

SEGMENTO DE LOS THZ EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SUS APLICACIONES

Ramón Díaz de León Zapata

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
ramondz@hotmail.com

Efrén Flores García

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
efren.flores@itslp.edu.mx

Ismael Lara Velázquez

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
ishma_lara@hotmail.com

J. F. Emmanuel Luna Torres

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí
emmanuel.luna.t@gmail.com

Resumen

El espectro electromagnético abarca por completo al universo, desde la mínima presencia de materia (y por tanto posee energía) hasta los rayos cósmicos (que son los más energéticos) pasando por varios matices como las ondas a frecuencias de kilo, mega y giga hertz utilizadas principalmente en telecomunicaciones y llegando hasta los rayos X y rayos Gamma en aplicaciones médicas (entre otras), sin embargo existe un segmento de ese espectro conocido como el segmento o “gap” de los terahertz que ha sido poco explorado (y por ende explotado) y del que las recientes investigaciones han revelado que posee enormes potenciales en aplicaciones tan diversas como la espectroscopía, astronomía, medicina, telecomunicaciones, imagenología, etc. En el presente

trabajo se exponen los fundamentos de la tecnología de terahertz, así como su estado de la técnica.

Palabra(s) Clave(s): Comunicaciones a Terabit, Nanoantenas, Terahertz.

Abstract

The electromagnetic spectrum completely covers the universe, from the minimal presence of matter (and therefore has energy) to the cosmic rays (which are the most energetic) going through several nuances like the waves at frequencies of kilo, mega and giga hertz used Mainly in telecommunications and reaching up to X-rays and Gamma rays in medical applications (among others), however there is a segment of that spectrum known as the terahertz segment that has been little explored (and therefore exploited) And recent research has revealed that it has potential standards in applications as diverse as spectroscopy, astronomy, medicine, telecommunications, imaging, etc. In the present work the fundamentals of the technology of terahertz, as well as its state of the art are exposed.

Keywords: Terabit Communications, Nanoantennas, Terahertz.

1. Introducción

“Tecnología de terahertz: científicamente la más rica y sub utilizada región del espectro electromagnético”, “donde convergen las técnicas ópticas y de microondas” [1].

Independientemente de la longitud de onda o frecuencia de la que se trate, el estudio de la radiación electromagnética tiene su fundamento en la ley de Planck conocida como “radiación de cuerpo negro” que es un objeto idealizado en el que toda la radiación que incidiera sobre él sería absorbida y que también, si éste emitiera radiación, lo haría sin pérdidas. Tras varios intentos por hacer coincidir las observaciones experimentales con un modelo matemático que ajustara predictivamente el comportamiento de las emisiones electromagnéticas de cualquier material, Planck deduce que la energía E de esa radiación electromagnética debe ser proporcional a su frecuencia multiplicada por una constante (la ahora llamada constante de Planck) abreviada como h y cuyo valor

puede obtenerse por distintas vías, siempre con el mismo resultado, $h=6.62196668 \times 10^{-34}$, así $E=hu$, donde u es la frecuencia a la que oscila la onda electromagnética. En otras palabras, un oscilador de frecuencia natural u puede tomar o ceder energía únicamente en porciones de magnitud hu .

Como consecuencia de lo anterior, cualquier cuerpo a una temperatura distinta de cero, emite radiación y presenta un solo máximo a una longitud de onda que depende de su temperatura específica. La figura 1 muestra la gráfica de la emitancia del cuerpo negro con respecto a su longitud de onda para varias temperaturas de acuerdo a la ecuación 1.

$$E(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)} - 1 \right)} \quad (1)$$

Donde k es la constante de Boltzmann $1.38054 \times 10^{-16} \text{ erg.K}^{-1}$ y h es la constante de Planck $6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$.

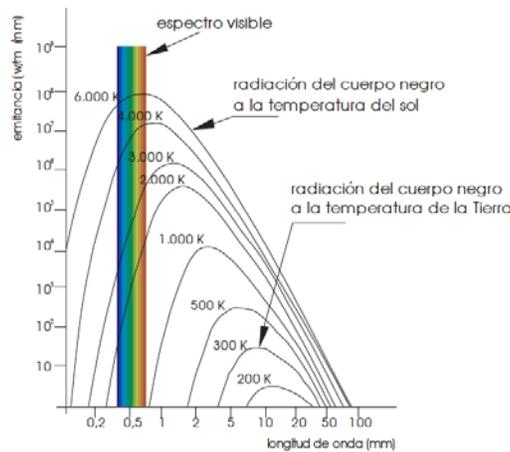


Figura 1 Emitancia del cuerpo negro a distintas temperaturas y longitudes de onda.

Si bien el pico de energía de la onda electromagnética no depende de los materiales, sino de su temperatura y longitud de onda, es posible crear a través de la combinación de materiales nanoestructurados dispositivos capaces de emitir o detectar rangos de frecuencias específicos bajo diseño, gracias a la comprensión del comportamiento corpuscular de la radiación electromagnética.

