenes. Veurem totes les opcions que hi han per a la caracterització del camp proper com a base principal d'estudi.

# 1. Conceptes generals antenes RF, nano antenes i THz

En aquesta secció es revisen alguns paràmetres bàsics d'antenes [1].

## 1.1 Principals paràmetres de les antenes

-Densitat de potència radiada; potència per unitat de superfície en Watts per m<sup>2</sup>

-Diagrama de radiació; representació gràfica de la direcció i forma de radiació d'un camp elèctric i un camp magnètic perpendiculars entre si respecte a la direcció de propagació. De tipus de diagrames tenim isotròpic, omnidireccional i directiu

-Directivitat; és la relació entre la densitat de potència radiada en una direcció i la potència radiada a la mateixa distància una antena isotròpica (esfera). Per tant és la radiació de potència en una determinada direcció. La energia radiada en aquesta direcció determinada es calcula amb el seu valor màxim en db.

$$D = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{max}}{P_{av}} \right) \implies D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{ef}$$

-Guany: El guany és la relació entre potència d'entrada i potència de sortida al circuit d'antena.

$$G = \eta * D$$

-Eficiència d'antena; és la relació o quocient entre la potència radiada i la potència subministrada per l'antena.

$$\eta = \frac{P_r}{P_{in}}$$

-Ample de feix; és l'angle format per els eixos imaginaris d'una antena en caure a 3dB respecte el seu valor màxim. Algunes fonts utilitzen el valor de 1/e<sup>2</sup> com a definició d'ample de feix on equivaldria a -8,68dB.

-NLPS Relació Lòbul principal i secundari en el paràmetre de directivitat, aquest valor ha de ser el més gran possible per aconseguir concentrar la

potència de radiació al lòbul principal de l'antena i disminuir els lòbuls secundaris que son radiacions de poc interès.

-Polarització; Segons la orientació en la propagació de la ona electromagnètica, que es una ona de magnitud vectorial, haurem d'orientar i posicionar l'antena correctament per poder rebre informació. De polaritzacions en tenim vertical, horitzontal i circular.

-Impedància d'entrada d'antena; És la relació de la tensió a l'entrada de l'antena i la corrent en aquesta. Aquesta impedància és complexa, doncs hi ha una part real que depèn de la resistència (Resistència d'antena) i una d'imaginària (Reactància) que depèn de la freqüència. Si la part imaginària és zero, direm que estem en ressonància. La part real s'associa a les pèrdues de radiació i la part imaginària a les pèrdues d'energia elèctrica i/o magnètica.

$$Z = \frac{V}{I}$$

-ROE; (Relació d'Ona Estacionària) és la magnitud que defineix l'adaptació d'impedàncies a partir del valor del coeficient de reflexió S<sub>11</sub>, pren valors d'entre [1, ∞]

-Coeficient d'adaptació; és la relació entre la potència rebuda de l'antena i la potència que es rebria en ser màxima. Aquest coeficient d'adaptació pren valors entre 0 i 1.

-Ample de banda; es defineix com la banda freqüencial on es veu que el coeficient de reflexió S<sub>11</sub> cau a un valor inferior a -6dB que és el mateix que tenir una valor d'ona estacionària ROE=3. Aquesta serà la amplada freqüencial de treball. Tenim doncs la següent formula:

$$BW = \frac{f_2 - f_1}{(f_2 + f_1)/2} \times 100$$

-Factor d'antena; és la relació entre el camp incident  $E$  i la tensió del port d'entrada de l'antena. Aquestes mesures es realitzen en cambres anecoïques per equips de Compatibilitat electromagnètica.

-Àrea efectiva; es defineix com la relació entre la potència en el port d'antena i la densitat de potència de l'ona plana incident. La polarització de l'ona, com hem comentat, ha de ser la mateixa que la de l'antena. L'àrea efectiva es bàsicament l'àrea física de l'antena que direcciona la directivitat de l'antena. Tenim que l'àrea efectiva esta relacionada amb la directivitat a partir de:

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

-Longitud efectiva; relació entre la tensió en circuit obert al port d'entrada de l'antena i la intensitat de camp elèctric radiat per l'antena a la direcció de l'antena.

-Temperatura d'antena; és un paràmetre que serveix per a calcular la potència de soroll d'una antena receptora. La potència de soroll la necessitem per a calcular la relació de senyal soroll d'una antena.

$$N_a = K \cdot T_a \cdot B$$

## 1.2 Conceptes generals sobre THz i nano antenes

Una de les raons principals per l'interès en el treball en la banda espectral electromagnètica de THz, és la necessitat de donar abast a una gran quantitat de informació i a una gran velocitat en les comunicacions.

Aquesta banda freqüencial s'anomena quasi-òptica, doncs les bandes més baixes a THz es troben les microones i a les bandes més altes, ens trobem amb un espectre òptic.

A la banda de THz, mostra relativament poca atenuació amb els núvols, boira i fum, en canvi si que es sensible a l'existència d'aigua i també d'alguns materials. Substitueix als X-Ray per a la transparència dels materials, amb l'avantatge de que no té comportament ionitzable [2].

Anem a veure com està distribuït l'espectre electromagnètic (Figure 1).



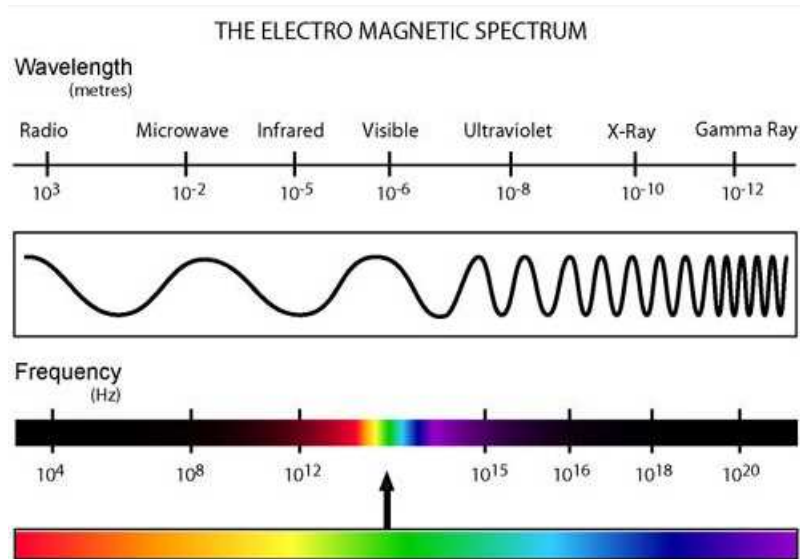


Figure 1 (mydarksky.org)

La freqüència a THz ( $10^{12}$ ) és relativament energètica però no tant com els raigs X, per tant no és encara ionitzable, és dir que els fotons de la ona electromagnètica no tenen suficient energia per a ser capaços de ionitzar àtoms, la ionització dels àtoms son perillosos per a les estructures moleculars de la vida, tal i com passa amb radiació de raigs X, doncs poden trencar les molècules i els àtoms vitals pel funcionament dels òrgans per exemple. Podem definir la banda de Terahertz des de els 100GHz( $\lambda=3\text{mm}$ ) fins als 10THz( $\lambda=30\mu\text{m}$ ) (De microones a Infraroig)

Una altre raó és la possibilitat de poder integrar més components cada vegada més petits en espais més petits i això és possible quan es treballa a freqüències elevades doncs els components son a escales nano mètriques quan es treballa a la banda de THz. Especialment estem parlant de les antenes nano mètriques doncs és en aquesta grandària on podem obtenir un acoblament de les ones electromagnètiques a l'antena. En el camp dels THz es treballa amb miralls, lents i prismes, doncs les condicions per el desplaçament de l'ona electromagnètica amb menys pèrdues que per les guies d'ona de les fibres òptiques.

Les nano antenes o antenes òptiques es caracteritzen per tenir grans pèrdues a les freqüències òptiques degut que els conductors elèctrics no són perfectament ideals.

Veiem ara quines aportacions obtenim si treballem amb les nano antenes.

Avantatges nano antena	Desavantatges nano antena
Cobreix un gran ample de banda	Difícil de fabricar
Tamany petit i per tant integrable	Pèrdues metàl·liques, només són vàlids els metalls nobles
Es pot utilitzar per a comunicacions entre circuits integrats	Longituds d'ona petites i amb grans pèrdues.
Circuits electrònics d'alta velocitat	Per a comunicacions d'interior (Indoor)

La polarització també és objecte d'estudi i a la vegada de paràmetre important per a les nano antenes doncs hi ha una relació directa entre la intensitat de camp electromagnètic a les nano antenes que es mostren als extrems dels dipols o triangles i la polarització de camp. Si la polarització o direcció del camp electromagnètic a THz està perfectament direccionada a la orientació d'antena, experiments han demostrat que la intensitat de camp al extrem de les nano antenes és màxima. De totes formes hem de considerar que s'ha trobat una solució per a la sensibilitat que això comporta i s'ha demostrat que, els efectes de les no linearitats, a partir de la metodologia de mesura del SHG (Second harmonic generation) s'obté informació que ajuda a compensar i minimitzar els efectes de la polarització a partir d'un control de la polarització del feix de llum incident [3].

### 1.3 Diferències entre antenes RF y antenes òptiques

Les antenes en RF ens interessa estudiar el camp electromagnètic en cap llunyà mentre que les antenes òptiques hi ha un interès per a l'estudi dels camps llunyans i propers [4].

Les antenes RF la corrent del circuit de càrrega crea les ones electromagnètiques mentre que a les antenes òptiques les ones les creen les superfícies plasmòniques o electrons lliures en la superfície de l'antena a partir de la incidència de la llum, amb absorció i reflexió segons les propietats del material utilitzat.

Pels dos tipus d'antenes RF i òptiques, els camps electromagnètics es comporten i s'estudien segons les equacions de Maxwell. En antenes òptiques ens trobem a una grandària dels micro i nanòmetres a freqüències de THz, mentre que a les RF la grandària son al voltant de mm o cm a freqüències de KHz-GHz.

Les conversions d'ones de radio a ones en forma de corrent es realitzen a partir de les feeds de la antena, mentre que en les antenes òptiques hi apareix una excitació de la llum directament a la superfície plasmònica de l'antena causant les ones.

En les antenes de RF es treballa amb freqüències de ressonància i amb antenes òptiques amb longitud d'ona de ressonància [5]

Els objectius principals d'estudi en les nano antenes estan basats en els següents processos:

1. Dissenyar nano antenes en simulació.
2. Escollir la geometria de l'antena òptima a partir dels paràmetres d'antena
3. Calcular el guany, eficiència i la directivitat de las antenes
4. Fer càlculs y mesures en camp proper i camp llunyà

## 2. Tipus de materials de les nano antenes

### 2.1 Materials

Els materials més adequats i utilitzats per a l'aplicació en el món de les antenes són els conductors elèctrics, els dielèctrics i els metamaterials.

Els conductors són materials metàl·lics que s'utilitzen per a la creació d'estructures d'antena, que s'utilitza per a rebre o enviar camps electromagnètics al espai lliure amb la finalitat d'aconseguir alta eficiència de radiació i baixa impedància en l'antena. El conductor habitual sol ser el *coure*, doncs és un bon conductor i de preu assequible que s'adapta molt bé a les necessitats i aplicacions d'antenes a escales més grans, per exemple una antena de botzina de 0,5m. L'alumini és també un conductor molt utilitzats habitualment en les antenes en la banda de KHz. Conductors electroceràmics utilitzats per exemple en antenes de televisió.

Els materials dielèctrics són utilitzats en antenes dielèctriques fetes normalment de material ceràmic amb una permitivitat elevada (amb constants dielèctriques elevades, ~10, 100). El Silici no és un material dielèctric, però l'òxid de silici sí que és un dielèctric, i per tant incorpora l'element de silici que torna a ser de gran utilitat i molt comú en el món dels components en microelectrònica, doncs els dielèctrics permetran miniaturitzar les estructures d'antena. Els dielèctrics serveixen per a radiar les ones electromagnètiques, establint les condicions de contorn necessàries a partir d'una constant dielèctrica. Per a càlcul general si la constant dielèctrica puja, la freqüència en ressonància disminueix. Un altre exemple d'utilització de material dielèctric són les lents dielèctriques també utilitzades en antenes per a convertir les ones esfèriques o tridimensionals en ones planes, per a obtenir més guany i més directivitat modificant la fase i l'amplitud de la ona. Aquestes lents es posen normalment a la sortida de les antenes de botzina per a corregir errors i els efectes distorsionadors d'amplitud i de fase.

Els metamaterials és un bon exemple que s'utilitza per a la creació d'antenes doncs aquests materials poden ser sintetitzats amb una estructura i

propietats especials com la permitivitat i la permeabilitat negativa o materials esquerrans, que permeten aconseguir directivitats elevades i a la vegada aconseguir miniaturitzar el disseny de les antenes a grandàries nano mètriques. L'estudi dels metamaterials es basa en el control del comportament electromagnètic basat en uns materials que son sintetitzats artificialment i que inclús no existeixen a la natura. Les propietats estableixen condicions diferents en la direcció de propagació i la fase dels camps  $E$  i  $H$  respecte el vector d'ona. La permeabilitat i la permitivitat són variables que influeixen en la propagació del camp electromagnètic doncs hi són en la relació de dispersió entre el vector d'ona ( $k$ ) i la pulsació de radiació ( $\omega$ ).

$$k^2 = \left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) \cdot (\sqrt{\epsilon \cdot \mu})^2$$

Els meta materials estan molt orientats a la creació d'estructures i geometries d'antenes miniaturitzades i molt primes. Algunes aplicacions són el disseny de filtres respecte a les bandes prohibides d'operació, agrupacions d'antenes miniatura i disseny d'electrònica de microones. També es poden utilitzar com a conductors magnètics artificials que és bàsicament una antena molt a prop d'un conductor, per certes freqüències actua com un conductor magnètic.

-Materials metal·lo dielèctrics, aquest material es utilitza en cristalls i dispositius fotònics. També se l'anomena metamaterial plasmònic, Es tracta de combinar el comportament dielèctric en els cristalls fotònics amb components metàl·lics. Això obliga al sistema a treballar en un rang freqüencial determinat deixant a fora certes bandes freqüencials. Per exemple la incidència de llum en un material metal·lo dielèctric té l'efecte de reducció de la longitud d'ona, respecte la llum incident, una vegada els plasmons es mouen en forma d'ona per la superfície. Treballar amb aquests materials dona l'avantatge de poder integrar filtres miniaturitzats sense haver de integrar filtres convencionals que necessiten més espai. [6]

També en estructures micro i nano mètriques s'utilitzaran altres materials per a la realització d'antenes com és el grafè, el silici o semiconductors i metalls

nobles. A estructura nano mètrica hi han uns límits de fabricació tecnològics i mecanismes per estructurar les diferents formes i geometries que l'antena o d'altres components a escala nano mètriques necessiten, al igual que a nano escala impliquen considerar les propietats i la estructura atòmica dels materials.

El grafè és un material basat en àtoms de carboni ordenats en forma d'hexàgon i regular. Aquest material té la propietat que és molt dur inclús 200 vegades més resistent que l'acer. Difícil de produir. És utilitzat a la microelectrònica per a l'alta mobilitat de portadors, baixa resistivitat i nivells de soroll baixos. En les antenes el grafè té beneficis com la miniaturització i ajust dinàmic de l'eficiència [7]. La conductivitat del grafè depèn molt de la freqüència utilitzada obtenint comportaments diferents. El grafè té la conductivitat elèctrica més elevada i coneguda de tots els materials  $\sigma=9,87 \times 10^7$  S/m. [8]

S'estan estudiant estructures nano mètriques de grafè o "nanotubs" que aportaran un avanç tecnològic molt important per a instrumentació electrònica d'alta freqüència o THz en properes generacions, per les seves propietats de superconductores si es de tipus metàl·lic o semiconductors. Això donarà un gran potencial a les noves generacions de circuits integrats per a desenvolupar microelectrònica i altres components optoelectrònics, utilitzant els nanotubs per a interconnexions elèctriques de tamany nano reduït. A més de la seva conductivitat elèctrica i les seves propietats mecàniques per la duresa i resistència de material, el fa interessant per tenir efectes no lineals i adaptació a la banda de freqüències de THz. Aplicacions òptiques a l'electrònica de THz i les comunicacions seran les àrees més importants d'aplicació del grafè, doncs la capacitat de enviament de grans quantitats de dades a THz ens aporta un ample de banda molt elevat. Encara s'ha de millorar en la caracterització acurada dels nanotubs. Presenten encara comportaments de gran impedància i efectes parasítics a més de la dificultat encara de fabricar-los. [9]

Si ens centréssim en les propietats mecàniques dels nanotubs, que no és el propòsit d'aquest treball, l'estructura atòmica i les unions dels àtoms de carboni dels nanotubs, aconseguix ser el material més resistent i dur que s'ha descobert. Això comporta uns beneficis importantíssims al món de la construcció, doncs es poden fabricar cables industrials per aguantar ponts, edificis e inclús es parla de fabricar un ascensor espacial que pugui pujar cap al espai amb unes condicions d'energia mínimes. Per tant la revolució en aquest camp ja no té escapatòria, la música de futur ja és casi avui.

