

GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE RADIACIÓN CON FRECUENCIA DE TERAHERTZ EMPLEANDO PULSOS DE LUZ ULTRACORTOS

GENERATION AND MEASUREMENT OF TERAHERTZ RADIATION USING ULTRASHORT LIGHT PULSES

FEDERICO SANJUAN^{1,2,*}, JORGE O. TOCHO^{1,3}

¹ Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata-CIC), ² Área de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, ³ Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.
e-mail: federicosj@ciop.unlp.edu.ar

Recibido 30/03/2012; aprobado 23/08/2012

En este trabajo se presenta el desarrollo de un generador de pulsos electromagnéticos con frecuencia de terahertz basado en una antena fotoconductor excitada con pulsos de 100 fs provenientes de un láser de modos acoplados de titanio:zafiro y polarizada con tensión continua modulada. La medición de la duración de los pulsos de terahertz se realiza con otra antena fotoconductor excitada con una parte de los pulsos de luz retrasados convenientemente y donde el campo de polarización lo proveen los propios terahertz. La variación de la línea de retardo permite registrar el campo eléctrico del pulso de terahertz en función del tiempo. El contenido espectral de los pulsos obtenidos muestra contribuciones importantes entre 0.4 y 3 THz. Estos pulsos serán utilizados en el futuro inmediato para realizar espectroscopía resuelta en el tiempo.

Palabras Claves: Terahertz, antenas fotoconductoras, pulsos ultracortos de luz, láser de modos acoplados, espectroscopía resuelta en el tiempo.

We present the development of an electromagnetic pulses generator in the Thz range based on photoconductive antenna excited with 100 fs pulses coming from a mode-locking titanium:sapphire laser. The measurement of the Terahertz pulses duration has been realised properly with another photoconductive antenna excited by part of the light pulse conveniently delayed. Changing the delay line allows to register the electric field of the terahertz pulse in terms of time. The spectral content of the pulses obtained shows important contributions between 0.4 and 3 THz. These pulses will be used to perform time resolved spectroscopy.

Key Word: THz, photoconductive antennas, ultra-short light pulses, mode-locking lasers, time domain spectroscopy.

I. INTRODUCCIÓN

Menos de cincuenta años después de la predicción notable de J. C. Maxwell de la existencia de las ondas electromagnéticas, la gran variedad de las mismas fueron descubiertas y, en muchos casos, convenientemente utilizadas. Así las ondas de radio, descubiertas por Hertz en 1887, los rayos X de Roentgen de 1895 y los rayos gamma de Paul Villard de 1900, se sumaron a la luz, conocida desde la antigüedad, a los “rayos caloríficos” o infrarrojos, de Herschel de 1800 y a los “rayos químicos” o ultravioletas, de Johann Ritter de 1801, para completar totalmente el espectro electromagnético tal como se lo conoce hoy día. Esta mención estaría incompleta si no recordáramos la valiosa contribución de J. C. Bose, quien en 1897 describió sus trabajos en la región de las ondas milimétricas o microondas, con frecuencias tan altas como 60 GHz.¹

Sin embargo, una pequeña región espectral comprendida entre las microondas de más alta frecuencia y el infrarrojo de longitudes de onda más largas, permaneció más de 150 años sin un desarrollo importante. Esta zona, con frecuencias comprendidas entre 400 GHz y 4 THz, fue conocida como “brecha del THz” y resistió los embates de la electrónica, por el lado de las microondas, y de la óptica, por el lado del infrarrojo.

La región Terahertz o simplemente terahertz o THz es una región espectral llena de matices interesantes. THz representa una región de transición entre la electrónica y la óptica o fotónica donde, la falta de fuentes compactas, confiables y accesibles, presenta un obstáculo importante. Se destaca también que los instrumentos de medición resultan escasos y caros. Respecto a los aspectos tecnológicos, THz corresponde a la transición entre el mecanizado tradicional y la litografía. Desde el punto de vista de la espectroscopía, la propagación en la atmósfera terrestre es muy limitada, ya que está dominada por la absorción de los modos rotacionales y vibracionales de las moléculas presentes en la Tierra. Sin embargo, a la temperatura del universo, la radiación más frecuente es la de THz.

