



## SISTEMA DE MICROSCOPIA DE ALTA RESOLUCIÓN BASADO EN EL EFECTO DE CAMPO CERCANO (SNOM)

M.C. Juan Almendárez Rodríguez, Dr. Luis Felipe Lastras Martínez

<sup>a</sup>Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, San Luis Potosí, S.L.P., adamfinix@live.com.mx, lflm@cactus.iico.uaslp.mx

### RESUMEN

El Presente trabajo se trata del desarrollo, implementación y puesta en marcha de un sistema de microscopia de alta resolución basado en el efecto de campo cercano, en el cual se realiza una combinación de la interacción de los mecanismos de la microscopia óptica y la alta resolución de la microscopia de sonda, realizado en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, con el cual se realizaran mediciones a muestras de semiconductores a nivel nanométrico, para su estudio y comprensión de efectos que estas puedan presentar.

### 1. INTRODUCCIÓN

La tendencia a la miniaturización de sistemas y componentes, electrónicos, mecánicos, ópticos, obleas de semiconductores, etc., nos lleva a la búsqueda de nuevas técnicas de visualización y reconstrucción de imágenes, más allá del alcance de nuestra vista y del microscopio común. En un principio para poder observar objetos que son demasiado pequeños para observar a simple vista se empleó el microscopio, el cual se trata de un instrumento óptico que contiene dos o más lentes que permiten obtener una imagen aumentada del objeto y que funciona por refracción, lo que significa que normalmente dependen de la luz que atraviesa la muestra desde abajo hasta las lentes donde es aumentada la imagen de la muestra que se está observando, por lo tanto la resolución de los microscopios ópticos está restringida por un fenómeno llamado difracción que, dependiendo de la apertura numérica (AN o AN) del sistema óptico y la longitud de onda de la luz utilizada ( $\lambda$ ), establece un límite definido ( $\delta$ ) a la resolución óptica. Suponiendo que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución sería:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 * A_N} (1)$$

Dos clases de técnicas para mejorar esta resolución, estudiadas ampliamente son:

- Radiación con longitudes de onda menores (electrones, rayos x).
- Microscopia de sonda (de efecto de túnel, fuerza atómica).

El problema de estas técnicas es que son: destructivas, de elevado costo, muy lentas, poco fiables, la muestra se tiene que preparar y deben de realizarse al alto vacío. La respuesta a este problema puede ser la combinación de la interacción de los mecanismos de la microscopia óptica y la alta resolución de la microscopia de sonda, llegando así a la creación de la técnica del Escaneo Óptico Microscópico de Campo Cercano conocido como SNOM por sus siglas en inglés (Scanning Near-Field Optical Microscopy), la cual nos permite formar imágenes más allá del límite de difracción. La técnica de SNOM permite reconstruir imágenes con una resolución del orden de  $\lambda/60$  o mayores, dependiendo de la resolución de los sistemas mecánicos y del tamaño de las puntas que se utilicen. Con el objeto de poder estudiar muestras de dimensiones menores al límite de difracción utilizando luz láser, se ha implementado un microscopio de campo cercano (SNOM).



En un sistema SNOM la luz es dirigida a la superficie de la muestra bajo estudio por medio de una fibra óptica cuya punta ha sido adelgazada en el límite de nanómetros. Esta punta se acerca algunos nanómetros a la superficie del sistema bajo estudio por medio de un piezo-eléctrico. La luz reflejada es capturada nuevamente por la fibra y colectada por un fotomultiplicador para su análisis. El sistema bajo estudio se monta sobre una plataforma piezo-eléctrica XYZ de resolución de nanométrica. De esta forma se hace un barrido XY y se reconstruye la imagen. Nuestro sistema permite el uso de luz polarizada para lograr un mayor contraste que los sistemas SNOM convencionales.

