

Capítulo 2

Equipo de medida de transmisión óptica a altas temperaturas.

Este capítulo trata de los fundamentos físicos que explican el funcionamiento de los equipos que realizan medidas de transmisión óptica. Se hace un repaso de los autores que emplearon equipos de medida de transmisión óptica detallando: Equipo empleado de medida (transmisión o reflexión), rango, temperatura, material utilizado y resultado obtenido. También se detalla el equipo construido en esta tesis, sus componentes y la puesta a punto.

2.1. Estado del arte

2.1.1. Fundamentos físicos del equipo de transmisión óptica.

El fundamento físico que explica el funcionamiento del equipo de medida óptica está basado en los conceptos de transmisión, reflexión y absorción. Considérese una trayectoria cualquiera de un haz de luz con una intensidad (I_o). Si la trayectoria estuviese libre de obstrucciones, ésta podría seguir su recorrido sin perturbación alguna, por lo tanto su intensidad sería la misma. Si un haz de luz incide sobre un obstáculo en el transcurso de su recorrido, sufrirá una disminución de la intensidad inicial (I_o) convirtiéndose en una intensidad transmitida (I_T). Una parte de esta intensidad incidente será reflejada (I_R) y otra parte será absorbida (I_A). En la figura 1 se muestra el esquema del proceso que define la transmisión y se puede ver que se cumple la relación de: Intensidad incidente será igual a la suma de las otras intensidades [8].

$$I_o = I_R + I_A + I_T \quad (1)$$

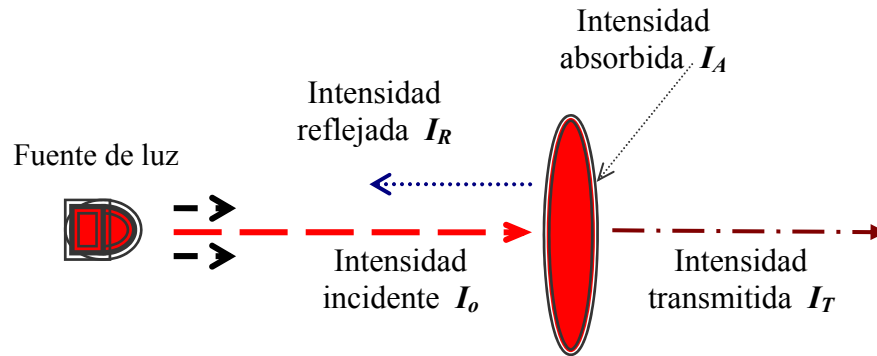


Figura 1. Esquema de la definición de la transmisión usando el concepto de intensidad incidente (I_o), reflejada (I_R), absorbida (I_A) y transmitida (I_T).

Mediante la relación expresada en la ecuación (1) se puede definir la transmisión, reflexión y la absorción. La transmisión (T_T) caracteriza la parte del haz incidente que emerge por la cara posterior. Se puede definir como la razón entre la intensidad resultante (I_T) y la intensidad incidente (I_o) [8].

$$T_T = \frac{I_T}{I_o} \quad (2)$$

La reflexión (R_T), análogamente R_T es la parte de la señal que se refleja en dirección de la fuente (en incidencia normal) y se define como el cociente entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente [9] [10].

$$R_T = \frac{I_R}{I_o} \quad (3)$$

La absorción es la cantidad de energía que queda atrapada en el obstáculo, transformándose en energía potencial y siendo luego disipada o reemitida en forma de radiación o calor, durante el proceso de relajación. Se define como la diferencia de la intensidad incidente y la suma de las intensidades transmitidas y reflejadas.

$$A = 1 - T_T - R_T \quad (4)$$

2.1.2. Antecedentes

Además de la definición de los conceptos físicos que justifica el funcionamiento de los equipos que utilizan medidas de transmisión óptica, se hace un repaso a la bibliografía destacando los trabajos que tienen relación con esta tesis en los que se utilizan medidas de transmisión óptica en silicio cristalino o amorfo combinadas con la variación de temperatura.