En particular la energía térmica de un cuerpo negro a temperatura ambiente se encuentra alrededor de los 6 THz de modo que, en general, resulta de particular interés este rango de frecuencias por las propiedades de la materia que es ahora conocido como el hueco de los terahertz o “THz gap” [2] como se puede ver en la figura 2. La razón que originalmente justificaba el que no se investigara a fondo esta región del espectro electromagnético radicó en el hecho de que se consideraba una zona de poca utilidad, ya que a temperatura ambiente ciertos objetos y seres vivos emiten radiaciones dentro de este rango de frecuencias lo que las hacía inapropiadas para aplicaciones prácticas [3].



Figura 2 Ubicación de los THz en el espectro electromagnético.

Sin embargo la ciencia de los terahertz ha ido creciendo en popularidad en las décadas recientes debido principalmente a los avances técnico – científicos de los que hemos sido testigos y en particular con la llegada de la espectroscopía en el dominio del tiempo (TDS por sus siglas en el idioma inglés), con fuentes de láser de pulsos ultra cortos que hacen posible a los investigadores llevar a cabo estudios especializados en el infrarrojo lejano para explorar esta técnica de instrumentación y comenzar a imaginar aplicaciones en régimen de onda sub milimétrica [4]. Es también interesante comentar que no existe una norma o convención que determine las fronteras precisas de los terahertz pero, para tomar un punto de referencia se dirá que pueden abarcar desde los 300 GHz (0.3 THz) hasta los 300 THz. Algunas de las propiedades que presenta de la radiación electromagnética en este rango son la no ionización, una interacción intermolecular de estas ondas con la materia más que la presencia de transiciones atómicas y que estas ondas pueden penetrar una amplia variedad de materiales no conductores (como también lo pueden hacer las micro ondas) [1].

En la figura 3 se presenta un esquema simplificado de la ubicación de las ondas terahertz respecto a las aplicaciones de sus homologas con mayores y menores frecuencias.

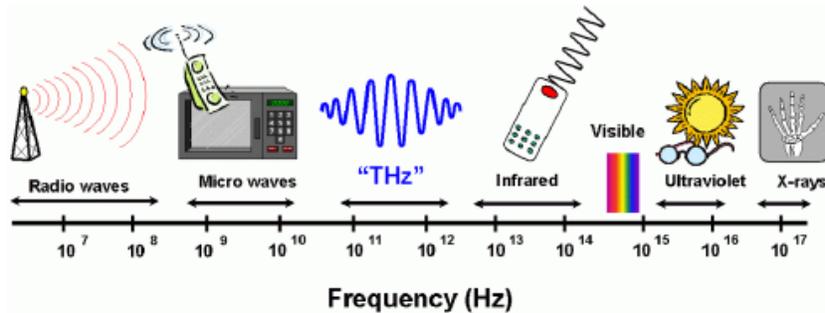


Figura 3 Aplicaciones de las frecuencias por debajo y por encima de los THz.

Aún al día de hoy, es una práctica común trasladar toda la experiencia acumulada en el diseño de antenas que llamaremos "convencionales" que son principalmente usadas en radiofrecuencia y telecomunicaciones, a los procesos involucrados en la gama de los terahertz para la captación o emisión de este tipo de radiaciones, sin embargo existen diferencias sutiles más allá de sus dimensiones nanométricas, pues los materiales fabricados con procesos de diseño e ingeniería para ser utilizados en aplicaciones prácticas presentan comportamientos sui generis tales como resonancia de plasmones, ondas evanescentes etc. Resulta entonces muy conveniente referirse a estas antenas como "nanoantenas" o "antenas ópticas" y son un relativamente nuevo concepto en la óptica física.

Estas antenas ópticas son dispositivos que convierten la libre propagación de radiación óptica en energía focalizada y viceversa. Estos dispositivos permiten el control y manipulación de los campos electromagnéticos en el rango lumínico a escala nanométrica y prometen aumentar el desempeño y eficiencia de la foto detección y la emisión más eficiente de luz que las tecnologías actuales.

Ahora bien, muchas de esas aplicaciones con terahertz de sistemas emergentes que utilizan las ondas sub milimétricas, como en radioastronomía, observaciones de la tierra desde el espacio exterior, sensado de procesos químicos y biológicos, imágenes para el análisis de materiales y comunicaciones inalámbricas de banda

ancha dependen críticamente de la confiabilidad y fuentes compactas de ondas continuas con bajo consumo de potencia de corriente directa y un excelente desempeño ante el ruido electromagnético [5] con lo que se hace obligatorio realizar estudios exhaustivos más profundos y dar a conocer aquellos que ya se han realizado en este rubro, motivo justamente del presente trabajo.