## 2. TEORÍA

En la técnica de Escaneo Óptico Microscópico de Campo Cercano (SNOM) se colecta la luz a través de una pequeña apertura de la punta de una fibra óptica estrechada (Taper), la cual es escaneada sobre la muestra, la luz es conducida desde la muestra a través de la fibra hasta el detector (Fototubo), donde este envía una señal hacia la computadora para su interpretación y posterior reconstrucción de la muestra.

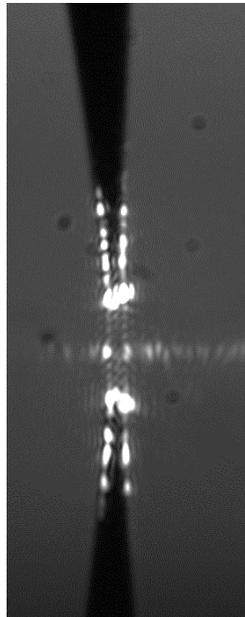


Figura 1. Punta de fibra óptica utilizada para colectar la luz.

Para la realización del escaneo es necesario contar con un sistema de posicionamiento de la muestra, que cuente con tres grados de libertad, los cuales sean lo más estables posibles durante el desplazamiento, ya que la punta de la fibra óptica debe permanecer a una altura constante para no alterar las mediciones. La altura existente entre la punta de la fibra y la muestra debe de ser de algunos pocos nanómetros, lo cual dará como resultado una mejor resolución en la medición y reconstrucción de la muestra.

La señal es recogida solo de una pequeña parte de la muestra, aproximadamente del tamaño de la apertura de la punta de la fibra óptica estrechada; la resolución del sistema no está limitada por el fenómeno de difracción, este depende del tamaño de la apertura de la fibra.



La luz láser de una longitud adecuada es acoplada en una fibra óptica a la cual se le ha fabricado una punta en uno de los extremos, el control de la polarización y del filtrado es necesario antes de acoplar la luz láser a la fibra. La punta debe montarse sobre un soporte mecánico ya que a menudo es necesario alinear la fibra sobre el eje óptico de la muestra.

Para explotar completamente la técnica de SNOM son necesarios básicamente tres requerimientos:

- ❖ Una apertura óptica muy pequeña (en este caso se estrechaba fibra óptica para obtener una apertura muy pequeña y poder conducir la señal), la cual parcialmente define la resolución óptica del sistema SNOM
- ❖ Una manera de colocar la superficie de la muestra a una distancia menor a 100nm de altura de la punta de la fibra óptica estrechada, la cual debe permanecer constante.
- ❖ Una forma de reconstruir la muestra que se está midiendo mediante la punta, en este caso se realizara la reconstrucción de la imagen mediante la señal recogida por la fibra, la cual se procesara mediante un equipo de cómputo para reconstruir la imagen de la muestra obtenida.

A continuación la siguiente figura muestra una configuración básica en la aplicación de SNOM, incluyendo algunos de sus componentes básicos.