En 1979 H. A. Weakliem et al. [11] presentan un trabajo sobre las propiedades ópticas del silicio en función de la temperatura. Para esto se vale de medidas de transmisión y reflexión en el rango de 458 nm y 633 nm utilizando un láser He-Ne y Ar y calentando las muestras en el rango de 299 K y 516 K. A partir de estas medidas extraen el coeficiente de absorción.

En 1982 G. E. Jellison et al. [12] publican un trabajo en el que utilizan medidas in-situ de transmisión óptica a elevadas temperaturas ($< 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) en obleas de silicio cristalino utilizando láser de HeNe con una longitud de onda de $1,152\text{ }\mu\text{m}$ de 2 mW acoplado a una señal de 2 kHz .

En 1987 H. J. Eichler et al. [13] publican un trabajo en el que utilizan longitudes de onda del infrarrojo cercano ($1,06$ y $1,3\text{ }\mu\text{m}$) para excitar las cargas libres en el silicio cristalino utilizando un láser (Nd: YAG) acoplado a un amplificador que modifica la señal con pulsos entre 10 y 20 ns para excitar las cargas.

En 1990 J. C. Sturm et al. [14] reportan la aplicación de una técnica en el que se mide la absorción en obleas de silicio cristalino en el rango de temperatura de 500 a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ empleando dos longitudes de onda ($1,3\text{ }\mu\text{m}$ y $1,55\text{ }\mu\text{m}$) acoplados a un amplificador lock-in para eliminar las interferencias emitidas por el horno.

En 1990 J. Nulman et al. [15] publican un trabajo en el que se estudia la emisión térmica del silicio cristalino calentándola en un horno convencional en el rango de 200 a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Utilizando un pirómetro para medir la emisión de señal.

En 1992 J. M. Essick et al. [16] publican un trabajo en el que utilizan medidas de transmisión óptica con un monocromador en rango de 300 a 1000 nm a temperatura ambiente para caracterizar el gap en el silicio cristalino y en el arseniuro de galio.

En 1992 P. Vandenabeele et al. [17] publican un trabajo sobre la influencia de la temperatura en la emisión térmica de obleas de c-Si. Utilizan un equipo que calienta la oblea mediante contactos en el rango de 300 a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para medir in-

situ la emisión térmica en el rango de 1,7 y 3,4 μm de la oblea emplea un pirómetro.

En 1996 R. B. Bergmann et al. [18] publican un trabajo en el que utiliza medidas in-situ de transmisión óptica empleando un láser de 670 nm de longitud de onda a una temperatura de 600 °C para medir la fase de cristalización de las capas de carbono de silicio amorfo.

En 1996 H. Rogne et al. [19] publican un trabajo sobre la absorción del silicio cristalino a elevadas temperaturas (300 a 800 °C) con medidas en el rango de 1 μm a 1,6 μm utilizando un láser para calentar la oblea, acoplado a una monocromador que hace el barrido de las diferentes landas.

En la tabla I se presenta un resumen de los equipos utilizados en los experimentos ópticos con temperatura que sirven de antecedentes a esta tesis.

Año	Autor	Medida y material	Equipo empleado	Rango y Temperatura	Resultado
1979	H. Wealkien et al. [11]	Transmisión Reflexión c-Si	Láser He-Ne y Ar	458-633 nm 299 a 633 °K	Coefficiente de absorción
1982	G. Jellison et al. [12]	Transmisión c-Si	Láser He-Ne	1152 nm 400 a 800 °C	Coefficiente absorción
1987	H. Eichler et al. [13]	Transmisión c-Si	Nd:YAG	1,06 y 1,3 μm	Coefficiente absorción
1990	J. Sturm et al. [14]	Transmisión c-Si	Láser	1,3 y 1,55 μm 400 a 800 °C	Coefficiente de absorción y mecanismos fundamentales
1990	J. Nulman et al. [15]	Emisión térmica c-Si	Pirómetro	200 a 1000 °C	Emisión
1992	J. Essick et al. [16]	Transmisión c-Si y GaAs	Espectrómetro	300 a 1000 nm	Absorción
1992	P. Vandenabeele et al. [17]	Emisión térmica c-Si	Pirómetro	1,7 y 3,4 μm 300 a 700 °C	Emisión
1996	R. Bergmann et al. [18]	Transmisión a-Si	Láser	670 nm	Transmisión
1996	H. Rogne et al. [19]	Emisión térmica c-Si	Láser Espectrómetro	1 a 1,6 μm 300 a 800 °C	Emisión