Es sólo en estos días que la brecha se derrumba y que esta región espectral comienza a llamarse “puente de THz”. La electrónica, si bien no puede todavía manejar directamente estas frecuencias tan altas, conoce como utilizar procesos no lineales de mezclado con otras frecuencias para generar señales medibles. Un mezclador superconductor-aislador-superconductor o S-I-S, operando a las temperaturas extremadamente bajas del helio líquido, ha mostrado ser capaz de manejar señales astronómicas hasta frecuencias de 1 THz, en los radiotelescopios terrestres.²

Por otro lado, la óptica realiza también contribuciones importantes. Distintos tipos de láseres, entre los que destacan los de cascada cuántica,³ los gaseosos bombeados ópticamente o los de electrones libres han resultado importantes para comenzar a explorar la región THz, pero tienen limitaciones severas. Requieren criogenia, son voluminosos o caros y

complejos. El uso de pulsos ultracortos de luz con duración por debajo del ps, como los obtenidos con láseres de modos acoplados, muestra de una manera extremadamente simple, la forma de generar radiación en la región del THz, aunque sea de manera pulsada.^{4,5} Las aplicaciones, actuales y futuras, de THz son enormes. La instrumentación analítica-farmacéutica está incorporando velozmente los espectrómetros de THz capaces de complementar la información infrarroja y/o Raman con la que caracterizan sus productos.⁶ THz ha mostrado ser extremadamente útil para identificar polimorfos, compuestos químicamente idénticos pero con hábitos de cristalización diferentes, lo que les confiere propiedades terapéuticas únicas.⁷ Los experimentos espaciales que están estudiando la radiación de fondo cósmico utilizan la banda THz movidos por la baja temperatura del universo.⁸⁻¹⁰ Cuando se diseñó el complejo de radiotelescopios ALMA para ser instalado en el norte de Chile, se lo hizo para operar entre 30 GHz y 300 GHz, de ahí su nombre de Atacama Large Millimeter Array.¹¹ Una vez que los primeros prototipos estuvieron en funcionamiento, se vio que la atmósfera del lugar, con una humedad mínima, tenía una transparencia capaz de soportar exploraciones hasta 1 THz. Un grupo japonés construyó detectores S-I-S de nitruro de niobio capaces de operar en esta frecuencia, con los cuales hoy día, ALMA opera con ondas submilimétricas.¹² Sin cambiar el acrónimo, ALMA hoy es Atacama Large Millimeter/submillimeter Array.

Las imágenes obtenidas con THz aparecen como una alternativa al controversial uso de los rayos X o de las ondas milimétricas en los exámenes de los pasajeros en los aeropuertos.¹³ Otras aplicaciones todavía en etapas tempranas de estudio y desarrollo incluyen, imágenes médicas o biológicas, enlaces inalámbricos de alta velocidad, radar de alta resolución en corto alcance, comunicaciones de alta capacidad entre satélites, monitoreo del ambiente, comunicaciones militares en campos de batalla y sistemas de vigilancia y seguridad. Estas aplicaciones dependen del desarrollo de fuentes de generación y de detectores compactos, económicos, robustos y livianos.

II. ANTENAS FOTOCONDUCTORAS

II.1. Antenas emisoras.

El funcionamiento de una antena emisora fotoconductoras recuerda en un todo el experimento de Hertz de 1897 donde el aire se reemplaza por un material semiconductor.

Pulsos ópticos de femtosegundos, con fotones de energía mayor que el gap del semiconductor, generan pares de electrones libres y huecos en la zona entre los electrodos. El campo de polarización estático acelera los portadores mientras que la densidad de carga disminuye principalmente por la captura de los mismos en los defectos del cristal. La aceleración y la disminución de la densidad de portadores libres es la fuente de los pulsos de radiación electromagnética de duración

inferior al picosegundo. La fuente de radiación de una antena fotoconductor puede ser modelada como un dipolo hertziano cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de la radiación emitida (1 THz corresponde a $300 \mu\text{m}$).¹⁴

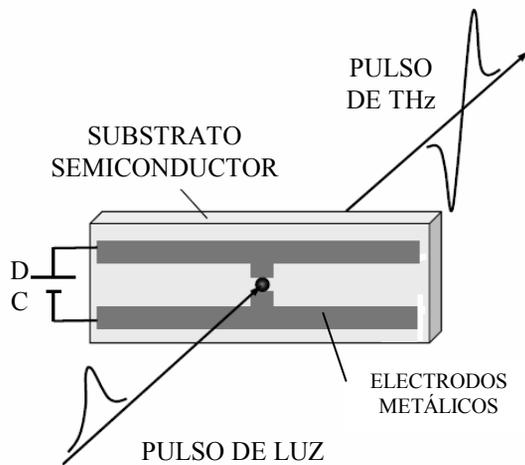


Figura 1. Esquema de una antena fotoconductor excitada por un pulso ultracorto de luz.