2. Fuentes de radiación de Terahertz

La detección de las ondas electromagnéticas en el régimen de los terahertz requiere el diseño de foto detectores nanométricos que tengan tal capacidad y ciertamente existen avances significativos al respecto como en [6], y también son conocidas aquellas fuentes naturales de emisión de ondas terahertz como se mencionó en el subsección anterior; sin embargo, para asegurar que los foto detectores de radiación terahertz se encuentren calibrados, o para poder hacer comparaciones o normalizaciones de precisión en instrumentación óptica, se precisa de poder generar y controlar tales emisiones, tarea aún más desafiante que la detección misma.

Una de las primeras alternativas funcionales para la generación de ondas terahertz fue el girotrón aunque su régimen de operación se encuentra en el rango máximo de los 300 GHz (0.3THz) [7] justo en el límite inferior de la banda de los terahertz, posteriormente se fabricaron otros dispositivos como los láseres de cascada cuántica, fuentes de luz de sincrotrón, fuentes de fotomezclado (photomixing), Espectroscopía en el dominio del tiempo entre otros [8].

Más recientemente se ha podido demostrar por medio de simulaciones numéricas, la capacidad de algunos dispositivos nanoestructurados para emitir y capturar radiación electromagnética en el rango de los terahertz como en [9], gracias al aprovechamiento de ciertos fenómenos ópticos como la resonancia de plasmones.

3. Los Terahertz en comunicaciones inalámbricas

El acceso a la información digital ha ido presentando rasgos que fueron difíciles de haber sido predichos, pues en sus inicios bastaba una computadora personal y una conexión “cableada” a Internet por medio de la línea telefónica; sin embargo la

sociedad misma fue exigiendo tres aspectos que caracterizan las modernas comunicaciones digitales: inalámbrica, de alta velocidad y de un gran ancho de banda, ya que en particular, la transferencia de datos de manera inalámbrica se ha duplicado cada dieciocho meses desde las últimas tres décadas y se está aproximando rápidamente a las capacidades de transferencia que tienen los medios cableados y a esta tendencia, se le ha denominado “ley de Edholms” del ancho de banda [10], en similar alusión a las predicciones que plantea la “ley de Moore” para la potencia de procesamiento en los microprocesadores.

La figura 4 muestra representaciones pictóricas del uso de los terahertz para aplicaciones en el área de las telecomunicaciones.

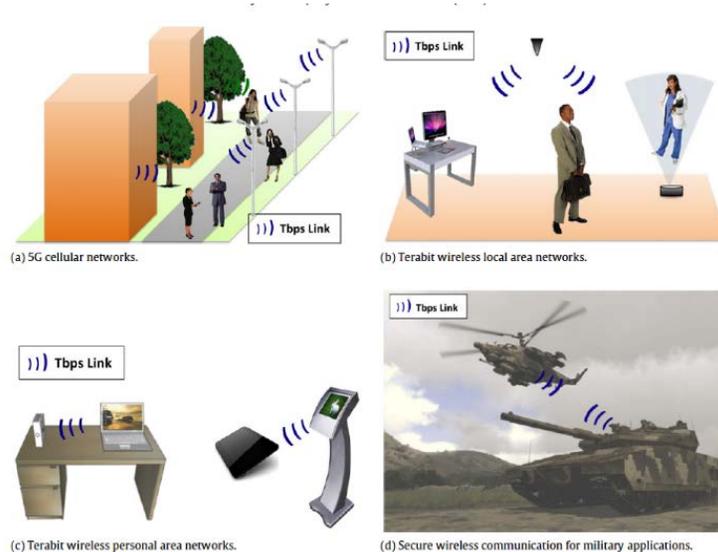


Figura 4 Ejemplos de comunicaciones a Tera bytes por segundo (TBs).

Blin S. y otros [2] reportan en su trabajo titulado “THz wireless communication using plasma wave detectors” el uso de un transistor de efecto de campo (FET por sus siglas en inglés) con el que ha sido posible alcanzar exitosamente altas tasas de transferencia, sin embargo se comenta también en su trabajo la necesidad de acoplar dicho transistor a una antena eficiente, además de la necesidad de realizar tales transferencias libres de errores, resumiendo sus logros en la figura 5, donde se observa que para garantizar mayores velocidades de transferencia es necesario el incremento en la potencia de la señal de THz, de modo que existen

importantes avances con esta técnica, pero sigue alejada de las verdaderas transferencias de unidades de TBs (Tera Bytes por segundo).

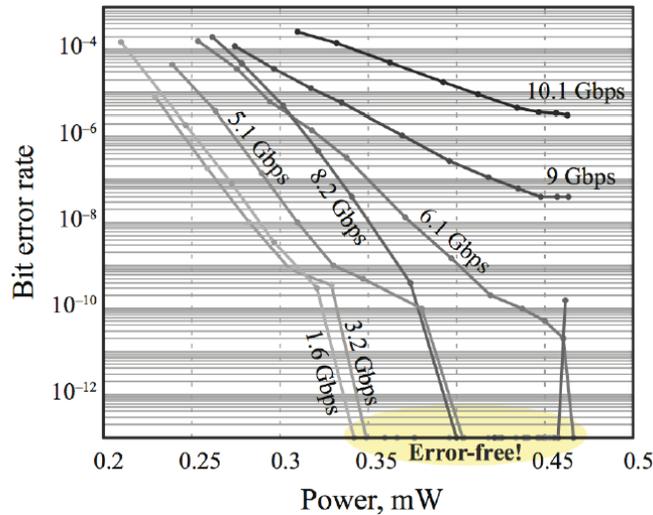


Figura 5 Mediciones de tasa de bits con errores en función de potencia de señal THz.