Tabla I. Resumen de los equipos utilizados en los experimentos ópticos con temperatura.

2.2. Equipo de medición óptica

En la figura 2 se puede ver el esquema del equipo construido y los componentes que lo conforman.

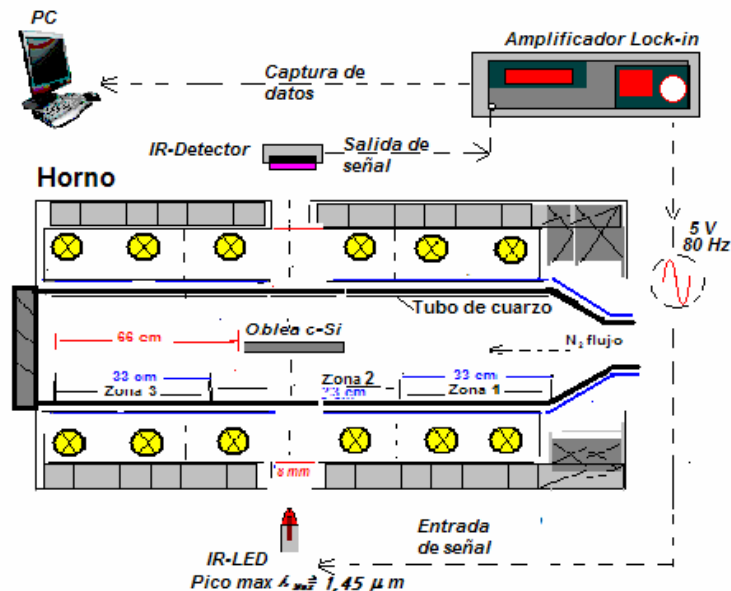


Figura 2. Equipo construido para el desarrollo de esta tesis con cada uno de sus componentes. Equipo óptico, Amplificador lock-in y horno.

Para el desarrollo de esta tesis se emplea un diseño parecido al equipo empleado por J. C. Sturm et al. [14] en el que utiliza dos láseres para medir la transmisión óptica calentando la oblea de c-Si en un horno. La propuesta que se hace en esta tesis se implementa el uso de un LED-detector comercial de bajo coste de adquisición. En la tabla II se muestra las diferencias entre el equipo de J. C. Sturm y el fabricado en esta tesis.

J. C. Sturm et al. [14]	Esta Tesis
Láser con un espectro monocromático con emisiones en 1,3 y 1,5 μm	LED comercial con espectro de emisión entre 1,2 y 1,6 μm y máximo pico en 1,42 μm
Amplificador Lock-in	Amplificador Lock-in
Horno convencional	Horno con tubo de cuarzo y tres zonas de temperatura
Captura de datos por PC	Captura de datos por PC

Tabla II. Comparación del equipo utilizado por J. C. Sturm et al. [14] y el construido en esta tesis.

El equipo es empleado para medir transmisión óptica del substrato de c-Si a través del coeficiente de absorción y medir in-situ el cambio de fase de amorfo a cristalino de las capas carbono de silicio amorfo intrínseco y dopado con fósforo. El equipo construido está formado por una parte de medida óptica (LED y detector), amplificador lock-in y un horno con tubo de cuarzo. A continuación se detallan los componentes que lo forman.