Los materiales más utilizados para los emisores de THz son el silicio oxidado y dañado con radiación y el GaAs crecido epitaxialmente a baja temperatura (LT-GaAs). Para este último, que es el empleado en este trabajo, el menor tiempo de vida de aproximadamente 0.2 ps se alcanza para temperaturas de crecimiento de 200 °C.

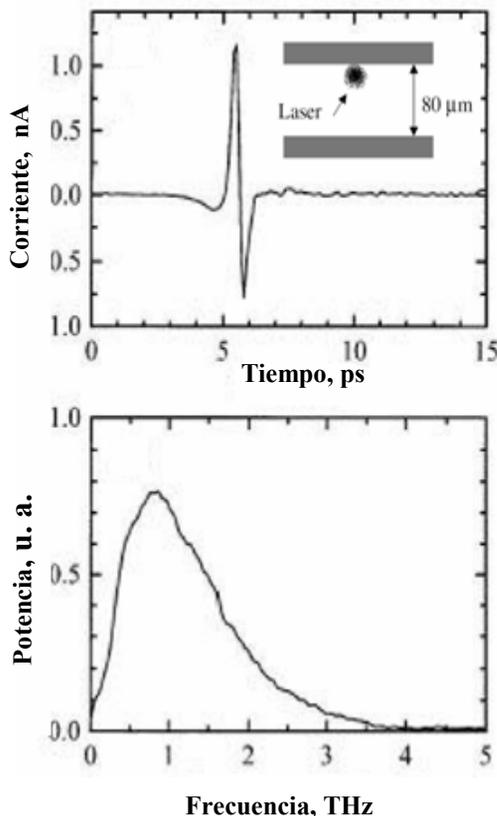


Figura 2. Resultados obtenidos con una antena fotoconductor de GaAs excitada por pulsos de 100 fs.¹⁵

Ya que la movilidad de los huecos en LT-GaAs es un orden de magnitud inferior a la movilidad de los electrones, el transporte de carga en el rango de frecuencias de THz es realizado exclusivamente por electrones. La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos por M. Tani et al.¹⁵, para la señal temporal y el espectro de la potencia emitida por una antena fotoconductor de las dimensiones indicadas. El pulso luminoso, de 100 fs, 800 nm, enfocado hasta un diámetro de $20 \mu\text{m}$, corresponde a la emisión de un láser de Ti:zafiro comercial.

II.2. Antenas detectoras

Básicamente, una antena detectora se compone de dos conductores metálicos separados por un material fotoconductor. Cuando la antena es iluminada por un pulso láser que genera portadores en el semiconductor y simultáneamente se aplica sobre los electrodos el campo eléctrico de un pulso de THz, aparece una corriente entre los cables de la antena que es proporcional al campo de THz aplicado. La corriente a través de la antena se mide con un amplificador lock-in. En realidad, la forma de onda medida es una convolución de la envolvente del impulso láser, la respuesta de la antena y el pulso de THz. Por lo tanto, al igual que en las antenas emisoras, es necesario el uso de materiales fotoconductores con portadores de tiempos de vida muy cortos. Además, el ancho de banda de detección de una antena dipolar está determinada por su tamaño. Más largo el dipolo, más eficiente resulta la antena en las frecuencias bajas.

El esquema básico de una antena detectora es entonces totalmente análogo al de una antena emisora, salvo que el campo de polarización es reemplazado por el instrumento de medición de corriente.

Un retraso variable entre los pulsos de THz y los pulsos láser permite registrar la evolución temporal de los THz. Una forma conveniente de realizar esto en la práctica, es utilizar una parte de los pulsos de luz que se han empleado para generar los THz. La disposición experimental adopta la forma de un interferómetro de Michelson, con una rama variable sobre algunos mm lo que permite retrasos de una decena de ps. ser extendido a las dos columnas.