Por otra parte, se están investigando las mono capas de carbono como posibles soluciones a las aplicaciones de radiofrecuencia, debido a que con estas nanoestructuras superficiales se pueden fabricar los llamados “GFET mixers” (Graphene Field Effect Transistor), dispositivos que acoplan adecuadamente las radiaciones en THz y las convierten en corriente eléctrica para hacerlas compatibles con la tecnología actual basada en el uso de los transistores [11].

La tendencia actual permite sugerir el futuro de las comunicaciones a THz. Formular la teoría básica que describa adecuadamente los fenómenos físicos y químicos involucrados en la ingeniería de nanomateriales es uno de los principales retos en los que hay significativos y fluidos avances, sin embargo desde el punto de vista tecnológico aún deben franquearse muchos obstáculos.

Controlar y dominar los procesos tecnológicos que se necesitan para la fabricación de nanoestructuras para sus aplicaciones en las comunicaciones abrirá un sinnúmero de nuevas aplicaciones en las que la imaginación será el límite.

De una manera similar a como se comenzó con las primeras redes telefónicas en donde se antojaba inimaginable la proeza de tender cables que interconectarán a

cada aparato y, posteriormente con las redes de telefonía celular en las que por analogía debieron tenderse redes de antenas celulares, el posible futuro de las telecomunicaciones a THz implicará el tendido de enormes redes de enlaces ópticos que de hecho ya están presentes, pues las modernas sociedades necesitan iluminación permanente, con lo que sólo faltaría producir los dispositivos transceptores a bajo costo y a gran velocidad a través de procesos industrializados eficientes.

Por medio de las nanoantenas adecuadas, es posible detectar condiciones de salud, pues el cuerpo de un ser vivo emite de manera natural un campo electromagnético en el rango de los terahertz que, aplicando el algoritmo de detección de cambio en los patrones normales, se podrá tener el diagnóstico oportuno en caso de la presencia de alguna enfermedad.

La interconexión a velocidades que para muchos procesos aparentarían ser instantáneas permitirá la multilocación virtual (video conferencia múltiple) en tiempo real sin pérdida de fidelidad de la información transportada, así como la posibilidad de que tal información corresponda a rubros que antes no se hubieran supuesto para estas aplicaciones por su enorme volumen de datos como los hologramas o las imágenes tridimensionales sólo por mencionar algunas.

4. Los Terahertz en espectroscopía y astronomía

La astronomía hace uso de la espectroscopía en su quehacer cotidiano y toma especial interés en la banda de los THz ya que es en esta región del espectro electromagnético que ocurren algunos fenómenos únicos en la tierra, los planetas y la atmósfera de cuerpos celestes pequeños y, en general en el espacio interestelar e intergaláctico, pero también la espectroscopía aporta grandes conocimientos referentes a partículas suspendidas en nuestra atmósfera (contaminantes o no) y por supuesto en otras muchas áreas que no necesariamente involucran a la astronomía, pero resulta interesante analizar en este apartado la intrínseca relación que guardan estas dos disciplinas con la banda de los terahertz.

Las observaciones astronómicas desde el espacio requiere detectores sensibles que, con las condiciones tecnológicas del presente implica poder lograrlo sólo si se enfrían a temperaturas criogénicas con el uso de helio líquido, lo que por supuesto complica el uso de tales equipos de detección además de limitar su uso a los momentos en que se tengan las condiciones de enfriamiento adecuadas.

Así pues, resulta interesante vencer el reto tecnológico para la fabricación de dispositivos detectores en el rango de los terahertz que además operen a temperaturas por encima de los 20 K, ya que es la temperatura que podemos encontrar en el espacio exterior sin necesidad de disminuir aún más la temperatura del dispositivo de manera artificial.

Cates y su equipo [12] proponen un detector con antena acoplada entonable en los terahertz (TACIT por sus siglas en inglés) que puede ser operado más allá de los 20 K con alta sensibilidad. La figura 6 muestra el esquemático de la heteroestructura para un prototipo de detector TACIT.