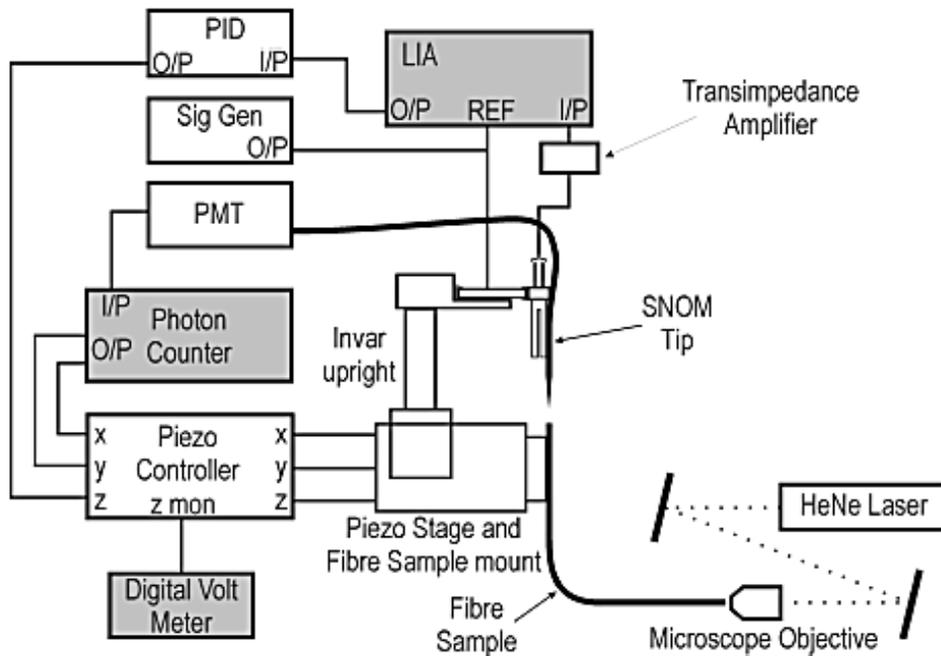


Figura 2. Configuración básica de un SNOM.

Las fuerzas electrostáticas existentes en los materiales nos permiten mantener la punta de fibra óptica a unos cuantos nanómetros de entrar en contacto directo con esta, ya que si la punta de fibra óptica se va acercando y esta se encuentra vibrando de manera constante, se podrá detectar el cambio en la vibración cuando la punta se encuentre a unos cuantos nanómetros de entrar en contacto con la muestra (figura 3).



Por lo que la punta de fibra óptica se pondrá a vibrar a una cierta frecuencia, mientras esta se acerca a nanómetros de la muestra, donde las fuerzas estáticas presentes en la muestra, harán que la frecuencia de vibración de la punta de fibra óptica cambie, este cambio podrá verse reflejado inmediatamente y por lo tanto así evitar que estas dos entren en contacto, así evitando dañar la muestra.

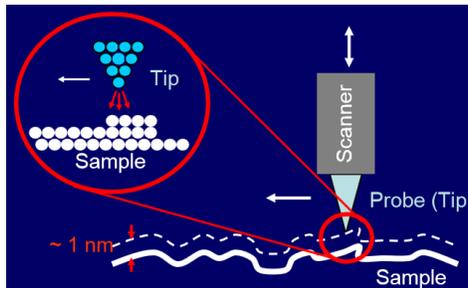


Figura 3. Fuerzas electrostáticas presentes.

Para realizar este desarrollo se requiere hacer vibrar la punta de fibra óptica adelgazada mediante algún medio, detectar el cambio en la vibración de esta antes de que se encuentre en contacto con la muestra, desarrollar puntas de fibra óptica con un diámetro menor a una micra, realizar la caracterización de estas mediante un instrumento que así nos lo permita, implementar el sistema automático que controle todos los mecanismos y además nos permita realizar la reconstrucción de la imagen en tiempo real y probar el sistema desarrollado buscando resoluciones ópticas menores a las ya obtenidas.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

Para hacer vibrar la fibra óptica se desarrolló un instrumento virtual, mediante el cual se envía una señal cuadrada, con una frecuencia y una amplitud variable, de acuerdo a la necesidad que se tenga, esta es enviada a una fuente DC-DC, con la finalidad de que el voltaje sea amplificado y este enviado aun cristal piezoeléctrico, que tiene la forma de un cubo y el cual mide 2 mm de arista, lo que lo hace un instrumento muy pequeño y difícil de manejar, pero adecuado para hacer que la punta de fibra óptica vibre.

Para hacer esto posible, se llevó a cabo una nueva implementación óptica, la cual se muestra a continuación (figura 4), en esta implementación se tuvieron que realizar modificaciones a mecanismos ya existentes, para hacerse compatibles con los nuevos a implementar, ya que el sistema óptico es importante para la resolución del sistema, los mecanismos fueron fabricados con la mayor exactitud posible.