III. REALIZACIÓN EXPERIMENTAL

La disposición que opera actualmente en el CIOp está basada en dos antenas fabricadas por la empresa lituana Ekspla.¹⁶ Una lente de silicio de alta resistencia está unida a la parte de atrás de cada antena para una colimación eficiente de la radiación THz emitida y para la concentración de la radiación THz sobre la antena detectora.

El 50 % de la emisión de un láser de modos acoplados de titanio:zafiro (Mai Tai, Spectra Physics) con pulsos de 100 fs de duración y 5 nJ por pulso, se expande en un telescopio galileano invertido hasta un diámetro de haz de 3 mm y se atenúa convenientemente con una combinación de lámina de media onda y polarizador Glann-Thompson. El haz así obtenido entra

al interferómetro de la Fig. 3. Las lentes de enfoque sobre las antenas son plano convexas de 25 mm de diámetro y tienen una distancia focal de 50 mm. La potencia media sobre las antenas fue 30 mW y la duración de los pulsos no mostró ninguna alteración de la situación a la salida del láser (100 fs). La línea de retardo óptica motorizada permite registrar en el tiempo el pulso de THz. Un amplificador lock-in Stanford Research Instruments modelo SR-830 realiza las medidas de la señal de salida del detector de THz. El lock-in fue utilizado, sin preamplificador, en el modo corriente. La tensión aplicada en el generador se obtuvo amplificando la señal TTL de referencia del lock-in. Se utilizó una tensión de 30 V a una frecuencia de 30 kHz. A través de una computadora personal se realizó el control del movimiento de la línea de retardo óptica. La señal se registró en un osciloscopio digital y luego fue transferida a la PC.

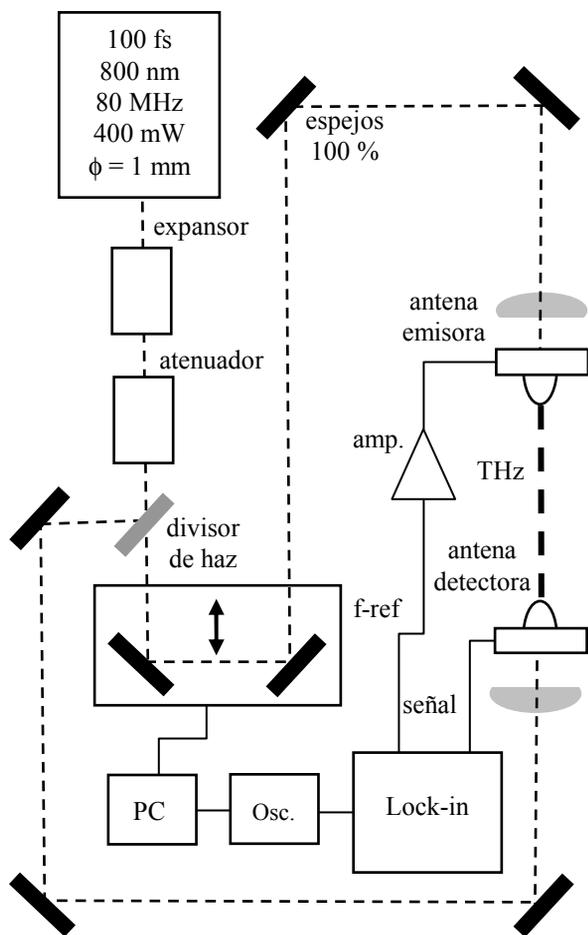


Fig. 3. Disposición experimental

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El ajuste del dispositivo experimental exige la correcta alineación de los haces ópticos sobre la zona entre los electrodos de cada antena y el mejor enfoque con el fin de disminuir al mínimo el tamaño de la zona iluminada. Para ello resultó importante expandir el haz hasta un diámetro de 3 mm a la entrada del interferómetro y el empleo de monturas especiales para

las lentes de enfoque. El control de estos procedimientos se realizó observando las antenas con cámaras CMOS provistas de lentes de distancia focal corta. Otra medida que resultó de suma utilidad durante el procedimiento de ajuste, fue el seguimiento de la resistencia de las antenas. Cuanto menor es la resistencia, mejor es la iluminación de la antena.

El trasladador de la línea de retardo opera con un tornillo de 10 vueltas por pulgada y el motor paso a paso que lo controla está equipado con un encoder incremental de cuadratura de 4000 pasos por vuelta. La velocidad de avance del trasladador fue 95 pasos por segundo. En cada registro de 100 s se adquirieron 3000 muestras en el osciloscopio. Dado que el movimiento del trasladador duplica el retardo óptico en la antena, resulta un tiempo entre muestras de 13,405 fs y una señal total de 40,216 ps.