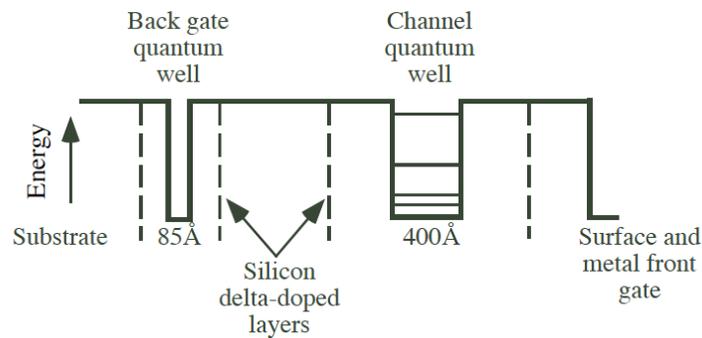


Figura 6 Esquemático de un prototipo de detector TACIT.

La propuesta de Cates para su aplicación con el acoplamiento de la antena se puede apreciar en la figura 7, donde se detallan las secciones que lo componen. A grandes rasgos su funcionamiento consiste en que la luz, con frecuencias de terahertz es absorbida en una transición inter sub banda por los electrones en el canal del pozo cuántico, dando por resultado que la resistencia del dispositivo cambie en el plano interno. Para este caso, la antena sirve no sólo como colector de la radiación, sino que también permite cambiar la polarización del campo

surgidas de la ciencia aeroespacial en ámbitos aparentemente dispares como la ciencia de la salud entre muchos otros, pero que se subraya en este punto por representar un aspecto del desarrollo tecnológico que engrandece la esencia humana al buscar su bienestar y que se explica más profusamente en el capítulo siguiente.

5. Los Terahertz en imagenología y ciencias de la salud

Dado que las ondas electromagnéticas en el rango de los terahertz son emitidas naturalmente por prácticamente cualquier cosa a temperatura ambiente y, principalmente los seres vivos, es posible aplicar ciertas técnicas de captación de imágenes y someterlas a un proceso computacional basado en diversos paradigmas algorítmicos para el diagnóstico de algunas enfermedades que tradicionalmente involucran técnicas invasivas o por métodos ópticos ionizantes y por ende peligrosos como los rayos X. Otras técnicas sí requieren la emisión de radiación en el rango de los terahertz dirigidos a alguna zona del cuerpo, sin embargo al no ser ionizantes estas fuentes de radiación, es posible aplicarlas de manera segura y diagnosticar por ejemplo, cáncer de piel donde las células cancerígenas consumirán significativamente más sangre para mantener su tasa de crecimiento elevado y tendrán una diferencia con aquellas células normales que las diferenciarán y lo único que deberá hacer el paciente fue esperar algunos minutos frente a una cámara fotográfica para ser diagnosticado sin margen de error.

Ejemplos de aplicaciones en diagnóstico médico con el uso de estas tecnologías lo encontramos en el trabajo realizado por S. Kolosovas y F. J. González [14], donde se concluye que la distribución de temperaturas en la piel de los niños en edades inferiores a los 14 años muestran un patrón similar al de los adultos; sin embargo las variaciones de temperatura en la población pediátrica son menores que en la de los adultos, indicando que las termografías infrarrojas y en frecuencias de Terahertz pueden ser una herramienta de diagnóstico más preciso cuando se usa en niños que en adultos.

En un futuro próximo, será posible de alguna manera colocar, insertar o superponer dispositivos capaces de emitir la información capturada por medios ópticos y haciendo uso de la comunicación a Tera bytes (TB) por segundo tanto en personas sanas como en aquellas que padezcan alguna enfermedad para ser monitoreadas permanentemente y poder realizar diagnósticos tempranos, mejorando las expectativas de recuperación o control de la enfermedad como lo sugiere la figura 9. Cabe mencionar que se abre también un interesante abanico de oportunidades en el área deportiva para identificar aspectos que pudieran orientar hacia la optimización en la alimentación, entrenamiento y hasta medicamentos que el deportista pueda aprovechar en pro de la siempre codiciada mejora en las marcas.

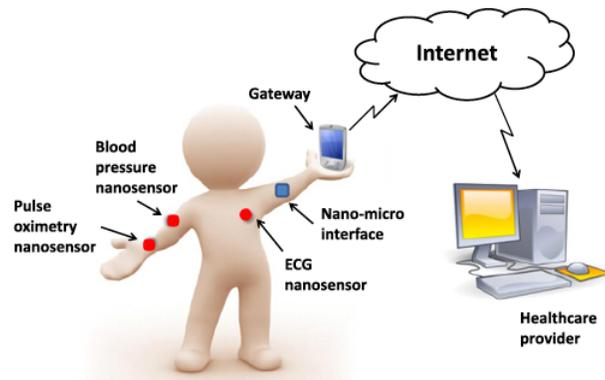


Figura 9 Posibles aplicaciones biomédicas de los sensores y comunicaciones de THz.