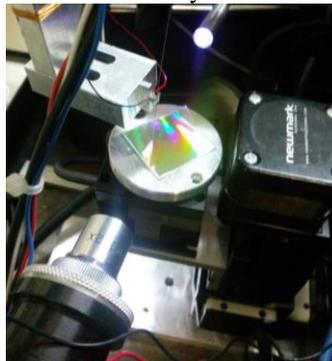


Figura 4. Implementación óptica.



Para la detección del cambio en la vibración de la punta de fibra óptica, se hace incidir un haz laser sobre esta, el cual genera un patrón de líneas de incidencia como el mostrado en la figura 5, este patrón es aprovechado y enviado a un fotodetector, el cual se encarga de convertir la señal de luz, en una señal eléctrica, la cual a su vez es enviada a una tarjeta de adquisición de datos, para ser interpretada en el instrumento virtual desarrollado, de tal forma que se pueda saber el valor de la frecuencia de vibración de la fibra, y poder ser así comparado con el valor de la frecuencia de vibración generado.

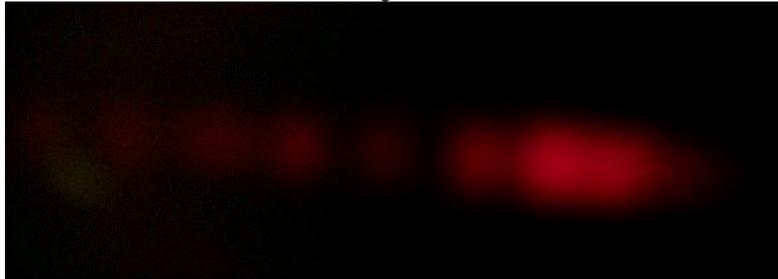


Figura 5. Patrón de difracción generado.

El patrón generado debe ser lo más claro posible, mostrando una buena separación entre líneas, para que solo una de ellas incida sobre el fotodetector, ya que en caso de incidir más de una se estará duplicando la frecuencia, a la cual la punta está vibrando generando así una medición errónea.

Al instrumento virtual dedicado a la generación de la señal de control del piezoeléctrico se le agrego la parte de detección de vibración de la punta de fibra óptica, mediante una tarjeta de adquisición de datos DAQ6009 de la empresa National Instruments, con la finalidad de detectar en que momento, la punta se encuentra a unos cuantos nanómetros de altura de la muestra, a este instrumento virtual se le dio la forma completa para convertirse en un sub-VI, es decir se le desarrollo un icono, al cual se le asignaron entradas y salidas, con lo cual se puede incluir este con los otros instrumentos virtuales desarrollados.

Como se puede observar en la figura 6 la señal generada (señal cuadrada color rojo), que es enviada a la fuente DC-DC para el control del cristal piezoeléctrico se encuentra en fase con la señal recibida por el fotodetector (señal triangular color blanco), esto se logra acercando o alejando el mismo del punto donde se genera la vibración de la punta de fibra óptica (Figura 6), el que se encuentren estas dos señales en fase benefician a que la comparación de frecuencias sea más exacta, además esta separación nos permite tener un mejor patrón de interferencia.