La Fig. 4 muestra el primer pulso de THz registrado en este sistema. La constante de tiempo utilizada en el lock-in fue 300 ms.

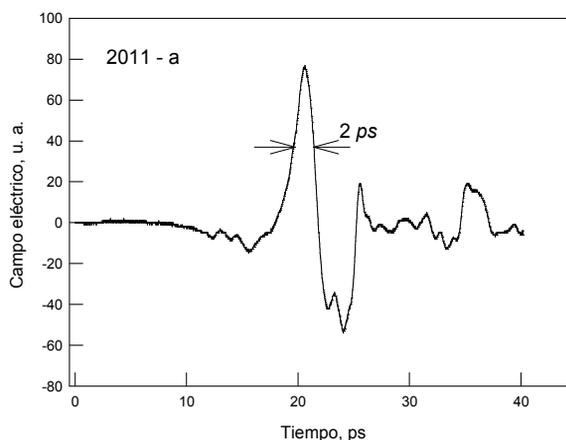


Fig. 4. Campo eléctrico de la radiación emitida.

El módulo al cuadrado de la transformada de Fourier del campo eléctrico brinda el espectro de potencia de la radiación emitida. Suponiendo una fase constante, el cálculo mediante la transformada rápida de Fourier, es inmediato y se muestra en la Fig. 5, tanto en escala lineal como logarítmica.

V. CONCLUSIONES

Se ha mostrado la operación de un sistema de generación y medición de radiación con frecuencia de THz que opera con antenas fotoconductoras excitadas con pulsos ultracortos de luz provenientes de un láser de modos acoplados de titanio - zafiro. En esta primera operación, las características del funcionamiento quedaron por debajo de las predicciones teóricas resultantes de las propiedades del material empleado en las antenas, como de sus dimensiones. En particular, el ancho de banda registrado resulta casi un orden de magnitud inferior al de la Fig. 2. No puede decirse si el problema se origina en el funcionamiento de la antena emisora, o en el de la antena detectora o de ambas. Lo más probable es que la principal limitación provenga de la antena emisora ya que se ha mencionado la fuerte

influencia de la iluminación sobre su respuesta. En efecto, se ha mostrado que el emisor puede ser modelado con dos diodos de barrera Schottky opuestos y la presencia de dicha estructura se manifiesta en una

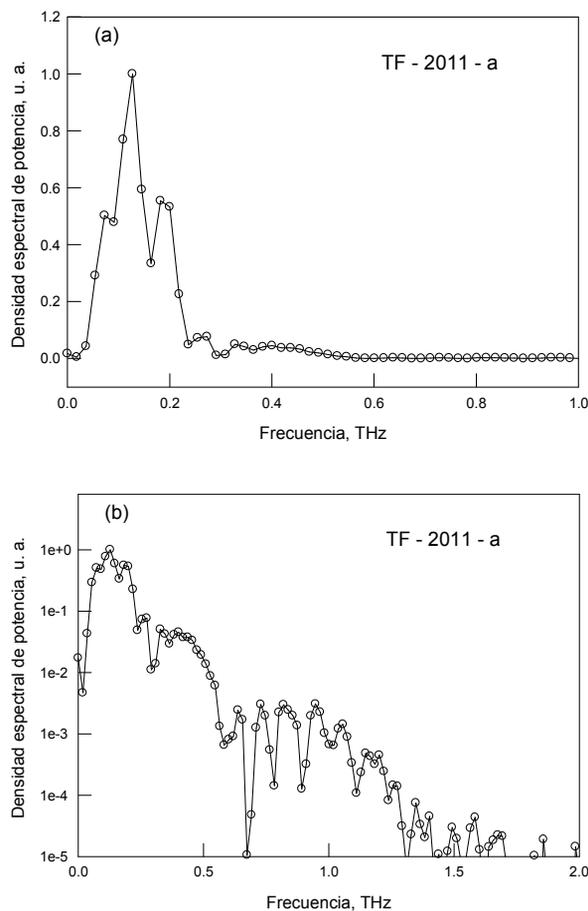


Fig. 5. Espectro de potencia obtenida por FFT de la señal registrada. (a) Escala lineal. (b) Escala logarítmica.