6. Nanoantenas para el aprovechamiento de la energía solar

El diseño y modelado [15] de las nanoestructuras es en sí misma una tarea titánica, pues las ecuaciones que definen el comportamiento de la materia a escala nanométrica es inversamente proporcional a sus dimensiones e intentar resolver manualmente algunas de esas ecuaciones sería en la actualidad prácticamente imposible; es por ello que se hace uso de sofisticado software que además debe ser ejecutado en poderos sistemas de hardware y posteriormente se requerirá la fabricación del dispositivo con complejas técnicas químicas,

fotolitografía por haz de electrones o epitaxia por haces moleculares, entre otras técnicas y algunas que seguramente emergerán en los próximos años.

Una de las preocupaciones de nuestros días es la contaminación asociada a la producción de energía eléctrica que es, a fin de cuentas, la que incentiva el progreso de las sociedades modernas. Es en este punto de inflexión donde los dispositivos de terahertz se posicionan como una alternativa tanto para la detección de los contaminantes producidos por la actividad industrial, como para la generación misma de energía eléctrica, pues es posible convertir y almacenar aquellas fuentes térmicas en el rango de los terahertz en corriente eléctrica como se establece en [6] y [16]. En esencia se puede resumir a dos técnicas fundamentales la fabricación de las nanoestructuras para su aprovechamiento en la conversión de la energía lumínica a energía eléctrica, por métodos químicos de auto ensamblado como en [17] o por métodos fotolitográficos por haz de electrones como en [18] (o una combinación de ambos).

El reto tecnológico a vencer en las antenas de terahertz es la necesidad de rectificar la señal oscilante a esas “velocidades” por medio de la electrónica convencional basada en el silicio; aquellas antenas que se han construido aplicando esta técnica se denominan rectenas [19, 20], sin embargo se ha demostrado que aquellas nanoantenas construidas para aprovechar el efecto Seebeck son también una alternativa prometedora [16, 21] (ver figura 10).

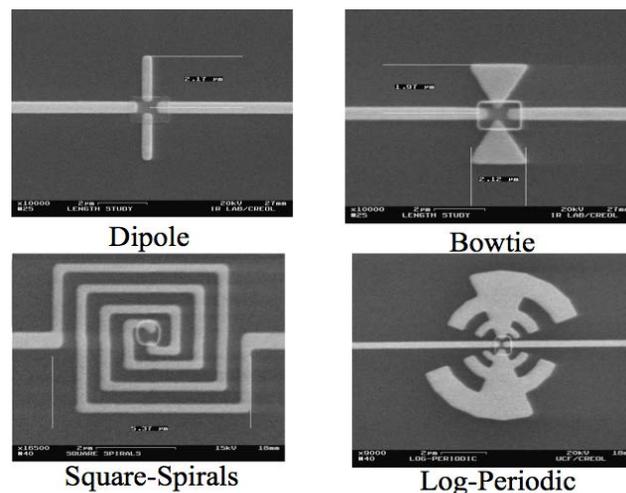


Figura 10 Ejemplos de nanoantenas que aprovechan el efecto Seebeck.

La tendencia a considerar a la plasmónica y la nanofotónica en general como un caso particular de la óptica clásica, ha llevado a desarrollar dispositivos a nanoescala de sus contrapartes macroscópicos con las salvedades que la nanotecnología representa, como es el caso de agregarle lentes colimadores micro maquinados [22] con resultados muy prometedores como puede apreciarse en la figura 11.

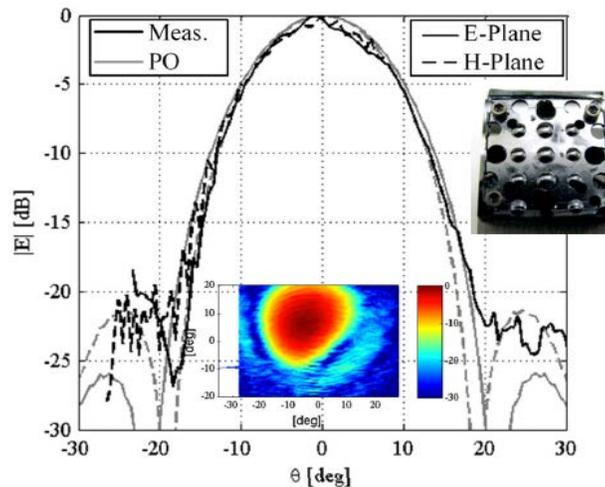


Figura 11 Incremento del campo eléctrico debido a la presencia de los micro lentes.

7. Conclusiones

Desde que se hicieron las primeras predicciones de los fenómenos físicos que debían acompañar a la ingeniería de materiales en la escala nanométrica, tras alcanzar una meta tecnológica que demostrara algún aspecto teórico, habrían ya en la “fila de espera” nuevas teorías que demostrar y mejores técnicas para corroborarlas, a la par de encontrar o idear explícitamente aplicaciones para los nuevos desarrollos o resultados de las investigaciones.

Una panorámica general de la evolución de los avances en el conocimiento y aplicaciones de los Terahertz lo podemos apreciar en la figura 12.