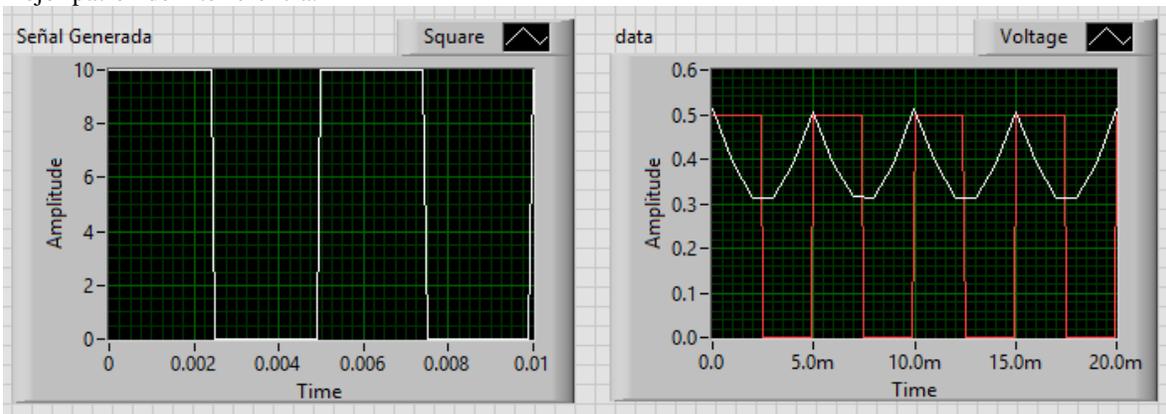


Figura 6. Señales Generadas.



Para la caracterización de estas puntas ya se contaba con un instrumento virtual, el cual controla una cámara CCD y una mesa de posicionamiento XYZ, para la focalización de las puntas a medir, además nos indica que diámetro tienen estas mediante el procesamiento de imagen a continuación se muestra la caratula del instrumento virtual desarrollado (figura 7):

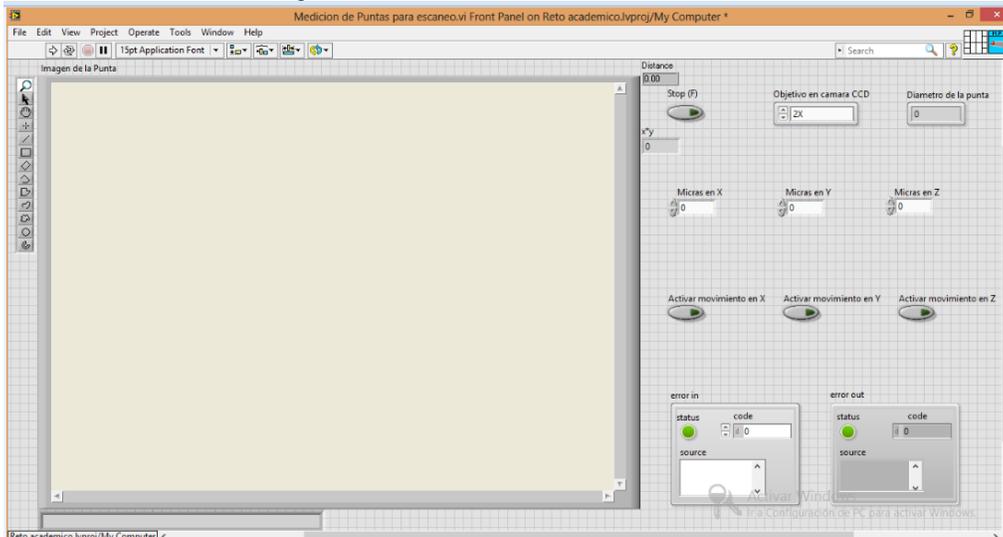


Figura 7. VI generado.

Después de haber realizado la caracterización de las puntas de fibra óptica, se procedió al desarrollo del instrumento virtual, para el control del sistema de medición, el cual cumple los siguientes puntos:

1. Generación de señal para la vibración del cristal piezoeléctrico.
2. Medición de la frecuencia a la cual está vibrando la fibra.
3. Acercamiento de la muestra a la punta en el eje Z.
4. Detección de proximidad por medio de la vibración.
5. Detener el avance en el eje Z antes de que la muestra y la punta entren en contacto.
6. Realizar las mediciones necesarias con el amplificador lock-in y el multímetro, para realizar una buena reconstrucción de la imagen.
7. Retirar la muestra de la punta hacia su posición original.
8. Moverse en el eje Y una cierta distancia.
9. Volver a repetir los pasos anteriores hasta realizar, la reconstrucción del área deseada.

Este instrumento virtual desarrollado, el cual cuenta internamente con varios de los instrumentos antes mencionados, ya que este es un instrumento de aplicación, y por lo tanto es de los más importantes para el desarrollo que se está llevando a cabo, en la figura 8 se puede observar su panel de control.