fuerte dependencia de la fotocorriente. En consecuencia, la amplitud del campo radiado depende de la posición del láser respecto a los electrodos y a su polaridad. Cuando el lugar está más cerca del electrodo negativo, la fotocorriente es alta y los portadores fotogenerados toman parte activa en el proceso de radiación. Sin embargo, cuando la mancha se desplaza hacia el electrodo positivo, la fotocorriente es severamente atenuada por la polarización inversa de la juntura metal-semiconductor.¹⁷ Si bien este hecho se ha relacionado solamente con la eficiencia de la antena, no debe descartarse su influencia sobre el espectro de la emisión. La antena detectora no parece limitar el ancho de banda del registro. Este hecho será probado con otro sistema de emisión de banda ancha a partir de un plasma en aire foto-inducido por pulsos ópticos de femtosegundos, donde se produce la superposición no lineal de 4 ondas con frecuencia fundamental y primer armónico.¹⁸

En un próximo paso el sistema será empleado para obtener espectros de transmisión en la región THz, mediante la técnica de la espectroscopía de transmisión

en el dominio del tiempo (TDS).¹⁹ La idea básica de la TDS se puede describir de la siguiente manera: un pulso de sub-picosegundo de radiación electromagnética pasa a través de una muestra y se registra su perfil temporal para compararlo con un pulso de referencia. Este último puede ser un pulso que se propagan libremente o un pulso transmitido a través de un medio con propiedades conocidas. A través de un análisis de los cambios en el espectro de Fourier que se introducen por la muestra, se obtiene el espectro complejo del índice de refracción de la misma.

Referencias

- 1- D. T. Emerson, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 45, 2267-2273 (1997).
- 2- M. Bin, M. C. Gaidis, J. Zmuidzinis, T. G. Phillips, and H. G. LeDuc, Low noise 1 THz niobium superconducting tunnel junction mixer with normal metal tuning circuit, Appl. Phys. Lett. **68**, pp. 1714-1716 (1996).
- 3- Y. Chassagneux, R. Colombelli, W. Maineult, S. Barbieri, H. E. Beere, D. A. Ritchie, S. P. Khanna, E. H. Linfield, A. G. Davies. Nature 457, 174 (2009).
- 4- X. C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow, D. H. Auston, Applied Physics Letters 56, 1011-1013 (1990).
- 5- C. W. Siders, J. L. W. Siders, A. J. Taylor, S. G. Park, M. R. Melloch, A. M. Weiner, Optics Letters 24, 241 (1999).
- 6- P.F. Taday, I.V. Bradley, D.D. arnone, M. pepper, Using Terahertz Pulse Spectroscopy to Study the Crystalline Structure of a Drug: A Case Study of the Polymorphs of Ranitidine Hydrochloride, TeraView Limited, 302/304 (2002).
- 7-Smith, Paul. Innovations in Pharmaceutical Technology, 16, 71-76 (2005).
- 8- SWAS: Submillimeter Wave Astronomy Satellite. <http://science.nasa.gov/missions/swas/>
- 9-Herschel Space Observatory. <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=34682>
- 10-The Planck Space Telescope: Surveying the Sky. <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/planck/default.asp>
- 11-Atacama Large Millimeter Array (ALMA). <http://www.almaobservatory.org/es>
- 12-ALMA band 10 receiver. <http://www.almaobservatory.org/en/announcements-events/281>
- 13-May, T., Meyer, H. G., and Popp, J. SPIE Professional, July (2010).
- 14- Yun-Shik Lee, Principles of Terahertz Science and Technology. Springer Science + Business Media, LLC (2009).
- 15- M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima. Applied Optics 36, 7853 (1997) cited by Yun-Shik Lee,

Principles of Terahertz Science and Technology.
Springer Science + Business Media, LLC (2009).

16-www.ekspla.com

17-Maxim A. Khazan, Time-Domain Terahertz Spectroscopy and its Application to the Study Of High-Tc Superconductor Thin Films. Dissertation zur Erlangung des doktorgrades des Fachbereichs Physik der Universitat Hamburg(2002).

18- H. G. Roskos, M. D. Thomson, M. Kreb, T. Loffler, Laser & Photonics Review, 1, 349-368,(2007).

19-C. A. Sshmuttenmaer, Chemical Reviews 104, 17759-1779(2004).