Las comunicaciones inalámbricas, el desarrollo de instrumentos de medición para espectrografía, las aplicaciones médicas y la generación de energías limpias a través de recursos renovables son sólo algunas de las aplicaciones generales que

encuentra la exploración y explotación del rango del espectro electromagnético conocido como Terahertz y cada apartado a su vez contiene una prácticamente inagotable cantidad de aplicaciones que seguirán exigiendo profundas investigaciones y habilidades para la construcción de tales dispositivos.

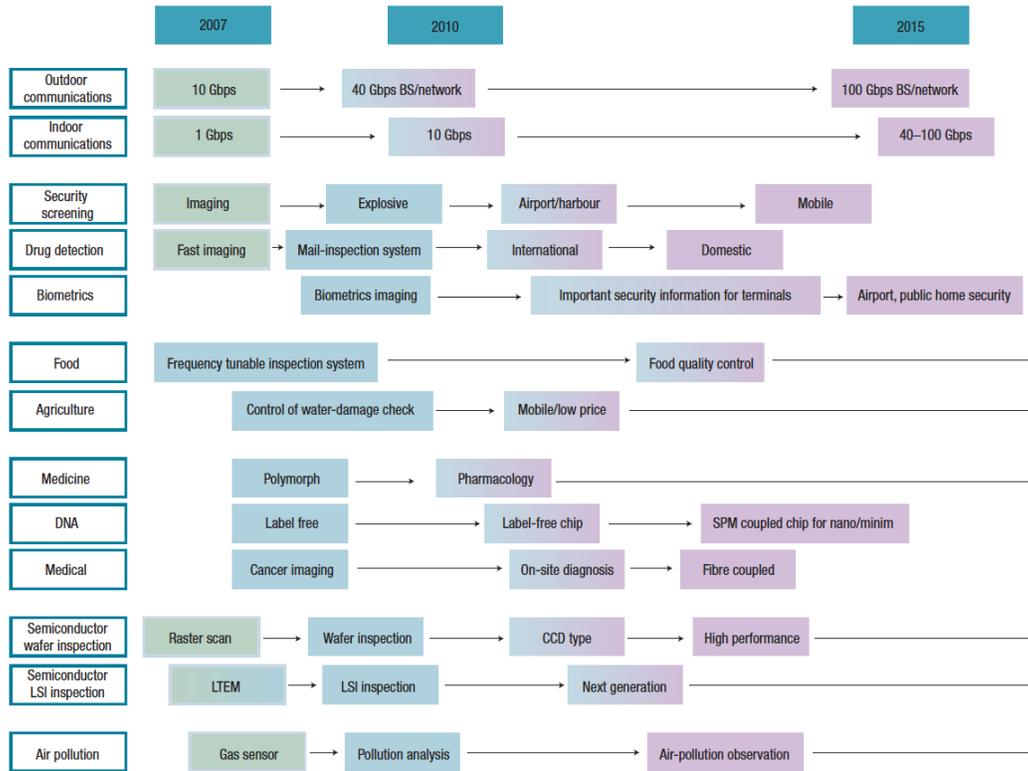


Figura 12 Evolución y tendencias de la tecnología de Terahertz.

En el diseño, simulación y fabricación de los dispositivos existe una especie de sana competencia por demostrar cuál técnica es la más apropiada en donde se puede observar en retrospectiva histórica, que las técnicas que parecía quedarían obsoletas, retoman su importancia tras modernizarse la tecnología o por haberse encontrado aspectos teóricos que se tuvo la destreza de incorporar para su desarrollo de modo que nada está escrito y cualquier línea de investigación que se desee abordar al respecto tiene prometedoras sorpresas.

Ya desde las primeras predicciones que realizaba la teoría de la mecánica cuántica, se vislumbraba la posibilidad de identificar efectos peculiares,

ciertamente únicos que se presentarían a escalas nanométricas, pero también resultaba poco probable que tales fenómenos pudieran extrapolarse al mundo macroscópico. Fenómenos como las ondas evanescentes, que eran una teoría que además involucraba números imaginarios en las ecuaciones que la definen, son una realidad que ahora permiten la construcción y uso de los llamados microscopios de súper resolución o permiten también construir diminutos láseres, apenas unos milímetros cuadrados de puntos y cascadas cuánticas con potencias capaces de cortar metales o transmitir paquetes de información instantánea sin importar la distancia con la teleportación cuántica.

Tras haber comprendido los fundamentos básicos que rigen los fenómenos físicos de la materia a escalas nanoscópicas, se ha procedido a desarrollar la tecnología necesaria para manipular y construir bajo diseño nanoestructuras que interactuarán ahora a escalas macroscópicas ofreciendo propiedades inimaginables en los materiales que de ninguna manera se encuentran presentes en la naturaleza sin intervención humana.