El panel frontal se puede observar que es relativamente sencillo y no cuenta con muchos botones o indicadores, esto se realizó con la intención de hacer una interfaz agradable para el usuario y sin tantas complicaciones.

El instrumento fue modificado para trabajar como microscopio de fuerza atómica AFM, además de SNOM, ya que es necesario posicionar la punta de fibra óptica a unos cuantos nanómetros de la muestra, sin que ambas entren en contacto, con el cual se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la figuras 9 y 10.

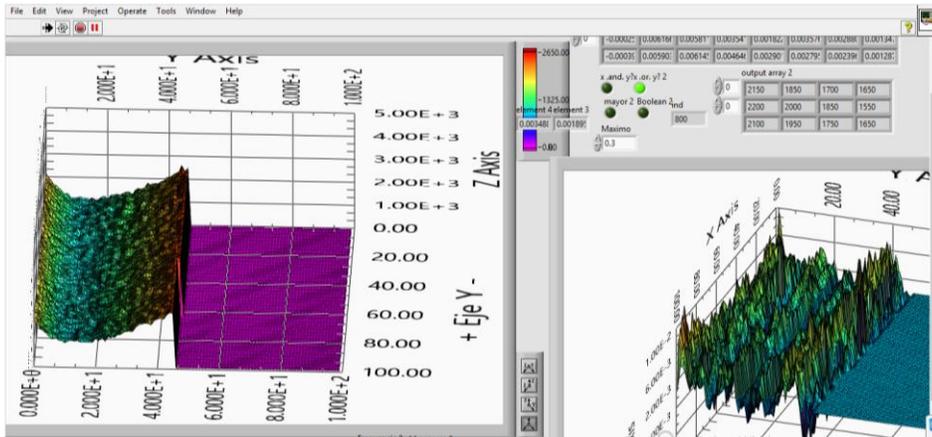


Figura 8. Panel Frontal del VI desarrollado.

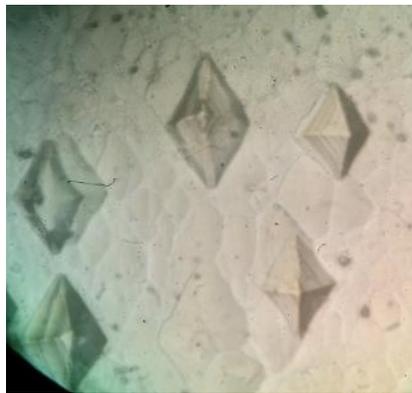


Figura 9. Pits de GaAS observados por microscopio óptico.

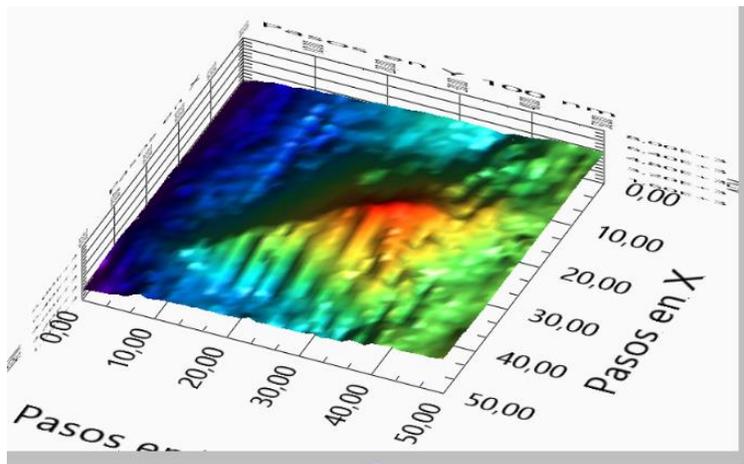


Figura 10. Imagen generada por la medición realizada.