2.2.1. LED



Figura 3. Foto del LED L7850-01 del HAMAMATSU [Anexo A dirección Web del fabricante] utilizado para la fabricación del equipo óptico.

En la figura 3 se muestra el LED fabricado por la compañía HAMAMATSU (IR-LED L 7850), utilizado para la construcción del equipo de medición óptica. El espectro de emisión del LED se extiende entre 1,2 y 1,6 μm con un pico máximo de emisión en $\lambda = 1,45 \mu\text{m}$ de longitud de onda (ver anexo A dirección Web del fabricante). Este espectro fue confirmado con medidas de espectroscopia de deflexión fototérmica (PDS). En la figura 4 se presenta la comparación del espectro medido con PDS y del fabricante, encontrando que el pico máximo del espectro de este LED está en 1,42 μm y no en 1,45 μm manteniendo el rango de emisión entre 1,2 y 1,6 μm.

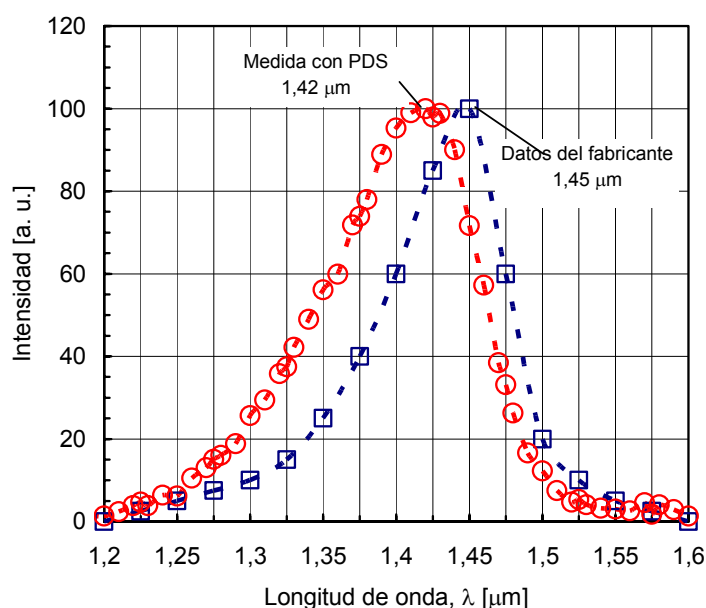


Figura 4. Espectro de emisión del LED medido con PDS y del fabricante tomado de la hoja de datos (Anexo A Web del fabricante).

La emisión de luz de un LED sigue la ley D’Lambert, el cual puede tener tres grados de direccionalidad: El ángulo de visión de 180°, curva patrón en un rango intermedio ($< 180^\circ$) y la alta direccionalidad ($< 45^\circ$). El LED posee un lente que lo hace altamente direccional con un ángulo de dispersión de haz de luz de 5° tal y como se ve en la figura 5.

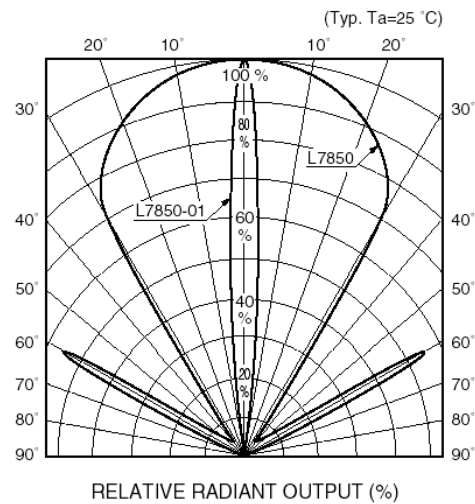


Figura 5. Espectro de direccionalidad del LED (Anexo A dirección Web del fabricante)

El funcionamiento eléctrico del LED se ha fijado teniendo en cuenta la curva de corriente-voltaje de la hoja de datos del fabricante que se puede ver en la figura 6.