El Silici ; el segon element més comú al planeta terra (després del oxigen), per tant la millor manera d'aprofitar els recursos d'aquest material per a productes en massa. Les aplicacions van des de la construcció de materials com maons, ceràmiques i vidres fins a la indústria electrònica i microelectrònica com a semiconductor de components com els transistors, díodes i cèl·lules solars. Es pot modificar la conductivitat del silici a partir de la introducció d'impureses a les oblees de silici.



Figure 2 "Oblees de Silici" [10]

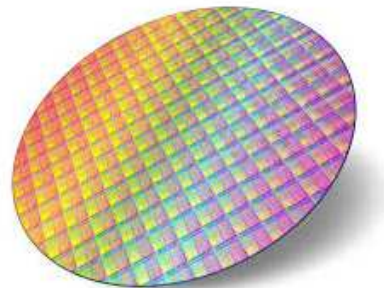


Figure 3 "Oblea de Silici fotolitografiada" [11]

És un element molt interessant sobretot quan s'utilitza en estructures nano mètriques i micromètriques. A estructures nano mètrica hi han uns límits de fabricació tecnològics i mecanismes per estructurar les diferents formes i geometries que l'antena o altres components, doncs implica considerar les propietats i la estructura atòmica del silici. La modelació i fabricació dels components es realitzen a partir de processos amb àcids (*dry etching*, *wet etching*) sobre els substrats de silici, posant-hi unes màscares al substrat on l'àcid ataca al substrat i aconseguir així geometries quasi perfectes basades en els angles que formen l'àtom de silici. Les tècniques es basen en

controlar l'atac del àcid a les oblees de material de silici a partir d'unes màscares que controlen la zona d'atac de l'àcid. Aquí ens trobem dues formes en que es comporta una oblea de silici a partir de l'àcid utilitzat, la seva dosi i la taxa (quantitat temps) aplicada, podrem controlar les estructures isotròpiques i anisotròpiques.

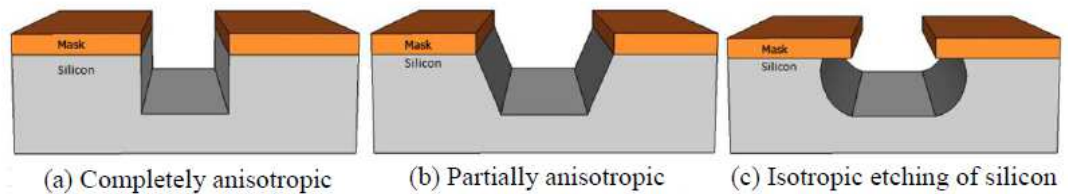


Figure 4 "Estructures isotròpica i anisotròpica de les oblees" [12]

El material de silici comporta propietats que deixen realitzar estructures de parets rectes amb un angle de  $54,7^\circ$   $\langle 110 \rangle$   $\langle 100 \rangle$ , amb les condicions adequades de l'àcid.

Els metalls nobles són utilitzats a les nano estructures per a la propietat de bons conductors amb conductivitats elèctriques elevades, com la plata (Ag) amb una  $\sigma = 6,3 \times 10^7$  S/m i l'or amb una  $\sigma = 4,55 \times 10^7$  S/m.

Els metalls nobles com l'or o la plata, són materials molt utilitzats en nano antenes amb estructures microstrip, per exemple es poden trobar en forma de capa molt fina per a absorbir la banda infraroja de la radiació aconseguint d'aquesta manera reduir la conductància i els nivells de soroll termal, utilitzats en detectors de infrarojos. Els metalls nobles es caracteritzen per tenir una conductivitat alta i permet la propagació de la energia electromagnètica en la seva superfície, amb una capacitat tècnica fàcil de sintetitzar cavitats de transport d'energia. Aquest metalls són de gran interès en aplicacions nano òptics, també anomenats materials plasmònics. Les freqüències de ressonància són més baixes per als metalls nobles, que la longitud d'ona de ressonància plasmònica dels semiconductors. Els metalls nobles, a partir d'uns slots o ranures ressonants en forma de barres a les antenes, ajuden a obtenir una eficiència més elevada de la llum incident on després la longitud d'ona en forma plasmònica o plasma d'electrons passarà cap al material semiconductor.



Altres materials que s'estan utilitzant i són part d'investigacions actuals contínuament per a l'optimització de l'eficiència d'antena han estat per exemple:

-EMXT o estructura de cristall electromagnètic, que realitza funcions de dielèctric en les antenes miniaturitzades per aconseguir pèrdues baixes. Aquí tenim el cas d'una guia d'ones a la banda de THz amb una constant dielèctrica de 2.75 amb pèrdues de propagació de 0.03dB/mm acoblada a un antena de botzina d'EMXT partir d'un prototip de polímer [13]. Amb aquest material s'ha aconseguit en simulació una directivitat i radiació molt alta cap al voltant dels 30dB i amb pèrdues molt baixes. A més es pot observar que la radiació dels lòbuls laterals (NLPS) són relativament baixos respecte el lòbul principal. Aquest és un material més econòmic, amb possibilitat de fabricació en impressores 3D i en moltes formes possibles amb complexitats geomètriques de tot tipus i per tant es pot utilitzar en diferents aplicacions en massa per a la banda de THz.

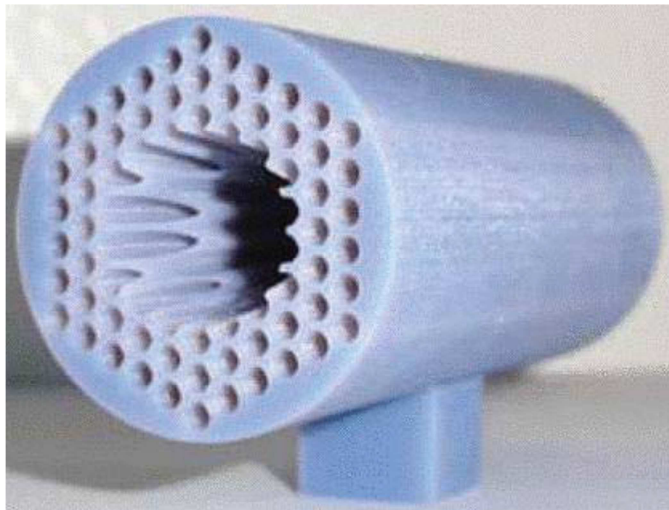


Figure 5 "Antena amb Cristall (EMXT)" [13]

#### - Superconductors

Els superconductors tenen la propietat de tenir una resistència elèctrica casi nul·la al pas del corrent sobre la superfície del material i una expulsió del flux de camp magnètic per sota de la temperatura crítica. L'efecte de la superconducció s'estableix quan aquest material supera la baixada d'una temperatura crítica i el material es troba en un estat d'energia molt baix, on

els parells d'electrons que es desplacen per el material no hi apareixen pèrdues. [14] Els materials han de ser purs sense impureses, amb una profunditat de penetració  $\lambda$  i una llargada coherent  $\epsilon$  exactament definides per a cada material. Hi ha una relació directa en els superconductors entre la resistivitat del material i la temperatura, de manera que la resistivitat baixa a mida que la temperatura baixa. Un camp magnètic crític  $H_c$  també influirà el flux d'electrons, per tant amb l'increment de camp magnètic deixarà de tenir característiques superconductores. Hi han dos tipus de materials semiconductors de tipus I i de tipus II. Els de tipus I tenen un efecte anomenat de Meissner a partir d'un camp magnètic crític  $H_c$ , que normalment són metalls lleugers, i els de tipus II on hi han 2 camps magnètics crítics  $H_{c1}$  i  $H_{c2}$ , superant aquest valors obtenim de nou l'efecte Meissner. Les altes freqüències a l'ordre de THz també afecten a la superconductivitat perquè aquesta freqüència superaria la freqüència d'energia dels electrons. Els superconductors s'adapten millor a tamanyes submil·lèmètrics que a la grandària nano mètrica en el cas de les antenes.

Un material superconductor habitual en aplicacions de fotó detecció infraroja és el Nitru de Niobi (NbN), amb una alta sensibilitat a la detecció de fotons.

Amb aquest material s'aconsegueix arriba a una densitat de corrent elevada i una resistivitat baixa. Com ja s'ha comentat, la temperatura afecta a la conductivitat a nano escala, quant més puja menys conductor es el material i per tant hi haurà una  $T_c$  o temperatura de transició concreta per a cada material, per tant algunes conclusions que s'han realitzat en alguns estudis, ens diu que si utilitzem materials on poguéssim sintetitzar amb el nitrogen en forma de gas a partir d'una pressió determinada bastant elevada i una temperatura també elevada, podríem arribar a baixar la temperatura de transició  $T_c$  que necessitem per a la conductivitat. En el cas del NbN estem a una  $T_c$  de 16,1K, una densitat e corrent de tall de  $3 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> ,i una conductivitat de 300uOhm/cm. [15]

Per altre banda s'ha pogut també comprovar que el material NbN no té un comportament totalment lineal. Si les capes fines de NbN es fan més gruixudes, per exemple de 15nm a 50nm hi ha un comportament menys conductiu, tenint en compte la intensitat de camp elèctric constant que farà canviar la conductivitat intrínseca del material. Si es canvia el gruix de 50nm

a 200nm els efectes no són diferents. Per una altre costat, si baixem el gruix de la capa d'NbN i incrementem la intensitat de camp elèctric torna a haver un comportament més conductiu i amb menys pèrdues. Per tant el que venim a dir aquí és a justificar els comportaments no lineals del superconductors. [16]

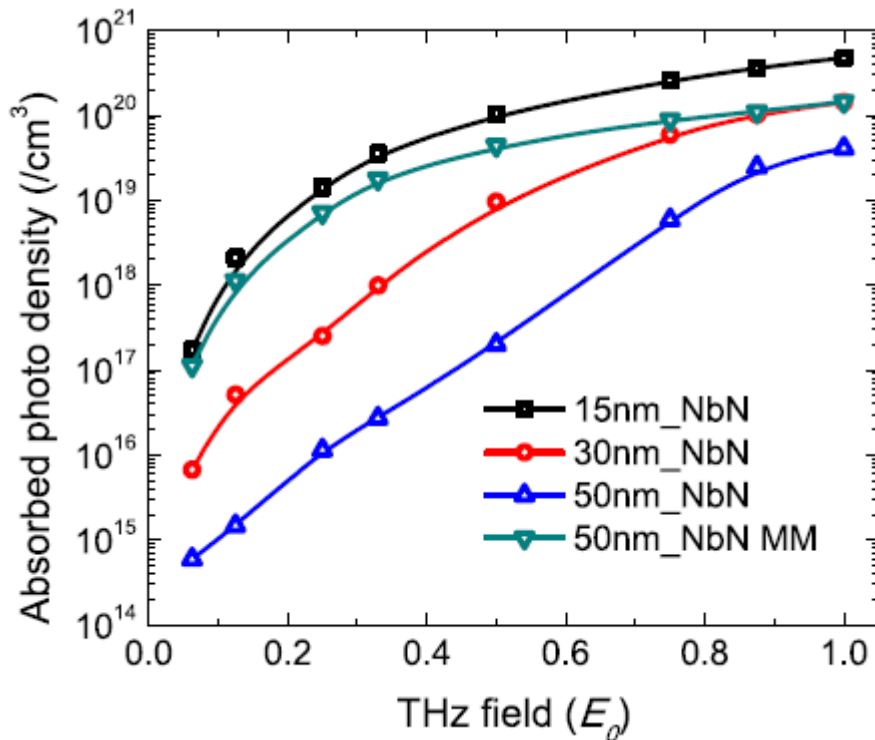


Figure 6 "Fotodensitat absorbida per al camp electric en THz mesurada per a les diferents capes gruixudes de material NbN" [16]

Per a realitzar estudis en els laboratoris en la interferometria, per exemple també s'utilitza el nitrogen  $N_2$  en forma de gas per a aconseguir que el feix de llum no sigui absorbit per a les possibles molècules d'aigua que puguin haver en el seu camí.

## 2.2 Per què l'or o metalls nobles en estructures nano mètriques?

Antenes fabricades amb substrats amb diferent tipus de material es diferencien entre ells, en que els comportaments són diferents, per exemple treballant a la banda de THz, les pèrdues segons els materials es troben en una banda de freqüència determinada. El comportament que tenen estructures metàl·liques quan treballem a en RF semblen que siguin casi

perfectes, però quan les freqüències són òptiques el metall ja no és comporta tan perfecte i comencen a haver pèrdues importants de calentament que perjudiquen la eficiència i el rendiment d'antena.

El fet de treballar amb metalls nobles com el or es deu perquè hi ha un increment de la resposta plasmònica a la superfície del metall a una freqüència determinada. La ressonància en metalls nobles es molt més gran que en materials convencionals per a tota la part imaginària de la seva funció dielèctrica (com per exemple amb el níckel). Veiem la figura següent comparativa on l'or cau en ressonància a partir dels 475nm.

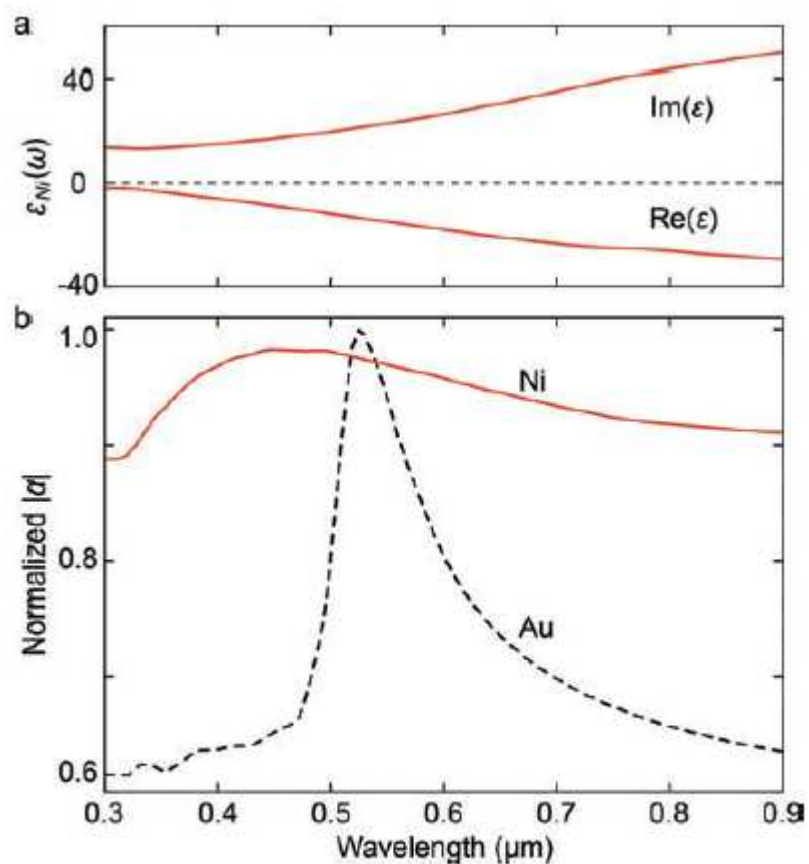


Figure 1. a) Dielectric function of nickel taken from Palik.<sup>[25]</sup>  
 b) Comparison of the polarizability  $|\alpha|$  of nickel and gold spheres.