#### 4. CONCLUSIONES

Mediante la técnica de SNOM, pueden obtenerse resoluciones mayores a la de los microscopios ópticos, sin dañar la muestra, pues esta nunca entra en contacto con la punta.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. [http://img.alibaba.com/photo/112154046/Keithley\\_2700\\_DMM\\_Meters.jpg&imgrefurl=http://spanish.alibaba.com/product-tp/keithley-2700-dmm-meters-112154046.html&h=405&w=790&sz=54&tbnid=Dw2QNbh6JVIDEM:&tbnh=62&tbnw=121&zoom=1&usg=\\_\\_boy-vjFbx0UX9\\_qMhxMXgHhnnVQ=&docid=2LvTu667hiQinM&itg=1&hl=es&sa=X&ei=tq1UfTpAua50AHEu4DoBg&ved=0CIUBEPUBMAk](http://img.alibaba.com/photo/112154046/Keithley_2700_DMM_Meters.jpg&imgrefurl=http://spanish.alibaba.com/product-tp/keithley-2700-dmm-meters-112154046.html&h=405&w=790&sz=54&tbnid=Dw2QNbh6JVIDEM:&tbnh=62&tbnw=121&zoom=1&usg=__boy-vjFbx0UX9_qMhxMXgHhnnVQ=&docid=2LvTu667hiQinM&itg=1&hl=es&sa=X&ei=tq1UfTpAua50AHEu4DoBg&ved=0CIUBEPUBMAk)
2. <http://www.hindsinstruments.com/products/photoelastic-modulators/pem-100-controller/>
3. [https://www.google.com.mx/search?hl=es&q=amplificador+lock+in+sr530&bav=on.2,or.r\\_cp.r\\_qf.&bvm=bv.45512109,d.dmQ&biw=1366&bih=673&um=1&ie=UTF-8&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=ZrN1UarNDYjN0AHcnIEI#imgrc=njWn9PECrDRI9M%3A%3BRcclXP26bq7fjM%3Bhttp%253A%252F%252Fimg.directindustry.es%252Fimages\\_di%252Fphoto-g%252Famplificador-sincrono-bifasico-lock-in-7218-3183597.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.directindustry.es%252Fprod%252Fstanford-research-systems%252Famplificadores-sincronos-bifasicos-lock-in-7218-984947.html%3B1929%3B843](https://www.google.com.mx/search?hl=es&q=amplificador+lock+in+sr530&bav=on.2,or.r_cp.r_qf.&bvm=bv.45512109,d.dmQ&biw=1366&bih=673&um=1&ie=UTF-8&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=ZrN1UarNDYjN0AHcnIEI#imgrc=njWn9PECrDRI9M%3A%3BRcclXP26bq7fjM%3Bhttp%253A%252F%252Fimg.directindustry.es%252Fimages_di%252Fphoto-g%252Famplificador-sincrono-bifasico-lock-in-7218-3183597.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.directindustry.es%252Fprod%252Fstanford-research-systems%252Famplificadores-sincronos-bifasicos-lock-in-7218-984947.html%3B1929%3B843)
4. [http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0C8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fcursos.eie.ucr.ac.cr%2Fclaroline%2Fbackends%2Fdownload.php%3Furl%3DLzltVGFwZXJzLnBkZg%253D%253D%26cidReset%3Dtrue%26cidReq%3DADIEZ&ei=ibd1UdjbGPGK0QGQ6oDwCw&usg=AFQjCNFKerZTfp8bW4v-2p4t4x\\_k39Vzrw&sig2=S23VI\\_MXK\\_R3](http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=1&ved=0C8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fcursos.eie.ucr.ac.cr%2Fclaroline%2Fbackends%2Fdownload.php%3Furl%3DLzltVGFwZXJzLnBkZg%253D%253D%26cidReset%3Dtrue%26cidReq%3DADIEZ&ei=ibd1UdjbGPGK0QGQ6oDwCw&usg=AFQjCNFKerZTfp8bW4v-2p4t4x_k39Vzrw&sig2=S23VI_MXK_R3)