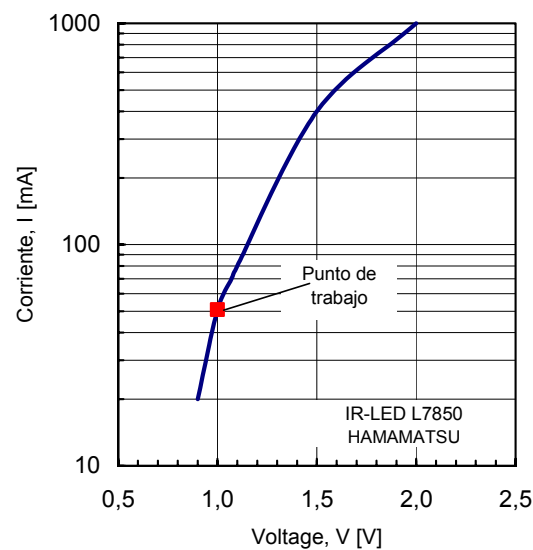


Figura 6. Curva I-V del LED HAMAMATSU (IR-LED L 7850) utilizados en la fabricación del equipo óptico para (Anexo A dirección Web del fabricante)

El LED es alimentado por el amplificador lock-in con una señal senoidal de 80 Hz de frecuencia. La corriente que circula por el LED es fijada por la fuente interna del lock-in la cual es de 50 mA.

El tiempo de constante de RC para el ancho de pulso (máximo teórico) descrito por el fabricante es de 10 μs equivalente a 100 Hz para el LED. Es necesario emplear una frecuencia que permita obtener el máximo rendimiento del LED y a la vez evite acoplamiento de frecuencias parásitas emitidas por el medio. Para el desarrollo de esta tesis se ha escogido una frecuencia de trabajo de 80 Hz que corresponde a un ancho de pulso por envío de señal de 12,5 μs . Este valor ubica el punto de trabajo del LED por encima del estipulado por el fabricante.

2.2.2. Detector



Figura 7. Foto del Detector G8370 de la compañía HAMAMATSU (Anexo A dirección Web del fabricante) utilizado para la fabricación del equipo óptico.

En la figura 7 se puede ver el detector utilizado para la construcción del equipo de medición óptica fabricado por la compañía HAMAMATSU (InGaAs PIN

photodiode G8370). En la figura 8 se muestra el espectro de fotosensibilidad del detector con una alta sensibilidad entre 1,4 μm y 1,6 μm y máximo pico de sensibilidad en $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ de longitud de onda (ver anexo A dirección Web del fabricante).

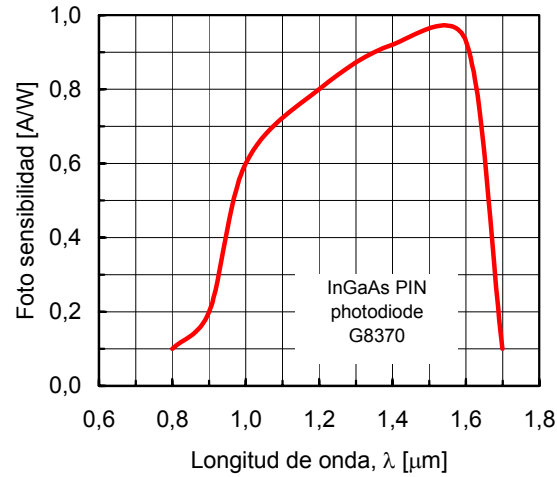


Figura 8. Espectro de la foto-sensibilidad del detector (InGaAs PIN photodiode G8370) (Anexo A dirección Web del fabricante)

En la figura 9 se presenta el esquema de polarización del detector. En el que juega un papel importante la carcasa al permitir conectar a masa y de esta forma disminuir el ruido emitido por el entorno. El detector utiliza una resistencia de carga (R_2) de 2,5 M Ω , la cual convierte la corriente en tensión que es medida mediante el lock-in.

La alineación entre el detector y el LED es muy importante, para ésto se construyó un soporte que permitiera manipular fácilmente los ángulos de ajustes en los tres ejes de dirección (x,y,z), tal y como se presenta en la figura 10.

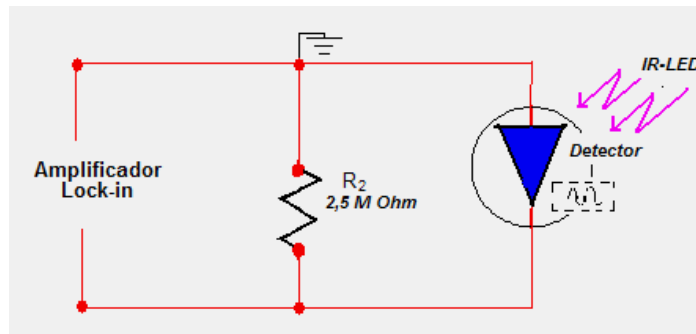


Figura 9. Esquema eléctrico de funcionamiento del Detector.

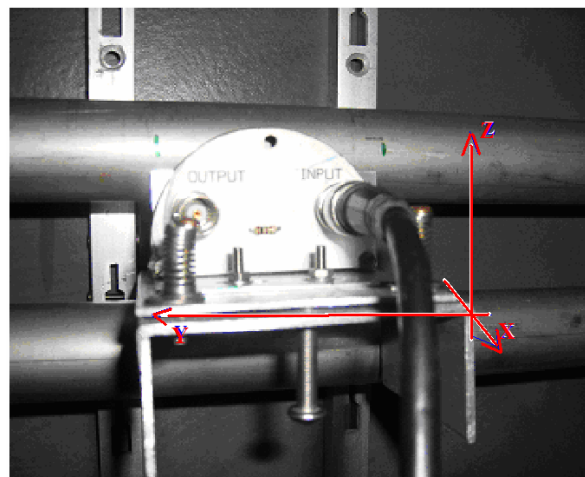


Figura 10. Foto del soporte hecho para el equipo óptico, con tres grados de libertad para el ajuste de alineación.

2.2.3. Amplificador Lock-in.

En la figura 11 se puede ver el amplificador lock-in empleado para evitar el ruido de fondo emitido por el horno (radiación equivalente a la de un cuerpo negro) a elevadas temperaturas.



Figura 11. Foto del Amplificador Lock-in SR830 utilizado para la construcción del equipo, tomada de la hoja de datos del fabricante (Anexo A dirección Web del fabricante)

Las especificaciones técnicas del lock-in están en el anexo A, por esto sólo se mencionará la que hace referencia a la fuente interna. Esta tiene un rango entre 1 MHz y 102 kHz, con una resolución de 4 dígitos, la amplitud máxima de la señal generada es de 5 V. El canal de medida tiene una sensibilidad de 2nV a 1V, impedancia de entrada de 10^6 a 10^8 Ohm, cuatro líneas de filtro a 50/60 o 100/120 Hz.

Acoplado al detector para capturar los datos a través del puerto paralelo y enviando los datos a un ordenador. Para capturar los datos es necesario hacer un programa que permita la comunicación entre el computador y el lock-in. Este programa se hizo bajo un ambiente QBasic utilizando los comandos pre-establecido por el fabricante del lock-in. En el anexo A se muestra el programa desarrollado para la captura de datos.

2.2.4. Horno.

En la figura 12 se muestra una foto del horno utilizado para calentar las obleas de c-Si.



Figura 12. Foto de la boca del horno utilizado para calentar las obleas de c-Si.

Este horno tiene un tubo de cuarzo que puede soportar temperaturas cercanas a los 1400 °C con un flujo constante de N_2 para eliminar las impurezas desprendidas por el tubo. Tiene tres zonas de temperaturas para evitar gradientes de temperatura dentro del horno, la zona más estable es la zona 2, donde se realizan todos los procesos y se encuentra en el centro del tubo. La zona 1 y zona 3 está ubicadas a los extremos y sirven de compensación a la zona central. La zona 1 está en la parte donde entra el flujo de N_2 y la zona 3 se encuentra en la entrada o boca del horno.

La temperatura del horno se ajusta con un controlador lógico programable (PLC). Este permite programar la velocidad de subida o bajada en temperatura (rampa) en el proceso que se realice. Este parámetro es criterio del investigador ajustar para cada proceso tecnológico que realice.

En el horno se ha hecho una modificación para poder acoplar el equipo de medida óptica (LED-detector). A ambos lados de la coraza y en las paredes del horno se han abierto dos orificios de 8 mm de diámetro, cada uno ubicado en los

laterales de la zona 2. Los dos orificios están alineados entre sí. Separados por una distancia de 60 cm de distancia. Del borde de la boca del tubo hasta la zona en la que se colocan las muestras de c-Si hay una distancia de 66 cm.

2.3. Prueba de funcionamiento del equipo.

En figura 13 se muestra una foto del equipo con sus componentes utilizado para el desarrollo de esta tesis.



Figura 13. Foto del equipo utilizado para las medidas ópticas combinada con temperaturas.

En la puesta a punto del equipo es necesaria una prueba experimental en que se determine el máximo y el mínimo valor de señal detectada, sin muestra en el camino óptico. Como se presenta en la figura 14. La señal medida es de 3,4 mV sin muestra en el camino óptico, este valor estipula la máxima tensión de señal detectada. Para conocer el mínimo valor de la señal detectada se utiliza una oblea de c-Si texturizada por ambas caras, con un promedio de tamaño de pirámide de 3 μm . La cual por la estructura de la superficie provoca una refracción del haz de luz ocasionando que el camino óptico sea mas largo, quedando prácticamente la luz atrapada. Esto debe disminuir la señal transmitida a un valor muy pequeño que el detector no pueda medir mostrando el mínimo de

señal detectado. Una vez la c-Si texturizada está en el camino óptico el valor de señal medida está al alrededor de $0,85 \mu\text{V}$.

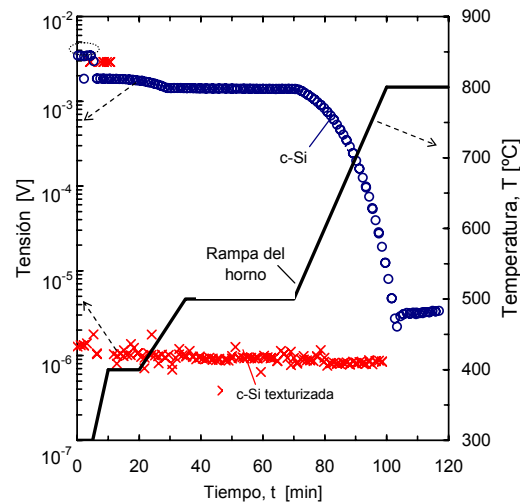


Figura 14. Medida de prueba del máximo y mínimo valor de tensión detectado por el equipo óptico. Medida de oblea pulida tipo p (círculos), oblea texturizada (cruces) y rampa de temperatura del horno (línea sólida).

Ahora es necesario conocer si los experimentos a realizar están dentro del rango de medida permitido por el equipo. Para ésto se emplea una oblea de $300 \mu\text{m}$ pulida por ambas caras, cuando esta es colocada en el camino óptico la señal medida a una temperatura de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ es de $1,62 \text{ mV}$. Después se incrementa la temperatura en el horno de $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a $800 \text{ }^\circ\text{C}$. La señal obtenida responde fielmente al cambio de temperatura programado en la rampa del horno. Esto es un buen indicio que demuestra que el equipo de medida óptica funciona bien y que los circuitos diseñados para la polarización del LED y el detector son correctos. Cuando la temperatura llega a los $800 \text{ }^\circ\text{C}$ la señal medida es de $3,34 \mu\text{V}$ mostrándose estable. Este valor está dentro del rango de medida del equipo no excediendo el límite.