Figure 7 "Es tracta de la funció dielèctrica comparativa del níckel i l'or"

[17]

Per altre banda, els avantatges que tenen treballar amb materials ferromagnètics és la capacitat magnètica que influeix sobre els camps propers i d'acoblament en l'antena. Els diagrames d'histèresi demostren les

característiques ferromagnètiques que comporten aquests materials respecte l'afinitat als camps magnètics.

L'estudi de camps propers a la superfície de l'antena donen una descripció qualitativa de l'amplitud i la fase d'aquest camp i una definició de la distribució de càrrega sobre aquesta superfície directament associades a les oscil·lacions plasmòniques.

Una de les propietats que tenen els metalls nobles com l'or per a l'aplicació en nano antenes es la seva conductivitat elèctrica i la seva estabilitat a temperatura ambient. En moltes aplicacions de la electrònica a més s'utilitza l'or com a metall anticorrosiu envers d'altres metalls, com per exemple per aplicacions al aire lliure amb entorns humits. Una altre raó de perquè l'or ha estat molt utilitzat en nano antenes, és la seva conductivitat com a metall noble, en combinació amb estructures nano mètriques el fan ideal per a l'acoblament del camp electromagnètic a THz a la superfície de l'antena. Les propietats òptiques dels metalls es basen en les càrregues portadores anomenats plasmons o electrons lliures, que sobre del metall tenen propietats dielèctriques.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_{\tau})}$$

On  $\omega_p$  i  $\omega_{\tau}$  defineixen la freqüència de plasma i la relació de portadors de càrrega lliures. Aquesta funció té una part real negativa molt gran en el rang de THz amb una polaritzabilitat elevada en les bandes de transició on el valor d'S11 baixa a valors superiors als 6dB. En canvi, per el contrari la reflexió serà elevada quan les freqüències són baixes, en relació al gruix del metall i la incisió de la llum en IR que s'aplica.

Per tant el comportament de la llum incident cap a la capa fina del metall, juntament amb la dispersió de la ressonància plasmònica es trobarà aproximadament a:

$$\omega = \frac{\omega_p}{\sqrt{\varepsilon_{\infty}}}$$

Això té l'avantatge que les ressonàncies poden ser ajustades a la freqüència determinada depenent de la forma i de la dimensió de l'antena. L'ajust de la freqüència de ressonància en camp proper per a les nanoantenes ha estat

des de sempre objecte d'estudi per a aplicacions com l'amplificació de camp en les superfícies de Raman.

Podrem dir que en comparació amb les antenes convencionals de RF, les ressonàncies en THz o IR sobre els materials metàl·lics de les nano antenes, són molt més elevades donada la funció dielèctrica anterior causada per la forta part real negativa.

Una raó per a la utilització freqüent de l'or en les estructures nano mètriques també es justifica a partir dels processos de fabricació, doncs s'ha demostrat que amb aquest material les estructures geomètriques no havien quedat tant danyades a l'hora d'atacar les capes metàl·liques amb el feix d'electrons a velocitats elevades, en el procés del atòmic layer deposition (ALD). Les geometries ideals en els processos de fabricació ajuden a la millora dels efectes de mesura i caracteritzacions posteriors de l'antena. [18]

Per tant l'estudi es basa ara en trobar un material que no sigui tant car per a aplicacions amb propietats similars que l'or.

Algunes investigacions i experiments realitzats han demostrat a més, que amb l'or s'ha aconseguit una alta eficiència en la captació de la llum incident a la banda IR que veurem en el següent capítol.

### 3. Aplicacions de les nano antenes

Fem un repàs general d'algunes de les aplicacions i camps d'utilització de les estructures nano mètriques:

- Imatges en alta definició ,Eines molt valorades com els MPPL o Multiphoton photoluminiscència, són processos per a la caracterització d'estructures nano mètriques basades en materials de metalls nobles per aconseguir en les imatges sensibilitat i una resolució elevada. Això es necessita per a mapejar les distribucions de camps i caracteritzar les freqüències ressonants de les oscil·lacions de plasma d'electrons segons els camps externs<sup>1</sup>. En el document Multi-photon Autocorrelation in Gold Nano estructures s'explica la tasca de realitzar una autocorrelació de mesures en multi fotons luminescents per a estructures nano mètriques d'or [19].

Aquí es demostra la capacitat de l'aplicació d'imatges i alta resolució que és el resultat dels fotons absorbits mitjançant la tècnica MPPL, que en el capítol caracterització més endavant parlarem.

-Imatges per a medicina i Screenings de seguretat

Una de les característiques físiques utilitzant foto mescladors i antenes planes és la capacitat de combinar l'emissió de polsos i ones contínues a la banda dels THz i veure com es comporta la funció d'ona fent mesures de polarització i de potència generada. En el espectre de fins a 10 THz s'ha intentat realitzar molts estudis d'electrònica per a la fabricació d'emissors i detectors amb alta resolució a partir de materials semiconductors a aquestes freqüències, els anomenarem CW-THz. Bàsicament es tracta d'un control d'interruptors òptics que s'obren i es tanquen a partir de l'arribada o l'emissió de la llum que en el domini dels THz ve controlada per feixos de làser d'alta velocitat. Aquest làser passa per unes lents divergents/convergents que focalitzen els feixos de llum a un punt determinat del conductor metàl·lic o antena plana. Aquesta antena estarà connectada a un circuit de càrrega tant per a emissors com per a receptors.

---

<sup>1</sup> [9]

Els fotomescladors seran els responsables de modular la resposta d'aquest circuit a partir d'un camp òptic determinat. Es tracta bàsicament d'introduir una senyal de THz a la senyal receptora o emissora i fer càlculs de correlació amb la polarització del senyal i la resposta en freqüència a la senyal de sortida. Aquesta modulació es realitza a partir d'una freqüència diferent a la de la senyal, que farà de portadora. [20]

-Espectroscòpia; l'espectroscòpia és molt utilitzada en camps de reconeixement de materials i a partir d'anàlisi d'imatges a petita escala es poden identificar estructures i geometries de les nano antenes. Un dels camps més utilitzats és l'anàlisi de les estructures orgàniques o biomolècules tal i com es realitza en el DNA, luciferasa, la polimerasa, són alguns exemples d'estudi en espectroscòpia en la banda de THz.

S'han realitzat estudis a partir de creació de diferents llargades de polimerasa PCR per a produir cadenes DNA. S'ha descobert que la orientació de les molècules té un gran efecte a la sensibilitat espectral i per tant per a fer experiments amb biomolècules, i per tant les mostres prèviament han de quedar orientades a un angle determinat. A aquest efecte li hem de sumar l'efecte de les impureses a les molècules que fa que els resultats de les mesures siguin menys reproduïbles i interpretables. Per tant mitjançant un filtratge podrem fer un anàlisi més precís de les seqüències de DNA a mesurar. El resultat espectrogràfic ens mostra unes amplituds o peaks a certes posicions freqüencials determinades [3]. Veiem la següent figura amb la distribució espectral i els peaks absorbents a les diferents freqüències.



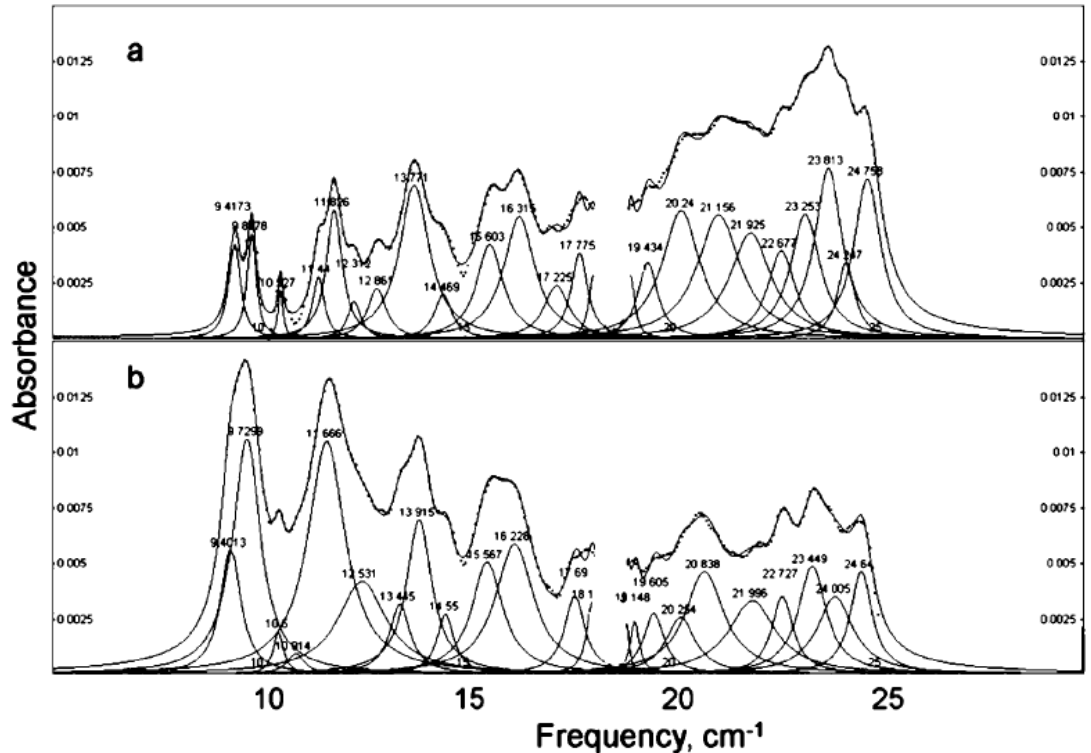


Fig. 17. Peak fitted spectra of (a) 500 and (b) 1000 bp samples at concentration of 1 and 0.4 mg/mL, respectively. Dotted line (...)—data points, solid line (—) —deconvoluted peaks, summary line.  $r^2$  values are equal to 0.98 and 0.99, respectively.

Figure 8 “Espectre Pics d'absorció a les diferents freqüències” [3]

#### -Increment eficiència cèl·lules solars

Una de les revolucions més actuals que hi ha hagut en l'àrea de les nano antenes ha estat la capacitat i la millora de la eficiència fotovoltaica. És a dir, poder aconseguir energia elèctrica a partir de la llum solar en la franja de freqüència Infraroja o THz. La idea és realitzar nano antenes de material d'or a mida adaptades a aquesta longitud d'ona per a aconseguir energia del camp electromagnètic a THz. Si comparem les plaques fotovoltaiques que tenim als terrats de les cases, estem parlant de material semiconductor com el cristall de silici (c-Si), de tot la llum incident aquestes plaques arriben a una eficiència del 46% respecte l'espectre solar. A partir de les nano antenes es pot arribar a una eficiència del 85% del espectre [21].

Ja no només es la grandària nano mètrica el que aporta una avantatge respecte a la banda de THz en la eficiència solar, sinó també els materials a aquesta escala, doncs es un bon argument per al seu estudi, com ja hem

comentat al capítols anteriors. Una antena dipol feta de diferents materials s'ha demostrat que aconseguen eficiències molt diverses. Per exemple amb plata, or, coure, alumini i crom. Els anàlisis han demostrat que el material més eficient ha estat la plata tenint en compte, que a més té un ample de banda de treball molt més gran que els materials anteriors. L'or ha estat el segon millor resultat fins a una eficiència del 80% i el pitjor resultat ha estat el crom. Els resultats entre l'or i la plata han estat similars, per a grandàries de dipol de  $L=350\text{nm}$ , quan les  $L$  són més petites la plata aporta millor eficiència. La plata té millor conductivitat metàl·lica i conductivitat tèrmica que l'or, per un altre banda l'or segueix sent un bon conductor i és un material anticorrosiu. [22]

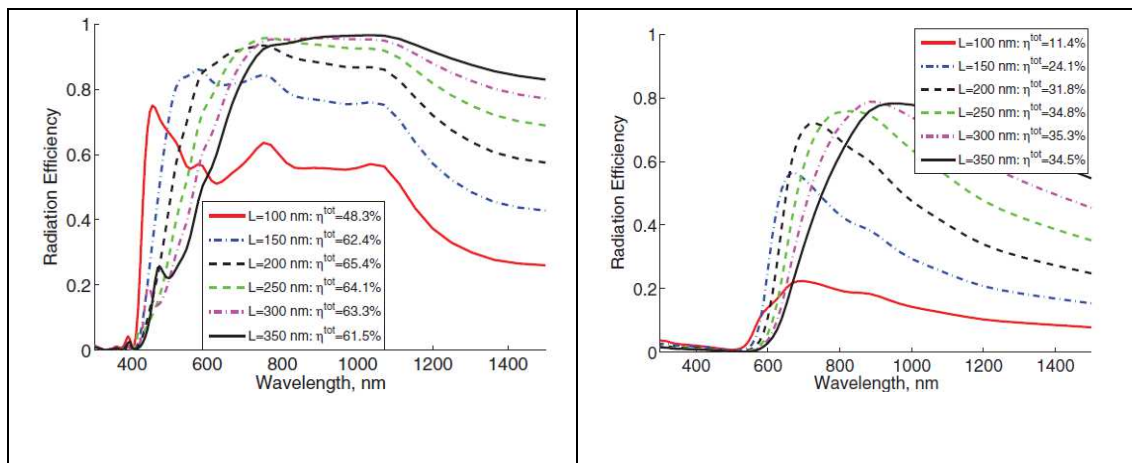


Figure 9 "Eficiència de radiació d'un dipol de Plata" [22] Figure 10 "Eficiència de radiació d'un dipol d' Or" [22]

Els materials de les nano antenes són de natura metàl·lica o són dielèctrics amb una permitivitat elevada. També s'ha de tenir en compte que els metalls a freqüències òptiques tenen una conductivitat més baixa i per tant no es comporten com a conductors perfectes. Recordem que en aquest rang freqüencial és tracta d'un rang altament energètic. Aquesta aplicació utilitza la energia solar de manera molt eficient. La llum incident d'una ona electromagnètica es distribueix per a la superfície de l'antena, oscil·lant a la mateixa freqüència que la mateixa ona, on un camp elèctric molt elevat es concentra en un feeding point concret a l'antena, en forma d'espai buit o gap. Una vegada el camp elèctric és concentrat al buit o gap, es pot processar la senyal que es troba en AC i rectificar mitjançant un circuit amb díode i convertir-lo en senyal DC per a la sortida. [23]

Es tractaria doncs de realitzar un array de antenes a escala nano mètrica (per exemple dipols amb un gruix de 10nm). Partint de capes metàl·liques que són tractades i atacades per feixos concentrats d'ions, aconseguim donar forma a l'array d'antenes. La idea de posar panells solars fets d'or a les cases sembla de moment una opció cara i no factible i per tant s'estan buscant solucions amb altres materials per aconseguir aquestes eficiències elevades. [24]

-Detecció condicions ambientals: una de les aplicacions molt interessant alhora d'utilitzar l'espectre de THz és la interacció de sensors d'obtenir informació sobre les condicions del entorn, com per exemple la boira, la pluja, pols o fins i tot fum. Inclús també oli, aigua o d'altres substàncies. La banda freqüencial de THz aportarà informació al respecte de manera que els components electrònics puguin passar a diferents modes de funcionament per tal de poder baixar el risc de possibles danys o potser compensacions de mesura. Es tracta bàsicament d'una mesura de reflexions a THz observant els canvis de l'atenuació del senyal que ha estat molt utilitzat per exemple en aplicacions amb el Space Shuttle i en la aviació en general.

També hi han aplicacions en la indústria de l'automoció a partir de radars a freqüències baixes a THz (GHz). Aquest radars es poden utilitzar per a sistemes anticollisió o mesura de la velocitat, poden fer imatges en 3D a una distància de 25m. La base està en fer mesures i càlculs d'atenuació per a els diferents materials obtenint diferents valors d'atenuació. [25]

A més per a les condicions atmosfèriques tenim que s'ha d'analitzar l'altitud, doncs la pressió, la temperatura i el vapor d'aigua dependran de l'altitud.

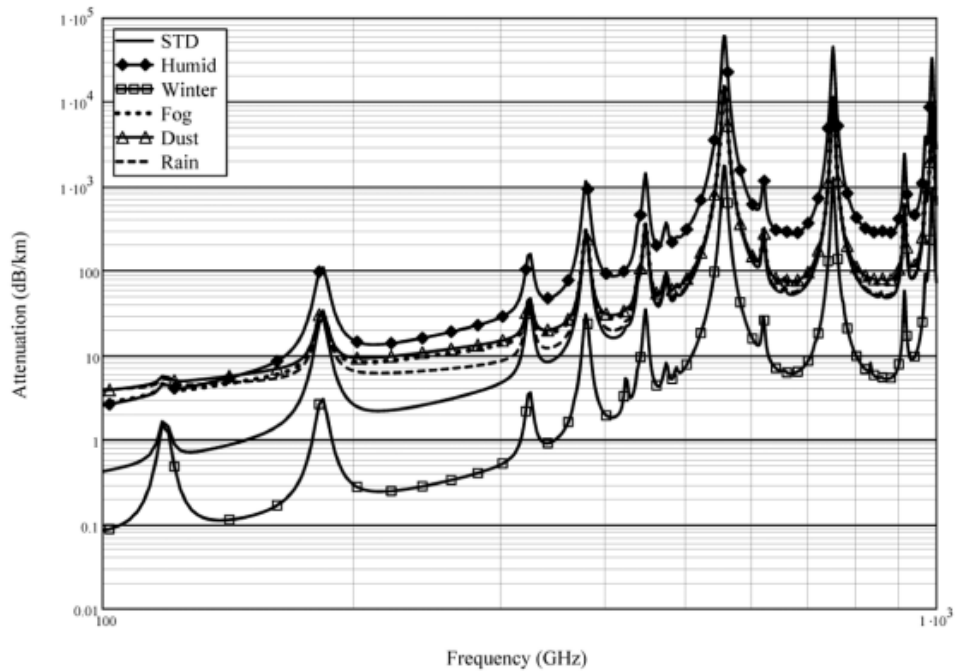


Figure 11 "Nivells d'atenuació als diferents entorns atmosfèrics i freqüència" [26]

- Seguretat i detecció; Inclús altres aplicacions com la detecció d'explosius i altres armes de tipus químic o inflamables. També detecció de objectes metàl·lics com les armes, per exemple els detectors que hi trobem al aeroport quan els passatgers han de passar per la porta de control per a prendre l'avió. Les reflexions d'imatges a THz permeten separar inclús per diferents capes els diferents objectes. La intensitat dels píxels són proporcionals al logaritme de la potència de 0.2 a 2THz. L'espectre per a cada tipus de material queda definit a partir d'un patró determinat que fa saltar les alarmes. [27]

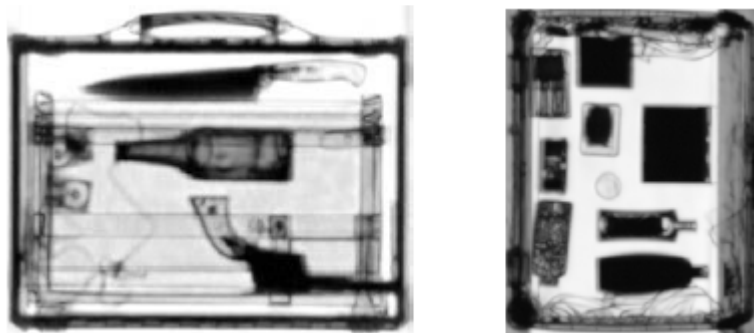


Figure 12 [27]

Un instrument molt utilitzat per a la visualització d'imatges a THz és el QA1000. [28]

El control en THz analitza exactament les emissions, reflexions i transmissions dels objectes i sempre compleixen la següent equació:

$$\varepsilon + r + t = 1$$

I a partir de la taula següent es poden interpretar els materials possibles que el passatger pugui tenir.

OPTICAL PROPERTIES OF 5 mm THICK EXPLOSIVES, SKIN, METAL, DENIM AND T-SHIRT

	Emissivity ( $\varepsilon$ )			Reflectivity ( $r$ )			Transmission ( $t$ )		
	100 GHz	500 GHz	1 THz	100 GHz	500 GHz	1 THz	100 GHz	500 GHz	1 THz
Explosive on skin	0.76	0.95	0.94	0.24	0.05	0.06	0	0	0
Metal	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Skin	0.65	0.91	0.93	0.35	0.09	0.07	0	0	0
Denim	0.09	0.49	0.85	0.01	0.01	0.05	0.9	0.5	0.1
tee-shirt	0.04	0.2	0.3	0	0	0.05	0.96	0.8	0.65

Figure 13 [26]

-Aplicacions per a l'espai: En concret per a la banda de THz té aplicacions en instruments electrònics que són utilitzats tant per a espectroscòpia de materials com sensors de detecció de longituds d'ona de la llum provinent de les estrelles. També anàlisis espectroscopi de longitud d'ones per a gasos i nebuloses al igual que els estudi de la formació d'atmosferes a possibles exoplanetes. A partir de la longitud d'ona detectada que pot aportar un color o un altre es defineixen les composicions químiques d'aquests gasos.

De fet un altre efecte astronòmic que detecta les longituds d'ona per a algunes galàxies, ens aporta informació a través del efecte doppler, de si la galàxia s'està allunyant de la nostra galàxia o aproximant. Si la galàxia té un color més vermellós voldrà dir que la galàxia s'està allunyant, mentre que si la galàxia pren un color més blau, ens indicarà que aquesta s'està apropant a la nostra. Per tant també aquí obtenim dades i informació sobre la velocitat de translació de les galàxies. De fet els estudis i investigacions en astronomia abarquen tot el rang de freqüències i no només la llum visible; també els THz inclús rang de freqüències altament energètics com serien els rajos gamma.

La espectroscòpia, la espectrofotometria i la instrumentació basada en THz està instal·lada als telescopis espacials que tenim orbitant a la terra, com el Hubble o Kepler. Les freqüències baixes de THz (o de GHz) seran també

molt habituals en comunicacions per satèl·lit i emissors/receptors a instrumentació electrònica espacial.

La tecnologia a THz ens aporta una gran fiabilitat i solució per a comunicacions des de la terra cap als satèl·lits amb medis com l'atmosfera, gasos, aigua o humitat i les reflexions amb la troposfera. L'alt contingut energètic que té la banda de THz ens proporciona els sistemes ideals per a les comunicacions a grans distàncies, sota unes condicions estàndards de pressió i temperatura. La informació que obtenim en els espectres a THz són de velocitat, pressió i temperatura dels planetes i atmosferes que es van descobrint i mesurant. Unes de les motivacions i aplicacions més importants és la interferometria a THz, són la captació dels espectres de la llum que arriba al detector, quan es detecta un planeta que passa per davant d'una estrella i d'aquesta manera hi apareix un retall de llum durant un temps determinat, que és el temps que el cos planetari passa per davant de la seva estrella.

Per a l'aviació i per satèl·lits o coets que han de passar per l'atmosfera, és de gran interès un estudi de la composició atmosfèrica, pol·lució i canvis climàtics al igual que avançar amb l'estudi de models meteorològics. [29]

#### - Integrated circuits

Un dels camps de properes generacions per a circuits integrats, és la de la comunicació entre sensors, o comunicació entre circuits integrats, a través de senyals en THz. Hi ha una nova estratègia i generació de circuits integrats anomenats xips fotònics avançats que utilitzen la llum per a la comunicació d'alta densitat, treballar amb llum ens dona l'avantatge de integrar circuits cada vegada més petits i a la vegada utilitzar circuiteria d'alta densitat (HDI). Però a la banda de THz aquesta comunicació s'estableix a partir de la possibilitat de espai disponible que un circuit integrat pugui tenir i dels recursos tecnològics "state of the art", doncs com sabem cada vegada els espais són cada vegada més limitats, i els components cada vegada més petits. La grandària nano mètrica fa ideal la implementació i fabricació d'antenes en circuits integrats. I per tant implícitament i per condicions físiques queda la comunicació en la banda de THz predestinada per a

aquestes aplicacions. El tipus d'antena per a la integració d'antenes en circuits integrats són normalment de tipus barra o varilla.

Anem a veure un exemple d'antena amb un guany superior als 9dBi, i unes pèrdues de retorn de 25dB. El diagrama de radiació mostra un lòbul principal més gran i un lòbul posterior menor. La grandària de l'antena de llargada ( $L1+L2+L3= 7,5\mu\text{m}$ ) i el punt més ample de l'antena  $W2 = 0,75\mu\text{m}$ , haurà d'abastar el rang de freqüències de 1750nm(172THz) – 1350nm (222THz)

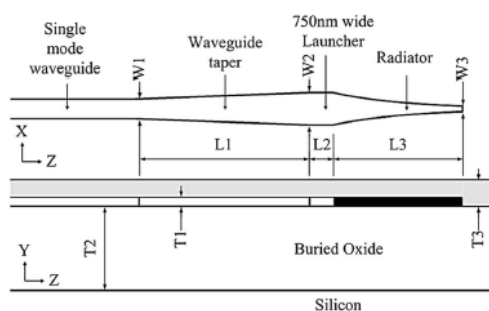


Figure 14 "Geometria de la antena 2D" [30]

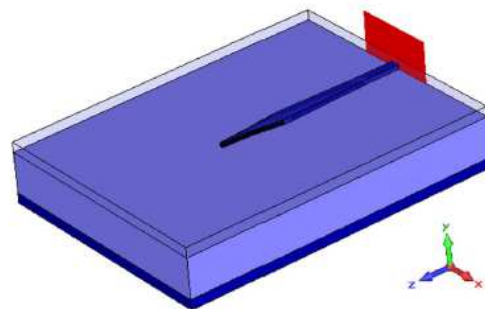


Fig. 1. Proposed optical dielectric rod antenna configuration. (top) Top and side views. (bottom) 3-D model ( $L1 = 4 \mu\text{m}$ ,  $L2 = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $L3 = 3 \mu\text{m}$ ,  $W1 = 0.45 \mu\text{m}$ ,  $W2 = 0.75 \mu\text{m}$ ,  $W3 = 0.13 \mu\text{m}$ ,  $T1 = 0.22 \mu\text{m}$ ,  $T2 = 2 \mu\text{m}$ ,  $T3 = 0.5 \mu\text{m}$ ).

Figure 15 "Geometria de la antena 3D" [30]

Aquesta antena ha demostrat una eficiència del 40%, és a dir la relació entre la potència radiada i la potència i s'ha pogut utilitzar i integrar en un circuit integrat. Aquesta antena ha passat els requisits per a connexió a xarxes WDM o wavelenght Division Multiplexing una vegada passada la guia d'ones i té la possibilitat de interconnectar-se amb altres sistemes electrònics. La multiplexació per longitud d'ona facilitarà la comunicació multicanal facilitant la distribució de la informació. De fet hi han aplicacions molt habituals amb sistemes de wireless basat en antenes, que es necessita d'un ample de banda elevat al igual que una infraestructura o xarxa WDM on s'utilitzen les arrays d'antenes. [30]

- Medicina; un dels camps més habituals d'aplicació d'instrumentació a THz. Això té la raó que els fotons a THz no estan carregats d'energia i per tant al aplicar-se al cos humà no trenquen les estructures moleculars o dels àtoms. L'aplicació bàsica és d'anàlisi i imatge de teixits per exemple per a la detecció de càncers, doncs per petits canvis de tamany que a ull no es

puguin percebre directament, l'alta resolució dels THz detectarà amb previ avís dels canvis possibles de teixits. Obtenció d'imatges per a aplicacions dentals.

-Automoció; No només per a la aplicació de sensors i radars per als vehicles , sinó també per a funcions de control de qualitat a partir de l'anàlisi de materials dels cotxes, com components de plàstic que es trenquen o corrosions als recobriments de metalls. Els instruments en THz poden reduir costos substituint als sistemes X-ray

-Indústria de la fusta; controls de qualitat que també substitueixen els sistemes x-ray i que serveixen per a analitzar l'estat de la fusta, com per exemple controlar els defectes possibles amagats a la fusta, com espais buits, possibles claus o metalls al igual que detecció d'humitat dintre d'ela fusta.

- Queviures i agricultura; control de qualitat i inspecció dels productes acabats, sense que hi hagi d'haver un sistema x ray, que recordem que és l'emissió d'una energia ionitzable que pot trencar les molècules orgàniques. També amb una funció d'obtenció d'imatge dels aliments finals. Als productes agrícoles també tenen una funció de qualitat i control dels productes

-Empaquetatge; a totes les indústries es controla de la mateixa manera si els productes han estat correctament empaquetats i o si hi han forats on el material i no ha estat empaquetat. Per exemple en la indústria farmacèutica, si les pastilles han estat totes empaquetades.

-Invisibilitat d'objectes; un estudi de la universitat de Berkeley ha creat un material sintètic, en forma de capa fina de 80nm, basat en nano antenes d'or que fa que els objectes que hi han darrere no siguin visibles, la llum incident queda reflexada com un mirall i ni tan sols i han efectes de fase. Si la polarització de les antenes es canvia, hi torna a haver visibilitat de l'objecte. Aquesta aplicació ha estat investigada per als militars dels estats units.



Altres aplicacions: Recobriments òptics; Computació òptica i integració en circuits d'alta densitat òptica; aplicacions amb ample de banda elevat, en comparació amb antenes tradicionals; detecció biològica i bioquímica de reaccions inorgàniques.

## 4. Tipus d'antenes

Hi ha una relació entre la longitud d'onda i la forma de les antenes, els estudis es realitzen bàsicament en forma de barres, triangles, octàedres, espirals, cercles, cercles concèntrics i estructures fractals [31].

De fet, les geometries utilitzades en el règim de microones, poden aplicar-se en el règim de THz [32] com per exemples geometries fractals ja que son multibanda i aquelles basades en algorismes genètics [33]

Les antenes fractals son utilitzades per a aplicacions en miniatura, multifreqüència i aconseguir una alta directivitat [34]. Tenim per exemple que per cel.les d'estació base per a sistemes de GSM WIFI i WiMax, a partir d'un disseny d'una antena monopòl basat en una estructura fractal de Sierpinski, aconseguim una radiació omnidireccional amb una eficiència del 79% i directivitats d'entre 3 i 5 dBi [35].

Tenim de 2 tipus les Sierpinski i les Apollonian.



Figure 16 "Sierpinski triangle aplicat a bowtie" [36]

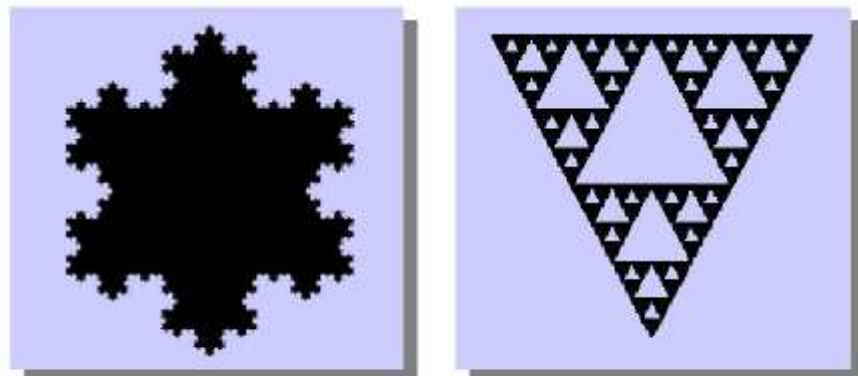


Fig. 8 Left: boundary-fractal using the Koch island. Right: mass-fractal using the Sierpinski triangle

Figure 17 "Koch Island & Sierpinski Fractals" [37]

Algunes aplicacions o mesures realitzades a partir de l'antena fractal de Sierpinski ha estat per exemple l'amplada de banda de freqüència dual d'una

antena microstrip de parche per a aconseguir dues bandes d'operació [38]. Si li apliquem un circuit RLC ressonant que cau a dues bandes freqüencials i millora la impedància d'entrada de l'antena i patrons de radiació similar en les dues bandes freqüencials. [39]

Per a les antenes fractals tenim a més l'antena monopol de Hilbert i les antenes espirals, en aquest cas sabem que la ressonància de l'antena no depèn mai de l'allargada del monopol o cable de l'antena sino que la ressonància depèn de la geometria:

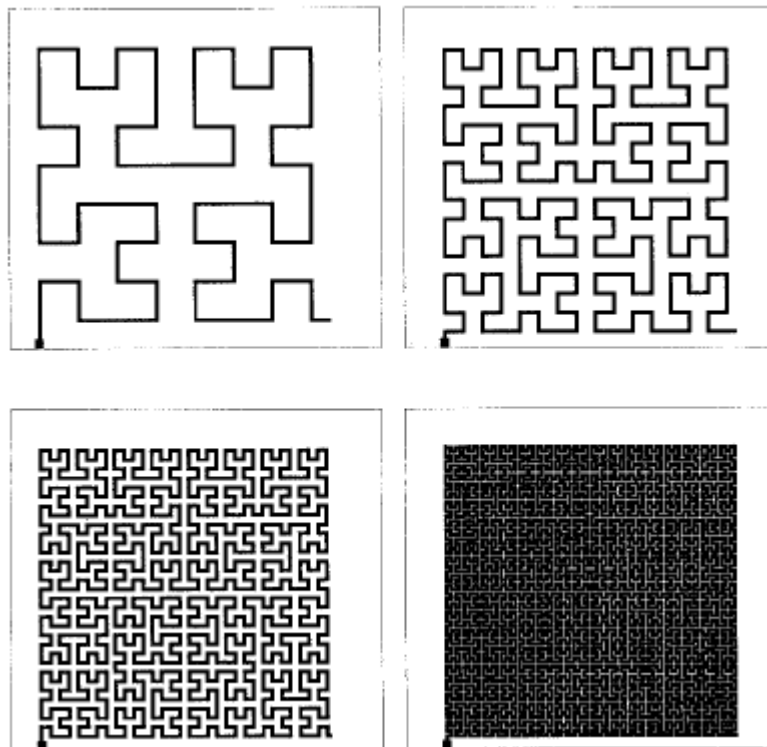


Figure 18 "Antena Hilbert 3-5" [40]

En aquest tipus d'antenes s'intenta utilitzar l'espai que queda en les antenes miniaturitzades [41].

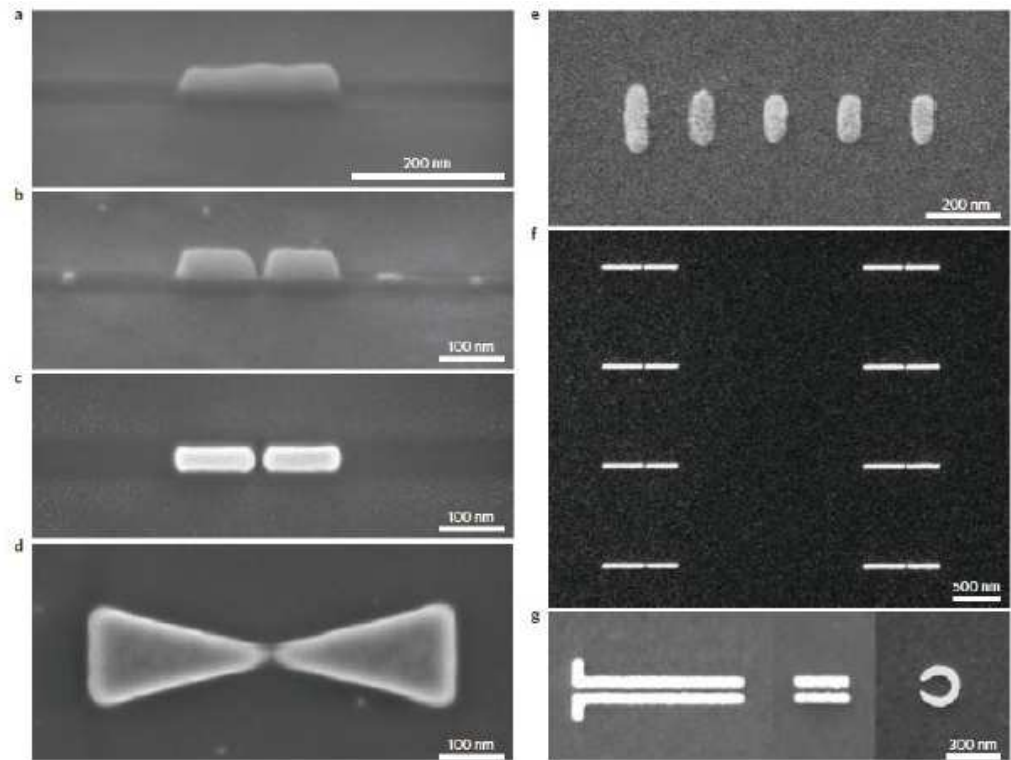
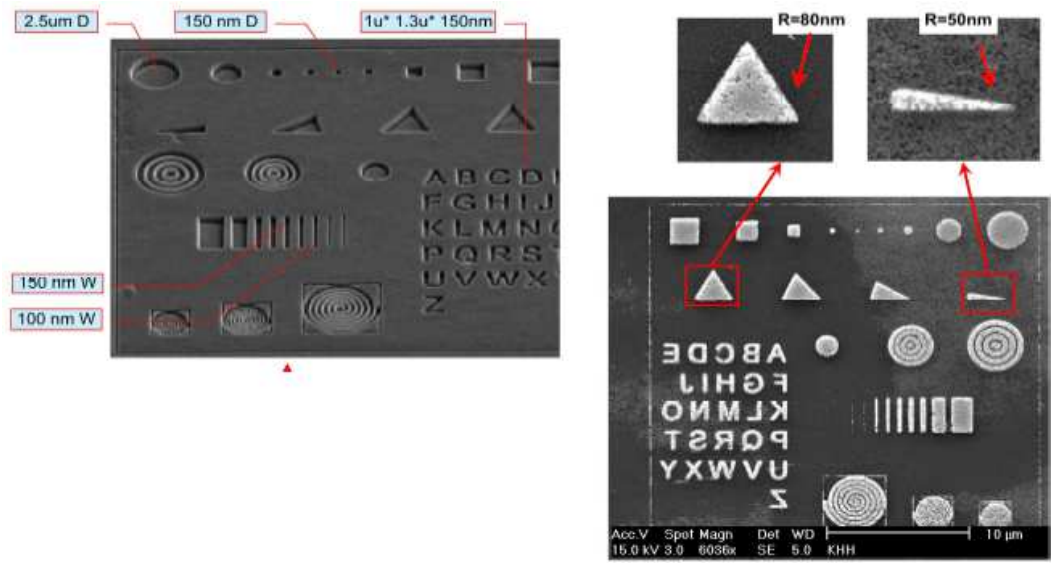


Figure 19 "Antenes bowtie, dipols i Yagui" [42]

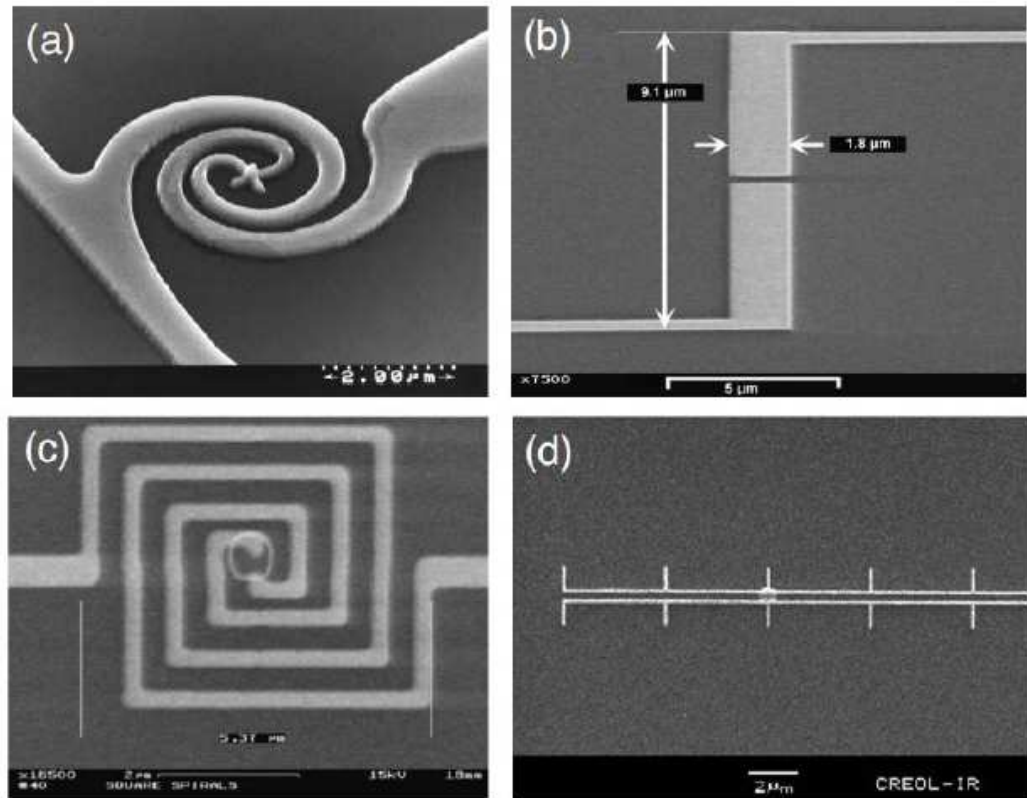


Figure 20 "Estructures espirals, fractals i CRLH" [42]

En aquests casos els materials per a les nano antenes més utilitzats són els metalls nobles com l'or i la plata, també mostra propietats molt interessants el grafè per la seva alta resistivitat, és poc pesat, té una conductivitat termal molt alta, alta eficiència de radiació en comparació amb les antenes metàl·liques i s'adapta molt bé a la banda de THz. La freqüència de ressonància es pot controlar a partir de un voltatge aplicat a la superfície del grafè. Els diferents tipus d'antenes nano mètriques només es poden realitzar a partir de processos d'alta resolució per aconseguir les geometries indicades.

## 5. Processos i fabricació

Bàsicament per a treballar al ordre nano mètric per a geometries i estructures acurades ens trobem amb 3 processos productius que donen una fiabilitat dels acabats relativament alta. Aquests són el “Electron beam lithography”, el “Solid-State superionic stamping” i el “Laser micromachining” que comentem en els punts següents.

### 5.1 Electron beam lithography

Aquesta tècnica, és la tècnica més utilitzada per a la fabricació d'estructures al voltant dels 100nm, que és també on ha hagut més experiència en els processos de fabricació a escala nano mètrica.

Tot es basa de principi en un substrat de silici d'una puresa elevada. Tot seguit es posa una capa d'òxid de silici o un PMMA (Polimetilmetacrilat) sobre els substrat, després de banyar el substrat amb acetona seguit d'un procés d'assecat ràpid es passa a incorporar una màscara sobre el PMMA. [43].

A partir d'un feix d'electrons al voltant dels 20nA que ataca el PMMA en els posicions que la màscara deixa passar el feix, el substrat torna a quedar lliure en les zones específiques atacades per la litografia o feix de llum sobre el PMMA. A partir d'aquí es realitza una deposició d'una capa de metall, en el cas de les nano antenes normalment d'or, plata o metall noble, a partir de processos d'evaporació aconseguint capes fines del material. Seguidament s'extreu de la deposició del metall noble, mitjançant la acetona, en les zones on no són necessàries que hi siguin, això l'anomenarem procés de lift-off. [44]. Ara queden establertes els contactes elèctrics entre els diferents materials.

Veiem esquemàticament el procés litogràfics.

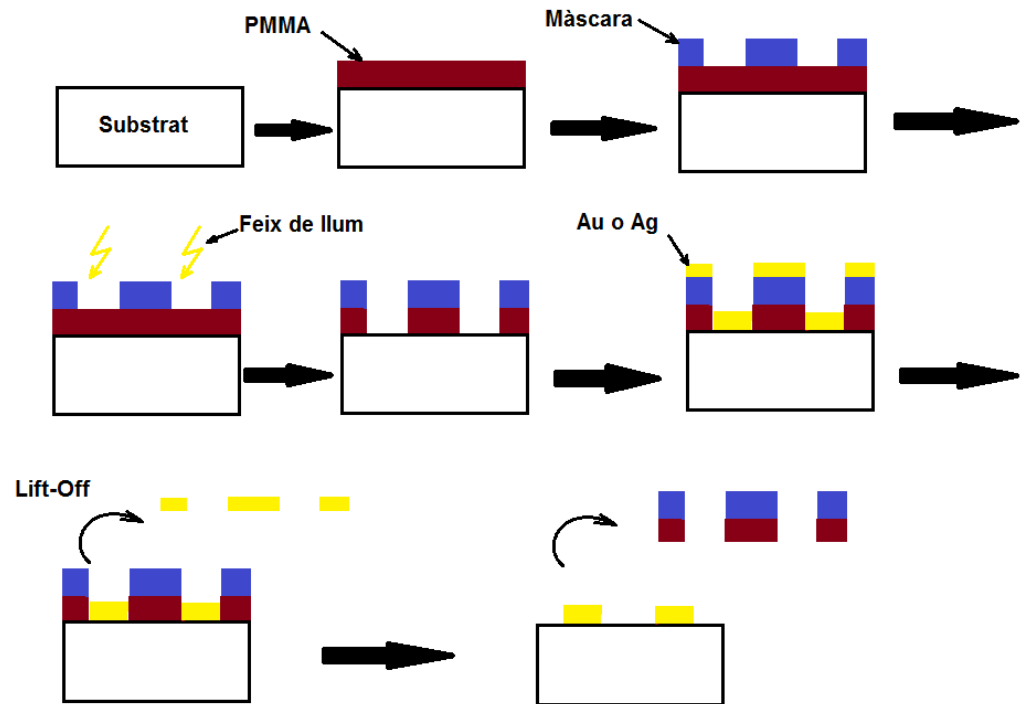


Figure 21 "Electron beam lithography"

## 5.2 Solid-State superionic stamping

Aquest sistema és més nou que l'anterior també anomenat S4 i es basa el procés en un estampat electroquímic sec a partir d'un superconductor iònic que permet aplicar un voltatge petit i una pressió d'estampat també molt petita a una capa de metall fina que es col·loca per sobre del substrat de Silici. El procés es basa en dos parts: la primera és la preparació d'un motlle basat en metall noble  $\text{Ag}_2\text{S}$  per a després en la segona part realitzar una estampida amb aquesta estructura d' $\text{Ag}_2\text{S}$  a una capa de metall fina i aplicar-li a la vegada un potencial entre la capa fina del Metall i el motlle d' $\text{Ag}_2\text{S}$ , deixant d'aquesta manera la impressió sobre la capa de metall fina, que serà la nostra estructura final. Anem a veure uns exemples esquemàtics de com es realitza el procés [45].

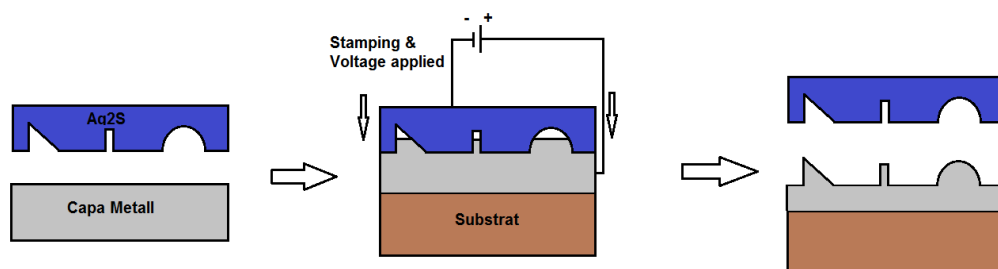


Figure 22 "Superionic Stamping"

Aquests sistema es pot aplicar molt bé per a estructures ben petites fins a resolucions dels 10nm de forma acurada i sobre tot el procés es molt utilitzat per a estructures que es distribueixin i es repliquin a grans àrees com per exemple per a arrays d'antenes.

El procés S4 es basa en poder aplicar les avantatges que suposar treballar amb les estructures i propietats iòniques del Ag<sub>2</sub>S i veure com s'analitza durant el procés, la deformació mecànica del metall.

Aquest procés s'ha realitzat per altres capes metàl·liques com el coure, el crom, el tità i l'or a més de la plata amb resultats similars. Aquests procés està limitat a una capa no es pot realitzar estructures multicapa.

### **5.3 Laser micromachining**

Aquest sistema segurament és, en coneixement i lo més modern (o state of the art) en la creació i fabricació d'estructures nano mètriques i micromètriques. Doncs es tracta d'aplicar un feix de làser a les estructures metàl·liques de manera molt acurada tenint en compte la pròpia natura del làser on s'ha de tenir en compte el nombre de polsos aplicats fs, duració i potència, així com polarització del feix de làser, longitud d'ona, velocitat i angle d'incidència cap a les estructures. A més alhora de fabricar els diferents materials s'han de tenir en compte les propietats d'aquests com la duresa i tipus de material; i la superfície d'aquest. Els làsers poden aplicar-se amb una resolució molt elevada, això el fa ideal per a treballar amb estructures petites amb una precisió molt alta. El sistema de làser pot realitzar estructures en 3D i amb una gran varietat de formes sense necessitat d'aplicar-se en habitacions netes o "clean rooms", no afecta el seu ús si hi han gasos o líquids en el entorn. Es tracta doncs d'un procés eficient i ràpid sense necessitat de contacte directe amb els metall sinó més que amb el feix de llum [46].

### **5.4 Sintetització de nano tubs**

Només comentar que per a la sintetització de nano tubs de carboni, tenim diferents processos de fabricació, que només els anomenarem i no profunditzarem el seu estudi.



- Descàrrega elèctrica, a partir de dos elèctrodes de grafit connectats a una font d'alimentació, separats uns mil·límetres i amb un entorn d'heli, es crea un plasma amb tubs nano mètrics.
- Chemical vapor deposition (CVD) es basa en preparar un substrat metàl·lic i calentat a 700°C per després introduir-lo en una cambra de gas metà. Poc a poc es va depositant els tubs de carboni en la superfície del substrat.
- Làser; es tracta d'injectar pulsos de làser a un material de grafit en un entorn d'alta temperatura i presència de gas com el metà. Els nano tubs es van condensant a la superfície.

## 6. Caracterització

### 6.1 Instrumentació i conceptes generals

Per a fer mesures de senyal d'entrada i de sortida dels diferents dispositius per a mesurar les reflexions i absorpcions de les ones electromagnètiques que aquest dispositiu té, utilitzem els network analyzers. D'aquests tenim de 3 tipus, LSNA, els SNA i els VNA. Els LSNA Large signal network analyzer estan adaptats per a senyals llargues com per exemple els harmònics d'una senyal o les no linearitats. SNA Scalar network analyzer serveixen per a fer mesures en magnituds escalars, és a dir mesura només l'amplitud dels senyals, mentre que els VNA vectorial network analyzer serveixen per a realitzar mesures de magnitud vectorials i per tant mesures d'amplitud i de fase de l'ona incident i la reflectida als ports. Per tant els VNA són més complexos que els SNA i necessiten d'una arquitectura més complexa per a detectar la fase i l'amplitud. Aquestes mesures es realitzen per a trobar els anomenats paràmetres d'scattering S11, S12, S21, S22. QU el que s'analitza són les mesures de reflexió i absorció sobre una càrrega determinada i mesures d'impedància.

Els VNA són utilitzats per a mesurar a freqüències en THz, pensem que la caracterització en les antenes a THz es basa en que les mesures estan en una banda de freqüències relativament estreta on hi ha una gran sensibilitat de mesura, que pot comportar unes pèrdues elevades originades per a les desviacions mínimes d'orientació de les antenes; la antena TX i l'antena RX. Les pèrdues es troben al voltant del 2.3dB per cada 10° de desviació amb antenes de botzina. [47]

Als Network analyzers, hi trobarem les funcions de calibració que es realitzen a causa dels cables i connectors, això es fa per a compensar les possibles pèrdues per deterioraments que aquests puguin tenir.

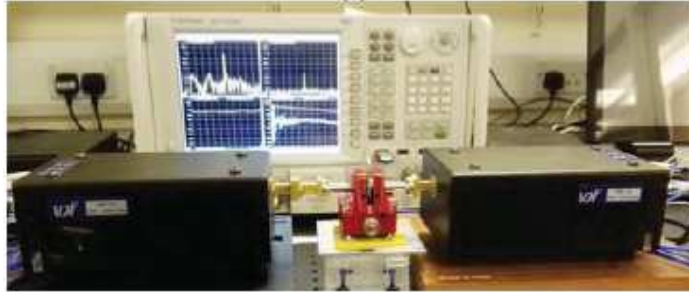


Figure 23 "VNA university of Glasgow" [48]

Connectors; Per a les transmissions de senyal per a antenes de RF a KHz hem estat sempre utilitzant els connectors BNC standard. Per a la transmissió òptica hem de considerar la natura de la banda de THz doncs les pèrdues als connectors poden afectar considerablement les mesures i per tant s'han d'utilitzar connectors especials per la transmissió òptica. Recordem que les pèrdues d'atenuació i les reflexions en un sistema òptic passen molt més per els connectors que no pas per la pròpia guia òptica. Per exemple utilitzar connectors E2000 de fibra, sovint utilitzats per a sistemes d'espectroscòpia THz-TDS.

-Fonts de radiació; Les fonts més utilitzades són els làsers *femtosecond* que generen un tren de pulsos ultracurts i amb una densitat de potència elevada. Veiem un exemple d'un làser a una longitud d'ona de 1070nm, amb una freqüència de pulsos de fins a 80MHz i una energia per puls de 900fs



Figure 24 (Company Coherent) làser

El femtosecond ha estat utilitzat en medicina, entre d'altres aplicacions per a operacions oculars i soldadures de la capa corneal. Deixa controlar el feix d'electrons ionitzables acuradament.

També altres làsers de polsos curts utilitzats tenim els picoseconds, o làsers de tipus díode que solen ser de menys potència etc.

Els sistemes d'emissió en THz són similars al de detecció. Estan basat en un parell de filaments metàl·lics semiconductors que queden excitats en un punt determinat causat per un camp elèctric molt elevat i generen d'aquesta manera un camp electromagnètic a THz.

-Fotodetectors; Hi han diferents tipus de detectors al mercat; detectors termals, detectors semiconductors, detectors coherents heterodins etc. Els fotodetectors es basen en el principi molt similar als fotoemissors. Una lent o cristall concentra la radiació en un punt determinat on es situarà el receptor de THz. Aquest receptor és una nano antena amb dos filaments que una vegada arriba la radiació, el camp elèctric incident, indueix un transient de tensió en un gap o buit estret que hi ha entre els dos filaments metàl·lics-semiconductors de l'antena. Les nano antenes seran els fotodetectors més adequats per aquesta banda de freqüència (THz).

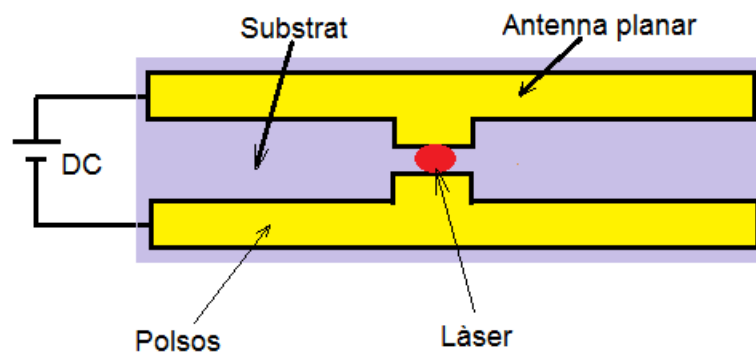


Figure 25

-Lents de Silici: es tracta de lents de mitja esfera que tenen els receptors i emissors de THz per a divergir o convergir el feix de radiació entrant o sortint i augmentar així l'eficiència de la transmissió. La lent es troba a la posició on es crea el làser de la figura 13

-Cristalls fotònics: aquests cristalls són materials sintetitzats a escala nano mètrica que s'encarreguen de tractar la llum en el seu pas en la forma que volem. Tenen materials metal·lo dielèctrics. Molt útil per a computació òptica i circuits fotònics. L'índex de refracció i reflexió defineixen l'estructura del material. Es tracta doncs de controlar el feix de llum i deixar filtrar unes certes longituds d'ona o unes altres al pas del material. Es poden inclús fer cristalls que absorbeixin totalment la llum o que la reflecteixin totalment. Aquesta tecnologia és molt interessant i base d'estudi de les comunicacions de nova generació per aconseguir una alta velocitat i grans quantitats de dades, aplicacions de vídeo i d'àudio.

-Miralls dielèctrics i metàl·lics: La principal diferència és que els miralls dielèctrics tenen un coeficient de reflexió molt més gran del 99,9% mentre que els miralls metàl·lics el seu coeficient de reflexió és menor. Per altre banda, els miralls metàl·lics s'adeqüen per un ample d'espectre més gran. Si les capes metàl·liques es fabriquen més gruixudes, hi ha una de millora del coeficient de reflexió. Els miralls es van fabricant per capes nano mètriques a partir de les necessitats segons es vulgui obtenir més reflexió o menys i adaptar-les a les bandes de freqüència d'interès.

A més de tot aquest material es necessiten també filtres òptics, prismes òptics, polaritzadors òptics, òptica per a UV i IR.

Un exemple d'instrumentació de mesura per a treballar les caracteritzacions dels materials a THz que es podria integrar en qualsevol laboratori:

### **8500 Series THz System for Material characterization**



Figure 26 "Company lakeshore cryotronics, Analitzador d'espectres"

Veiem ara un exemple d'estructura muntada del laboratori de mpsd per a THz



Figure 27 [49]

Com ja s'ha comentat en estructures nano mètriques hi ha un interès per al estudi de camp proper. L'anàlisi dels camps es realitza a partir d'una microscòpia de camp basada en el l'scattering de la llum òptica distribuïda en les estructures nano mètriques, que ha tingut una pes molt important en aplicacions d'imatges. Per a la detecció dels paràmetres d'scattering de la llum es prenen els valors de l'amplitud i de la fase del camp i es crea així una estructura o topografia del entorn. De fet la combinació entre la llum infraroja IR i els THz per a aplicacions d'imatge es fan ideals per a detecció i reconeixement de materials. La microscòpia en camp proper utilitza nano antenes que faran de emissors de senyals a THz respecte el camp analitzat. Aquest estudi en camp proper es realitza a partir de la tècnica **SNOM** (Scanning Near-Field Optical Microscopy), on s'analitza el camp d'scattering d'emissió de la nano antena, a partir de la amplitud i la fase en camp proper, on fent ús de nanovarilles veiem que la distribució de camp en amplitud es troba als extrems de la antena, mentre que la fase comença en el centre de la nano antena.

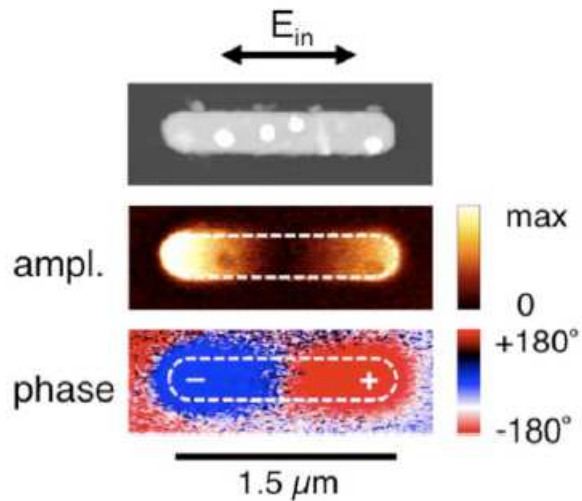


Figure 28 [50]

Un efecte que s'estableix dintre de les característiques dels fotoconductors pegats al metall semiconductor, es que en un camp elèctric hi ha una distribució molt gran de manca d'uniformitat, doncs al costat dels elèctrodes les potències són molt més elevades que els camps més allunyats. D'aquí que els fotomescladors serveixen per a millorar la distribució en el camp dels THz a partir de anar canviant la freqüència del mesclador, doncs es podrà augmentar la superfície al voltant dels elèctrodes.. Com que els camps electromagnètics es concentren més a la zona dels elèctrodes, serà en aquesta zona on es podran introduir les interdigitated fingers per a la absorció i fotodetecció en els camps de THz, veiem un exemple de *interdigitated fingers*: [20]

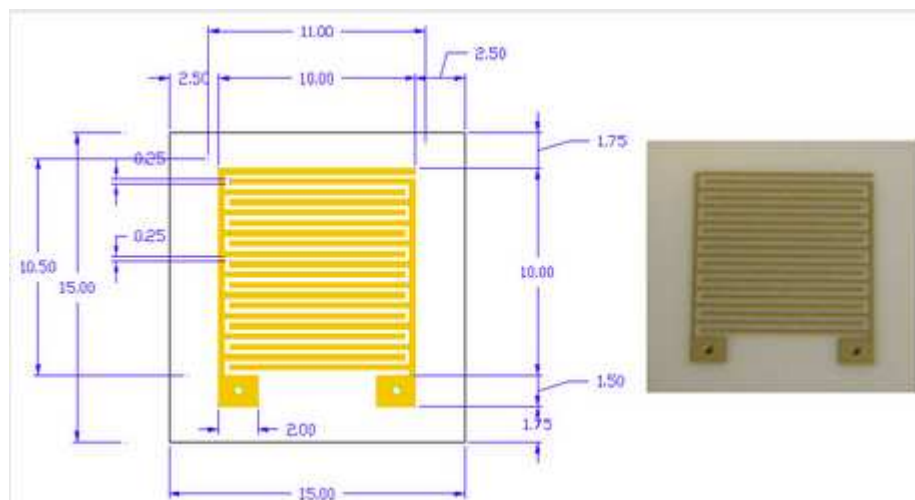


Figure 29 [51]

Per a la caracterització de les antenes a THz es tracta d'utilitzar tècniques d'incidència d'electrons i emissió de fotons per a estudiar l'anàlisi del camp proper i del camp llunyà.

## 6.2 Espectroscòpia no lineal

Bàsicament disposem de les següents tècniques:

-*Two-photons luminescence (TPPL)* [52]: Aquest sistema es basa en una luminescència fluorescent que provoca un material determinat a partir de l'excitació de 2 fotons incidents o llum infraroja sobre aquest material. La clau està en que l'energia dels fotons incidents són menors que l'energia del fotó emissor que surt de la descomposició molecular del material.

-*Second-harmonic imaging microscopy (SHIM)* [52]; aquest sistema està basat en un efecte no lineal que identifica imatges microscòpiques a partir d'una contrastació en les deteccions de variacions d'una ona harmònica a partir d'un feix de llum incident. La variació de la densitat òptica de la ona refractiva respecte la llum incident ens dona una característica de l'índex de refracció del material. La ona que surt del material tindrà una longitud d'ona més petita que l'ona incident. En aquest procés, al contrari que al TPEM, l'energia de l'ona queda conservada. Aquest sistema s'adequa molt bé per a estructures moleculars orgàniques com per exemple les proteïnes. Aquest sistema és millor utilitzar-lo per a no causar fototoxicitat fent incidències fotòniques que puguin desestabilitzar les estructures moleculars. A partir de la incidència de llum en THz infraroig, el sistema SHIM té la tecnologia suficient per a poder crear imatges en 3D de les proves mesurades.

-*Electron energy loss spectroscopy (EELS)*; Aquesta tècnica es basa en emetre un feix d'electrons accelerat que desprèn una energia ressonant de la nano antena. Això dona una resolució molt elevada per a el control precís de la localització dels punts d'excitació. Per exemple, un feix d'electrons és emès i a partir d'una espectrometria d'electrons es detecten aquells electrons que han perdut l'energia. D'aquesta manera es poden detectar els diferents tipus de materials i estructures atòmiques segons la quantitat d'energia retornada. Les aplicacions més comuns són mesures de gruix dels



materials en estructures determinades, i mesures de pressió que es mostren a partir de la intensitat i la posició de nivells energètics baixos de les estructures nano mètriques.

Anem a veure un esquema de muntatge d'un sistema basic i senzill d'espectroscòpia a THz:

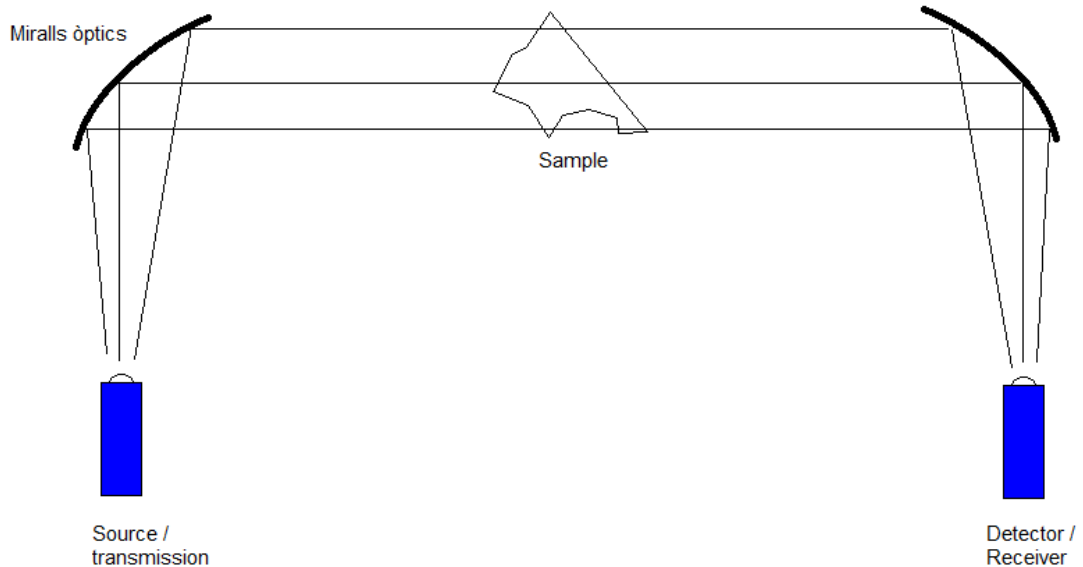


Figure 30

### 6.3 Anàlisi i resposta lineal

-*Scattering cross section*, per a l'estudi i mesures en les antenes, una tècnica es basa en aplicar un senyal de transmissió de banda ampla directament a les antenes prototips nano mètrics, de manera que en l'amplada de banda d'aquest senyal inclogui la freqüència de ressonància de l'antena. A aquesta freqüència direm que l'antena està adaptada. Una vegada el senyal es enviat es torna a fer una mesura d'scattering per a veure a partir de paràmetres d'scattering si hi han hagut reflexions o absorcions en la càrrega. Per tant si l'antena es troba davant del emissor del senyal, al darrere de l'antena hi col·locarem un receptor òptic per analitzar la intensitat de feix de les ones que s'han perdut o han traspasat la antena. A partir d'aquestes mesures podrem calcular quina és la intensitat de feix que ha estat absorbida per l'antena. Aquest és per tant un mètode senzill i lineal de realitzar, sinó més es necessiten els instruments de mesures adequats que ja hem parlat en capítols anteriors. [53]

- *Escalació*; una altre forma de realitzar aproximacions es fa a partir de la escalació de l'antena dissenyada en nm, amb prototips de grandària de cm per exemple i d'aquesta manera traspasar la freqüència per a la nova antena. A partir d'aquí podrem mesurar les antenes en cambres anecoiques (cambra d'absorció d'ones perquè no hi hagin reflexions) amb la mateixa rutina d'un laboratori d'ones. Per tant per a realitzar això estem davant d'un trasbalsament freqüencial amb una relació lineal directe, de la mida de l'antena. A més l'equació que relaciona la longitud d'ona amb la freqüència és:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

S'han realitzat experiments a partir de diferents grandàries de nano antenes per a veure la diferència i comportament lineal que aquest demostren a petita escala. Amb longituds d'ona ressonants tal i com segueix la equació:

$$\lambda_{ress} = 2 \times n \times L$$

Per tant la linearitat en les mesures i experiments o mostres realitzades d'antenes triangulars queden tal i com es mostra al gràfic següent:

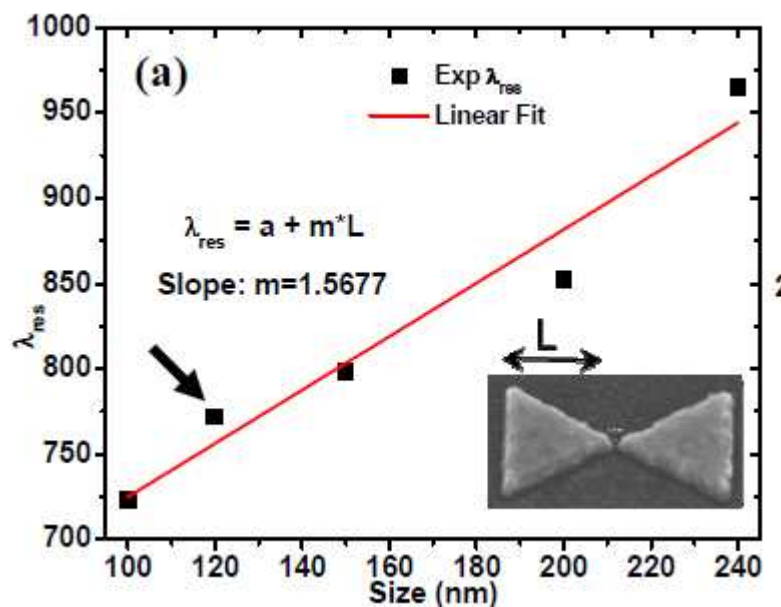


Figure 31 "Gràfic de Linearitat en ressonància i el tamany de les antenes" [54]

Les mesures realitzades poden ser comparades amb eines de simulació com les diferències finites FDTD o MoM. En les simulacions es defineixen els

paràmetres de les antenes, el material i els boundaries de l'antena i a partir d'aquí es pot aproximar el resultat de les simulacions a les mesures realitzades.

*-Espectroscòpia THz-TDS;* aquesta tècnica es basa en el comparació de pulsos quan hi ha un patró sense cap material i quan i posem un material entre mig. Bàsicament es tracta de fer una mesura d'amplitud i de fase dels pulsos que són enviats a THz i analitzar-los en el domini del temps, s'analitza en concret quin índex de reflexió i quin índex d'absorció té el material analitzat. Aquesta tècnica es realitza a partir d'un muntatge d'un emissor làser de THz, un fotodetector i uns miralls OAP (off-axis parabòlic) que focalitzen cap al detector i ajuden a reduir la relació SNR abans d'entrar al fotodetector. Aquest instruments són molt utilitzats en interferometria a THz. [55]

#### **6.4 Caracterització d'antenes d'or, grafè i plata**

La freqüència de ressonància com ja s'ha comentat, també depèn de la grandària de l'antena. Doncs tenim que per a una grandària més petita la transmitància és més gran i l'amplada de banda més reduïda, mentre que si la grandària és més gran la transmitància es redueix i creix l'amplada de banda. En l'exemple següent es representen dues grandàries (diàmetre) nano mètriques amb substrats de materials diferents per aconseguir la ressonància a la freqüència desitjada:

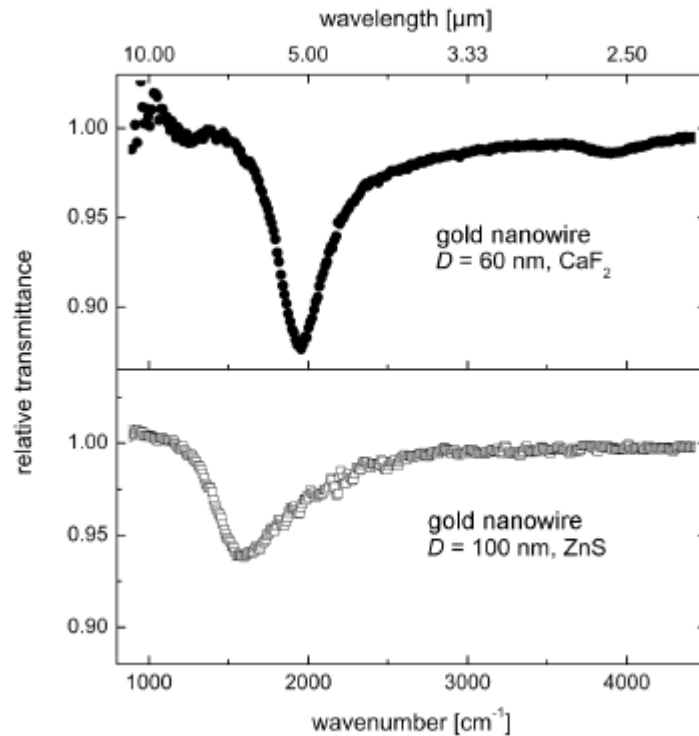


Figure 32 “ressonància plasmònica en diferents mides” [18]

La grandària en la secció transversal (cross section) és també un paràmetre a considerar, per exemple en nanoconexions o nano tubs d'or, per a ajustar la impedància i la caiguda en ressonància. En particular la ressonància plasmònica és fa servir per a controlar la intensitat de la llum emissora, control de la directivitat de l'antena i la polarització del camp electromagnètic (circular, transversal o vertical). Si analitzem les nano antenes més estudiades que són les triangulades i els dipols d'or tenim que els paràmetres que controlen la ressonància d'intensitat del camp elèctric són el gap (o distància entre les antenes de triangle o dipols), el llarg / l'ample de les antenes i l'índex de refracció dels materials que mostraran una distribució espectral diferent per a cada valor.

Per exemple, la ressonància per a una nanopartícula d'or, es concentra en la longitud d'ona marcada per la llum blava-verda i per tant reflexa visiblement el color vermell.

Una altre exemple, aquesta vegada d'una mesura d'un array de nano antenes d'or en forma cònica de 100nm, mostra la ressonància d'alçament de camp i la reflectància en comparació amb les simulades amb el simulador de CST (línia discontinua) a la freqüència de 8THz [56]:

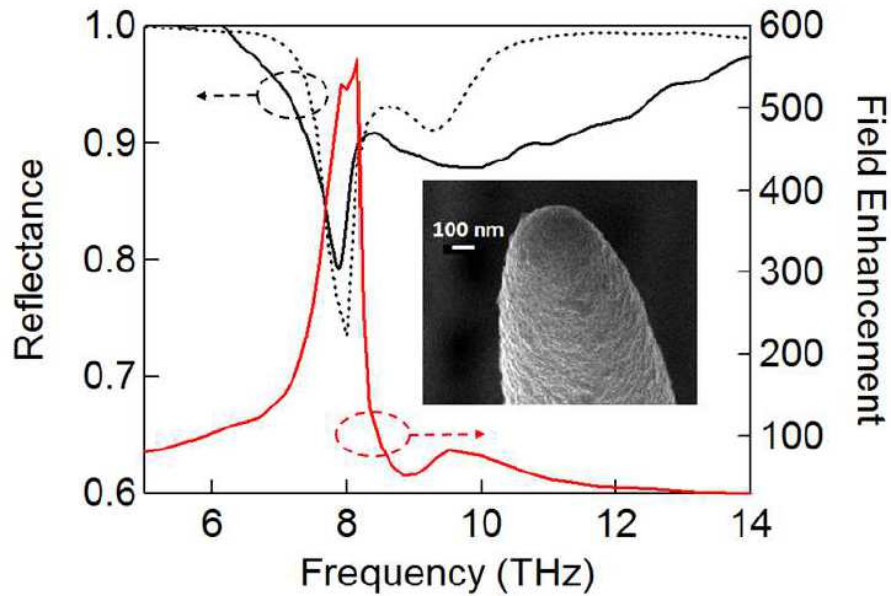


Figure 33 “Ressonància de camp i reflexió a les diferents freqüències d’un array de nano antenes de con” [56]

El nivells d’alçament de camp venen directament relacionats amb les distàncies de buit entre antenes i la geometria d’aquestes.

En concret veiem ara la figura següent per a nano tubs d’or amb diferents coeficients de reflexió calculats :

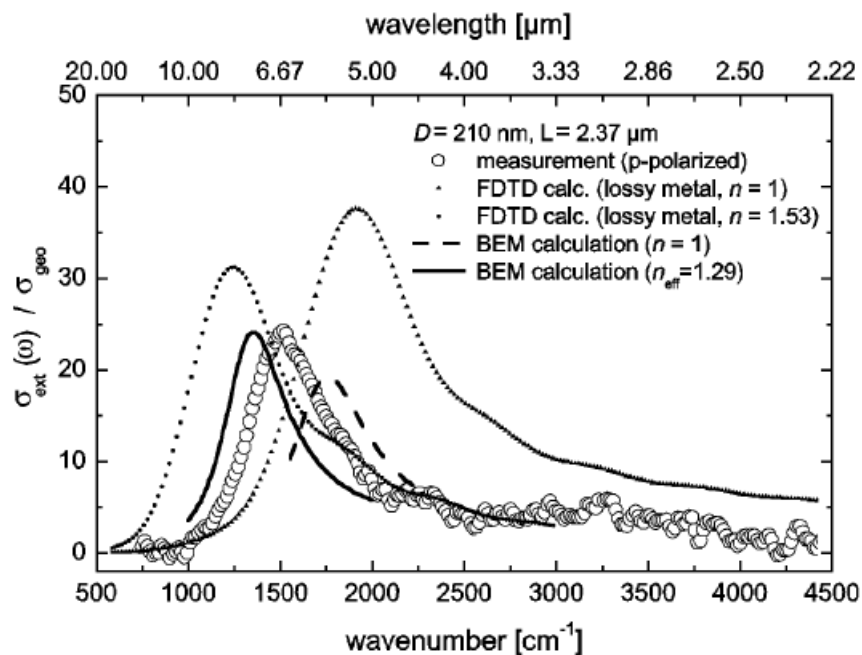


Figure 34 “Cross section a longitud d’ona d’una antena de con per a diferents valors de reflexió” [18]

Per una altra banda si fem una caracterització de nano tubs de grafè obtenim una freqüència de ressonància de 1,17THz per a un nano tub de  $L=1\mu\text{m}$  i un diàmetre de 4nm. La freqüència de ressonància del nano tub aproximada ve donada per la fórmula:  $Freq_{ress} = \frac{v_p}{2L}$  on  $v_p$  és la velocitat de propagació de

l'ona per la superfície i L la llargada del nano tub. Hem de considerar que el diàmetre del nano tub també influeix sobre la freqüència de ressonància. [57]

La impedància d'una nano tub també és bastant elevada però es pot compensar la reducció de la impedància a partir d'introduir més energia al nano tub. Les diferents cavitats i formes dels nano tubs donaran un efecte de distribució espectral i intensitat de camp elèctric.

Si agafem una patch antena en grafè de  $W=1\mu\text{m}$  i una  $L=5\mu\text{m}$  obtenim una freqüència de ressonància de 1,3 THz. Aquesta freqüència varia en quant variem la mida de l'antena segons els modes de treball m i n:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{W}\right)^2}$$

Encara que s'ha demostrat que comparant amb una antena amb capa metàl·lica obtenim resultats similars que amb el grafè [7]

Però els resultats confirmen que el grafè pot treballar per a una banda de freqüències d'entre 0.1THz fins als 10THz. [57]

La plata és un material en principi adequat per a les nano antenes però que té la desavantatge d'oxidar-se ràpidament i sovint forma una capa de AgS que fa perdre les seves propietats desitjades.

## 7. Sumari

Una vegada realitzat el estudi de recerca i d'investigació del treball en les bandes de THz i bandes òptiques podem fer un sumari general amb unes conclusions que confirmen la teoria i els resultats de mesures realitzades per nano antenes o estructures micro-nanomètriques, i experiments realitzats en la banda de THz. Per tant podem concloure els següents punts:

-La banda de THz és una banda de freqüències energèticament elevada no ionitzable, això ens donarà avantatge per a realitzar radiografies i espectroscòpia, distribuït en diferents capes, en material orgànic, sense ionitzar els àtoms de les molècules. Importantíssim per a la medicina.

-La banda de terahertz és energèticament alta, com per aprofitar la energia de la llum solar amb una eficiència molt més elevada en comparació a les cel·les solars. Conèixer els semiconductors adequats i les nano antenes ens obrirà moltes portes energèticament parlant.

-La banda de THz és ideal per a la comunicació de grans quantitats de dades a velocitats molt elevades, com per vídeo o àudio. Un argument de pes per a avançar i estudiar aquesta tecnologia.

-La banda de THz implica una HDI (High density Integration) en els circuits òptics. Això és possible gràcies a les petites dimensions necessaris dels components

-La nano antena és el receptor principal òptic per a la detecció de radiació a THz. Per a l'emissió de la radiació a THz, l'estructura de l'antena és molt similar, a partir de dos fils metall-semiconductor paral·lels.

-A la banda de THz i les nano antenes, els metalls no es comporten com a conductors perfectes com ho farien en RF, mostrant grans pèrdues.

-A les nano antenes s'utilitzen com a material els metalls nobles com el or, doncs aquests materials tenen un comportament conductor a la banda de THz, gràcies als plasmons que es distribueixen per la superfície de l'antena hi apareix una freqüència de ressonància de gran caiguda, en un rang

freqüencial determinat. Aquesta freqüència se'n diu "ressonància plasmònica."

-L'or a més, té conductivitat elèctrica elevada, alta influència als camps magnètics i és un bon anticorrosiu en ambients humits.

-Els millors materials per a aplicacions de nano antenes en termes d'eficiència i amplada de banda, són el grafè, la plata i l'or.

-El grafè i el NbN no tenen un comportament lineal en tot el rang freqüencial i depenen de la quantitat de material.

-Les diferents geometries de les nano antenes(amplada, llargada) al igual que els gaps (o distàncies entre 2 antenes triangulars o dipols) i els índex de reflexió dels materials, mostraran una ressonància d'intensitat de camp diferent al igual que una distribució espectral ajustable a la freqüència desitjable.

- Les aplicacions per a les nano antenes i radiació a THz són Medicina, circuits integrats avançats, eficiència solar, automoció, aviació i espai i anàlisi atmosfèric. Per a les indústries alimentàries, empaquetatge i de la fusta, les aplicacions son bàsicament de qualitat, doncs es podran detectar imatges molt precises de si els aliments tenen la forma que han de tenir, o si l'empaquetatge ha quedat ben tancat o si la fusta té forats per dintre que l'usuari no pot detectar a primera vista.

-Les nano antenes arriben a tenir una eficiència solar de fins el 90% del espectre solar, respecte les plaques fotovoltaïques convencionals amb un 46%. Un pas molt important per a les energies renovables.

- Els 3 processos bàsics de fabricació de nano estructures són:

- Laser micromachining
- Solid State superionic stamping
- Electron beam lithography

-Els fotoemissors làsers femtosecond, cristalls òptics, miralls òptics, mescladors òptics i detectors de radiació a THz juntament amb analitzador



d'espectres, són la base instrumental per a realitzar anàlisis d'espectrometria bàsica o muntatge d'un laboratori d'alta freqüència.

-Un pas més enllà de la banda de THz; L'eficiència plasmònica de fotons absorbits per els materials, la rapidesa i velocitat de les estructures atòmiques combinades amb els temps llarg que necessiten les aplicacions humanes juntament amb l'escalabilitat dels sistemes són la base per a la creació d'instruments quàntics de propera generació.

## 8. Bibliografia i recursos web

- [1] J. Anguera i T. Pérez, «"Teoría de Antenas",» La Salle, Universitat Ramon Llul, 2008.
- [2] J. Grade, P. Haydon i D. Van der Weide, «Electronic Terahertz Antennas and Probes for Spectroscopic Detection and Diagnostics,» Vol. 95, N°8, p.1-7, August 2007.
- [3] T. R. Globus, M. L. Norton, M. I. Lvovska, D. A. Gregg, T. B. Khromova i B. L. Gelmont, «Reliability Analysis of THz Characterization of Modified and Unmodified Vector Sequences,» vol.10, N°3, p.1-8, March 2010.
- [4] C. Menzel, E. Hebestreit, S. M Mühlig, C. Rockstuhl, S. Burger, F. Lederer i T. Pertsch, «The spectral shift between near- and far-field resonances of optical nano-antennas,» Vol. 22, N°8, p.1-12, April 2014.
- [5] «RF & optical antenna,» 2017. [En línia]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=HhHLYJAKQn8>.
- [6] A. Banerjee i U. Malaviya, «Design of a Tunable Ultraviolet Filter using Metallodielectric Photonic Crystal,» p. 1-4, 2007.
- [7] I. Llatser, C. Kremers, D. N. Chigrin, J. M. Jornet, M. C. Lemme, A. Cabellos-Aparicio i E. Alarcon, «Characterization of Graphene-based Nano-antennas in the Terahertz Band,» p.1-4, 2011.
- [8] «Wikipedia grafeno,» 2018. [En línia]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno#Aplicaciones\\_en\\_electr%C3%B3nica](https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno#Aplicaciones_en_electr%C3%B3nica).
- [9] S. Nakayama, M. Okano, Y. Nozaki i S. Watanabe, «Magneto-optic Kerr effect CCD imaging with polarization modulation technique,» AIP Advances 7, 056802, p.1-8, 2017.
- [10] «Japanchemicaldaily,» [En línia]. Available: <https://www.japanchemicaldaily.com/2017/02/15/silicon-wafer-supplies-stay-tight-lieu-price-hikes/>.
- [11] «Waferworld,» [En línia]. Available: <https://www.waferworld.com/silicon-wafer-about/>.
- [12] A. P. Nayak, V. a. M. Logeeswaran i S. Islam, «Wet and Dry etching,» [En línia]. Available: <https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJv5iKsbLbAhUmLsAKHReCBP8QFjAAegQIARAv&url=http%3A%2F%2Fweb.ece.ucdavis.edu%2F~anayakpr%2FPapers%2FWet%2520and%2520Dry%2520Etc>

hing\_submitted.pdf&usg=AOvVaw2wqN8B004sa.

- [13] M. Liang, Z. Wu, W.-R. Ng, M. Gehm i H. Xin, «Electromagnetic Crystal (EMXT) based Terahertz,» 2013.
- [14] «Superconductors,» 2006. [En línia]. Available: [https://books.google.de/books?id=r9NE75dn19QC&pg=PA137&lpg=PA137&dq=superconductors+antenas&source=bl&ots=gL4634dFBr&sig=vALby\\_4uEiKtymDVel9Bb-fiTQE&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjW07LrydPaAhUlsxQKHRqcCAAQ6AEIOjAC#v=onepage&q=superconductors%20antenas&f=false](https://books.google.de/books?id=r9NE75dn19QC&pg=PA137&lpg=PA137&dq=superconductors+antenas&source=bl&ots=gL4634dFBr&sig=vALby_4uEiKtymDVel9Bb-fiTQE&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjW07LrydPaAhUlsxQKHRqcCAAQ6AEIOjAC#v=onepage&q=superconductors%20antenas&f=false).
- [15] G. R.T.Kampwirth and K.E., «NbN MATERIALS DEVELOPMENT TO R PRACTICAZ. SUPERCONDUCTING DEVICE,» Vol. MAG-17, N°1, p. 565-568, January 1981.
- [16] C. Zhang, J. Biaobing i J. Han, «Nonlinear response of superconducting NbN thin film and NbN metamaterial induced by intense terahertz pulses,» doi:10.1088/1367-2630/15/5/055017, p.1-12, May 2013.
- [17] J. Chen, P. Albella, Z. Pirzadeh, P. Alonso-González, F. Huth, S. Bonetti, V. Bonanni, J. Akerman i J. Nogués, «Plasmonic Nickel Nanoantennas,» No. XX, p.1-7, 2011.
- [18] F. Neubrech, J. Aizpurua, S. Karim i T. Cornelius, «PROPERTIES OF GOLD NANOANTENNAS IN THE INFRARED,» 2018.
- [19] P. B. J.-S. H. J. K. L. D. B. H. M. F. a. G. C. D. Brida, D. Brida, P. Biagioni, J. -S. Huang, J. Kern, L. Duò, B. Hecht, M. Finazzi i G. Cerullo, «Multi-photon Autocorrelation in Gold Nanostructures,» OCIS codes: (190.4180), p.1-2, 2011.
- [20] C. B. W. R. T. I. V. B. M. J. E. E. H. L. G. D. a. M. M. M. I. Ian S. Gregory, I. S. Gregory, C. Baker, W. R. Tribe, I. V. Bradley, M. J. Evans, E. H. Linfield, A. G. Davies i M. Missous, «Optimization of Photomixers and Antennas for Continuous-Wave Terahertz Emission,» Vol. 41, N°5, p. 717-726, 5, May 2005.
- [21] M. Hussein, N. F. Areed, M. F. O.Hameed i S. Obayya, «Modified Elliptical Nanoantenna for Energy Harvesting Applications,» 2016.
- [22] G. A. E. Vandenbosch i Z. Ma, «Study of the radiation efficiency of nano-dipoles,» p. 916-919, 2012.
- [23] A. M. A. Sabaawi, C. C. Tsimenidis i B. S. Sharif, «Analysis and Modeling of Infrared Solar Rectennas,» Vol.19, N°3, p. 1-8, MAY/JUNE 2013.
- [24] «Uni Würzburg,» 2010. [En línia]. Available: <https://www.uni-wuerzburg.de/sonstiges/meldungen/single/news/nano-anten/>.
- [25] F. Norouzian, F. Qi, B. Willetts, M. Gashinova, C. Constantinou, P. Gardner, E. Hoare i M. Cherniakov, «Characterisation of Attenuation at Low THz Frequencies in Radar

Sensors,» p. 101-104, Sept 2015.

- [26] R. Appleby i B. Wallace, «Standoff Detection of Weapons and Contraband in the 100 GHz to 1 THz Region,» Vol.55, N°11, p. 2944-2955, November 2007.
- [27] D. Zimdars, J. S. White, G. Stuk, A. Chernovsky, G. Fichter i S. Williamson, «Security and Non Destructive Evaluation Application of High Speed Time Domain Terahertz Imaging,» OCIS Codes: (110.0110), p. 1-2, 2006.
- [28] D. Zimdars, J. S. White, G. Stuk, A. Chernovsky, G. Fitcher i a. S. Williamson, «Large area terahertz imaging and non-destructive evaluation applications,» p. 63-66, June 2006.
- [29] P. H. Siegel, «THz Instruments for Space,» Vol. 55, N°11, p. 2957-2965, November 2007.
- [30] X. C. D. S. E. A. M. D. S. F. Hongyu Zhou, H. Zhou, X. Chen, D. S. Espinoza, A. Mickelson i D. S. Filipovic, «Nanoscale Optical Dielectric Rod Antenna for On-Chip Interconnecting Networks,» Vol. 59, N°10, p. 2624-2632, October 2011.
- [31] Elezzabi, P. Maraghechi i A. Y., «Fractal Structures for THz Radiation Emitters,» Vol.19, N°1, p.1-10, January/February 2013.
- [32] N. Khiabani, «Modelling, Design and Characterisation of Terahertz Photoconductive Antennas,» p 77, september 2013.
- [33] J. A. a. D. U. J. M. J. W. Jayasinghe, «Genetic Algorithm Optimization of a High-Directivity Microstrip Patch Antenna Having a,» Radioengineering, Vol. 22, No. 3, pp.700-707, September 2013.
- [34] A. A. S. B. J. J. a. S. K. J. Anguera, «High-Directivity Microstrip Antenna with Mandelbrot Fractal Boundary,» IET Microwaves, Antennas & Propagation, Volume 12, Issue 4, p. 569 – 575, 28 March 2018.
- [35] J. D. C. J. M. C. P. T. L. K. S. a. P. V. R. J. Anguera, «Metallized Foams for Antenna Design: Application to Fractal-Shaped Sierpinski-Carpet Monopole,» Progress In Electromagnetics Research, PIER 104, 239-251, 2010.
- [36] C. P. C. B. R. M. a. J. S. J. Anguera, «Small and High Directivity Bowtie Patch Antenna based on the Sierpinski Fractal,» Microwave and Optical Technology Letters, vol.31, no. 3, pp.239-241, Nov 2001.
- [37] C. P. C. B. a. J. S. J. Anguera, «Fractal-Shaped Antennas: a Review,» Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, vol.2, pp.1620-1635, 2005.
- [38] C. P. C. B. a. J. S. J. Anguera, «Dual Frequency BroadBand Stacked Microstrip Antenna Using a Reactive Loading and a Fractal-Shaped Radiating Edge,» IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters vol.6, pp. 309-312, 2007.

- [39] E. M. C. P. C. B. a. J. S. J. Anguera, «BroadBand Dual-Frequency Microstrip Patch Antenna With Modified Sierpinski Fractal Geometry,» IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 1, p. 66-73, Jan. 2004.
- [40] C. P. E. M. a. E. R. J. Anguera, «The fractal Hilbert monopole: A two-dimensional wire,» Microwave and Optical Technology Letters, vol.36, no. 2, pp.102-104, Jan. 2003.
- [41] E. R. J. A. C. Puente, «Space-filling miniature antennas,» US Pat. 7,202,822.
- [42] D. H. E. H. Figueroa, «10\_Nanoantenas.pdf,» 2018. [En línia]. Available: [www.usmp.edu.pe/vision2011/exposiciones/10.Nanoantenas.pdf](http://www.usmp.edu.pe/vision2011/exposiciones/10.Nanoantenas.pdf).
- [43] «Elektronenstrahlithografie,» [En línia]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenstrahlithografie>.
- [44] «Cooke Evaporator,» [En línia]. Available: [http://inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Cooke\\_Evaporator](http://inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Cooke_Evaporator).
- [45] «Super Solid State Stamping,» 2007. [En línia]. Available: [http://nanocemms.illinois.edu/media/uploads/content/103/files/s4\\_superionic\\_solid\\_state\\_stamping.20110826154942.pdf](http://nanocemms.illinois.edu/media/uploads/content/103/files/s4_superionic_solid_state_stamping.20110826154942.pdf).
- [46] K. M. T. Ahmmed, G. Colin i A.-M. Kietzig, «Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining,» 2014.
- [47] A. R. Ekti, A. Boyaci, A. Alparslan, I. U nal, S. Yarkank, A. Gorcin, H. Arslan i M. Uysal, «Statistical Modeling of Propagation Channels for Terahertz Band,» p. 275-280, 2017.
- [48] A. Khalid, D. Cumming, R. Clarke, C. Li i N. Ridler, «Evaluation of a VNA-based Material Characterization Kit at Frequencies from 0.75 THz to 1.1 THz,» p.31-34, 2016.
- [49] «qcmd mpsd,» 2008. [En línia]. Available: <http://qcmd.mpsd.mpg.de/index.php/research/methods-experiments/generation-of-high-intensity-terahertz-pulses.html>.
- [50] R. Hillenbrand, «Infrared and Terahertz Nanoscopy for Dielectric Imaging and Near-Field Mapping of Antennas and Transmission-Lines,» p.1-3, 2011.
- [51] «Printerfingers,» 2018. [En línia]. Available: <http://engineering.case.edu/edct/electrodes>.
- [52] A. KUMAR, «OPTICAL NANO-ANTENNAS: FABRICATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATIONS,» p.1-93, 2011.
- [53] G. R. J. i M.S., «Determination of antenna parameters by scattering, 10, OCTOBER 1964,» vol 111 N°10, p.1679-1686, October1964.

- [54] L. Carletti, L. Ghirardini, V. Gili, G. Pellegrini, L. Duo, M. Finazzi, D. Rocco i A. Locatelli, «Polarization-Resolved Second Harmonic Generation Measurements in AlGaAs Monolithic Nanoantennas,» p.1, 2017.
- [55] F.-M. Yeh, D. Chin-Chen, C.-L. Tien i S.-C. Lee, «The Off-Axis Parabolic Mirror Optical Axis Adjustment Based on Cyclic Shearing Interferometer,» p.1-4.
- [56] A. Rovere, A. Toma, M. Prato, A. Bertoncini, A. Cerea, R. Piccoli, A. Perucchi, P. Di Pietro, F. De Angelis, L. Manna, R. Morandotti, C. Liberale i L. Razzari, «Conical Nanoantenna Arrays for Terahertz Light,» p.1-1, 2015.
- [57] J. Miquel Jornet i I. F. Akyildiz, «Graphene-Based Nano-Antennas for Electromagnetic Nanocommunications in the Terahertz Band,» p.1-1.