Existe afortunadamente aún mucho camino por recorrer para seguir investigando sobre este tema y algunos emergentes que proporcionarán beneficios en varios campos, desde aquellos que faciliten el diagnóstico de enfermedades, la detección de armas o explosivos, las comunicaciones inalámbricas donde quiera que exista una fuente de luz artificial, entretenimiento con la transferencia de enormes volúmenes de datos a velocidades casi instantáneas de audio y video y sus aplicaciones que se adapten a los juegos de realidad virtual hacen no sólo interesante conocer de estos temas, sino que invitan, además a ser parte de quienes aporten avances en la frontera del conocimiento en las Aplicaciones de los Terahertz.

8. Bibliografía y Referencias

- [1] Stake J 2011 Closing the THz gap. (Suecia: Chalmers University of Technology).
- [2] Blin S, Thome L, Nouvel P, Pénarier A, Coquillat D, Knap W, Ducournau G, Lampin J-F, Bollaert S, Hisatake S and Nagatsuma T 2014 THz Wireless

- communications using plasma-wave detectors. (Francia: Université Montpellier) p 2.
- [3] James L-H and Tae-In J 2012 A review of terahertz conductivity of bulk and nano-materials. In: Journal of Infrared, Millimetre and Terahertz Waves, (Alemania: Springer).
- [4] Yin X, Ng B W H and Abbot D 2012 Terahertz Imaging for Biomedical Applications Pattern Recognition and Thermographic Reconstruction, (Alemania: Springer).
- [5] Eisele H 2010 State of the art and future of electronic sources at terahertz frequencies. (EEUU: Electronics Letters).
- [6] González F J and Boreman G D 2004 Comparison of dipole, bowtie, spiral and log-periodic IR antennas Infrared Physics & Technology 46 11.
- [7] Pozar D M 2012 Microwave Engineering (EEUU: Wiley).
- [8] Gallerano G P and Biedron S 2004 Overview of terahertz radiation sources. In: 2004 FEL Conference, pp 216-22.
- [9] Díaz de León-Zapata R 2014 Patrón de Radiación y Propiedades Ópticas de Emisión de nanoantenas de Ag-ZnO. In: Concurso de Exhibición de Carteles de Proyectos de Investigación, de los Estudiantes de Posgrado de la UASLP, ed U A d S L Potosí (México: UASLP).
- [10] Akyildiz I F, Jornet J M and Han C 2014 Terahertz band: Next frontier for wireless communications. In: Physical Communication: Elsevier) pp 16-32.
- [11] Han W, Allen H, Hustin W, Ying K and Tomas P 2010 Graphene-Based Ambipolar RF Mixers IEEE Electron Device Letters 31 3.
- [12] Cates C L, Williams J B, Sherwin M S and Maranowski K D 2000 Tunable Antenna-Coupled Intersubband Terahertz (TACIT) Detec. (EEUU).
- [13] V. S J, Choonsup L, Robert L and Erich S 2014 Capability of Broadband Solid-State Room-Temperature Coherent Sources in the Terahertz Range.
- [14] Briones E, Cuadrado A, Briones J, Díaz de León R, Martínez-Antón C, McMurty S, Hehn M, Montaigne F, Alda J and González F J 2014 Seebeck nanoantennas for the detection and characterization of infrared radiation Optics Express 22 9.

- [15] Sabaawi A, Tsimenidis C and Sharif B 2013 Analysis and Modeling of Infrared Solar Rectennas IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 19 8.
- [16] Kolosovas-Machuca S and González F J 2011 Distribution of Skin Temperature in Mexican Children Skin Research and Technology 17 6.
- [17] Sanchez J E, Mendoza F, Cantu J, Velazquez J, Yacamán J and Ponce A 2014 Electric radiation mapping of silver/zinc oxide nanoantennas by using electron holography. (EEUU: University of Texas at San Antonio).
- [18] Vieu C 2000 Electron beam lithography: resolution limits and applications Applied surface science 164 111-7.
- [19] Gadalla M N, Abdel-Rahman M and Shamim A 2014 Design, Optimization and Fabrication of a 28.3 THz Nano-Rectenna for Infrared Detection and Rectification. In: Scientific Reports.
- [20] Moddel G and Sachit G 2013 Rectenna Solar Cells (New York, USA: Springer).
- [21] Martin J 2012 Computational Seebeck Coefficient Measurement Simulations Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology 117 8.
- [22] Lombart N, delPino M A, Lee C, Chattopandhyay A, Kubiak C J and Mehdi I 2013 On the Development of Silicon Micromachined Lens Antennas for THz Integrated Heterodyne Arrays.
- [23] Gonzalez F J, Alda J, Simón J, Ginn J and Boreman G 2009 The effect of metal dispersion on the resonance of antennas at infrared frequencies Infrared Physics & Technology 4.
- [24] Zhendong Z, Benfeng B, Oubo Y, Qunqing L and Shoushan F 2015 Fano resonance boosted cascaded optical field enhancement in a plasmonic nanoparticle-in-cavity nanoantenna array and its SERS application Light: Science & Applications 4.
- [25] Díaz de León R 2015 Análisis Electromagnético de Nanoestructuras a Frecuencias de Terahertz. In: CIACyT-UASLP, (San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí).