

## Caracterización del c-Si y estimación del gap óptico a través de medidas de transmisión con led convencionales de bajo coste

Kelvin Beleño <sup>1,2</sup>, Torres Ivaldo <sup>2</sup>, Diaz Jorge L <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de IEETS, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Universidad de Pamplona. Pamplona- Colombia.

<sup>2</sup>Grupo LOGOS. Departamento de IEETS, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Universidad de Pamplona. Pamplona-Colombia.

<sup>3</sup>Grupo A&C, Departamento de IEETS, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Universidad de Pamplona. Pamplona- Colombia.

### Resumen

Este trabajo trata de la caracterización del sustrato de silicio cristalino (c-Si) y la determinación del Gap óptico a través de medidas de transmisión y reflexión utilizando un equipo de medida óptica que emplea Led's convencionales de bajo costo de adquisición diseñado en la Universidad de Pamplona. En el equipo diseñado para realizar las medidas transmisión óptica se utilizaron cinco Led's convencionales de bajo costo de adquisición de espectros de longitudes de ondas que varían entre el violeta (300nm) hasta el infrarrojo (900 nm). Para realizar los experimentos se utilizaron obleas de silicio cristalino (c-Si) tipo p de 200 y 300  $\mu\text{m}$  de grosor pulida por ambas caras con orientación cristalográfica <100>. Con medidas de transmisión y reflexión se calculó la absorción del material semiconductor y se estimó el valor del Gap óptico comparándose con resultados obtenidos por otros autores. Demostrando que es posible utilizar elementos convencionales de bajo consumo de energía y bajo coste de adquisición en la fabricación de sistemas de caracterización que involucran medidas ópticas complejas combinando variables como la temperatura.

**Palabras clave:** Silicio Cristalino, Absorción, Transmisión, Reflexión, Gap Óptico, Led Convencional

### The estimate of the optic gap done through transmission measurements with low cost conventional led

### Abstract

This work deals with the characterization of the substrate of crystalline silicon (c-Si) and the determination of the optical-gap through the measurement of transmission and reflection using an optical calculation equipped with a conventional low cost LED device designed at the University of Pamplona in Colombia. The equipment designed for measuring optical transmission used five conventional LED devices with wavelengths in the spectrum ranging from violet (300nm) to infrared (900 nm). These experiments used samples of crystalline silicon (in the shape of wafers) (c-Si) p-type 200 and 300  $\mu\text{m}$ -thick, polished on both sides with crystallographic orientation <100>. With transmission and reflection measurements the absorption of semiconductor material was calculated and optical-gap values are estimated and compared with results obtained through existing literature; this shows that you can use conventional elements of low energy consumption in the manufacture of characterized systems that involve complex optical measurements combining variables such as the temperature.

**Key words:** Crystalline silicon, Absorption, Transmission, Reflection, Spectroscopy, Optical GAP, Conventional LED.



## Caracterização de c-Si e gap óptico estimado por medições de transmissão com baixo custo de LED convencional

### Resumo

Este artigo trata da caracterização do substrato de silício cristalino (c-Si) e a determinação da diferença de óptica, através de medidas de transmissão e de reflexão, utilizando uma equipe de medição óptica, que usa o custo de aquisição convencional Led baixo concebido na Universidade de Pamplona. O equipamento projetado para medições de transmissão óptica foram utilizados cinco Led espectro de custo baixo de aquisição convencional de comprimentos de onda que vão do violeta (300 nm) ao infravermelho (900 nm). Para as experiências foram utilizadas placas de silício cristalino (c-Si) 200 e do tipo p 300 nm de espessura polida em ambos os lados com a orientação cristalográfica <100>. Com medições de transmissão e de reflexão foi calculada a absorção do material semiconductor e estima o valor do desvio óptico comparação com os resultados obtidos por outros autores. Provando que é possível a utilização de elementos convencionais de baixo consumo de energia e baixo custo para o fabrico de sistemas de caracterização que envolvem complexos medições ópticas combinando variáveis tais como a temperatura.

**Palavras-chave:** silício cristalino, absorção, transmissão, reflexão, gap óptico, Led convencional

\*Para citar este artículo: Beleño K.,Torres I.,Diaz JL.Caracterización del c-Si y estimación del gap óptico a través de medidas de transmisión con led convencionales de bajo coste. Bistua: Revista de la facultad de Ciencias Basicas.2012.10(1):62-70

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Ivaldo Torres . Grupo LOGOS. Departamento de IEETS, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Universidad de Pamplona. Pamplona-Colombia. email:ivaldo.torres@unipamplona.edu.co

Recibido: Junio 30 de 2011 Aceptado: Febrero 15 de 2012

### Introducción

Los materiales semiconductores específicamente en la industria del silicio cristalino (c-Si) han proporcionado una gran cantidad de avances tecnológicos en las últimas décadas revolucionando el mundo de la electrónica. Consiguiendo no solo el desarrollo de la industria de dispositivos pequeños con alta fiabilidad sino también impulsar nuevos campos de investigación con diferentes áreas de aplicación como lo son: Los transistores, Los circuitos integrados, Las celdas solares entre otros (1).

El c-Si cristalino es un material semiconductor abundante en la naturaleza con características propias que permiten la modificación de su condición intrínseca con técnicas de dopado como la difusión a elevadas temperaturas ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), de allí que su costo de adquisición sea bajo y se utilice para fabricar sustratos (1,2). Las características del c-Si cristalino que lo hacen un material de mucho interés en numerosas aplicaciones microelectrónicas son: La Temperatura ( $T^{\circ}$ ) de Fusión ( $1415^{\circ}\text{C}$ ), la Conductividad Térmica ( $\sim 1.5\text{ W/cm }^{\circ}\text{C}$ ), El Coeficiente de Expansión Térmico ( $\sim 2.6 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), La Anchura de la Banda Prohibida (BandGap) ( $\sim 1.17\text{ eV}$ ) y La Buena Estabilidad Física (2). Los elementos más utilizados como dopantes en la difusión son los de tipo donantes (tipo n) como el aluminio (Al) boro (B) y Galio (Ga). Y los de tipo aceptor (tipo P) como el fósforo (P) y el Arseniuro de galio (Ag) (2,3).

En la caracterización del sustrato de c-Si se utilizan técnicas complejas como la espectroscopia, la cual estudia el espectro característico de un material el cual es único y propio que lo diferencia de los demás (4). Los equipos que

emplean estas técnicas son complejos y por ende elevan su costo de adquisición se diferencian en principio por el método utilizado, la región de frecuencias en que se desarrolla (longitudes de onda), el tipo de fuente de radiación empleado como el Fourier Transformed Infrared (FTIR), Transmission Electron Microscopy (TEM), Espectrómetro Óptico; difractograma de Rayos X (XDR), Espectroscopia RAMAN, entre otros (5).

Dentro de las características inherentes del sustrato de c-Si se clasifican las siguientes propiedades: La Transmisión, La Reflexión y La Absorción Óptica. Siendo la absorción un parámetro importante en la caracterización debido a que involucra procesos que dan a conocer información relevante de los cambios internos del material y permiten realizar los correspondientes análisis basándose en los resultados medidos (6).

Este trabajo trata de la caracterización del sustrato c-Si y la determinación del Gap óptico a través de medidas de transmisión y reflexión utilizando un equipo de medida óptica diseñado en la Universidad de Pamplona que emplea LED's convencionales de bajo costo de adquisición. En la sección 2 se explica los fundamentos físicos que soportan los equipos de medida ópticas, definiendo los conceptos de transmisión, reflexión y absorción. En la sección 3 se explican los resultados obtenidos con las medidas hechas utilizando el sistema de caracterización óptica con los LED's convencionales. En la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo.

### Metodología.

#### Fundamentos Físicos de la Caracterización Óptica.

Los equipos de caracterización que utilizan medidas ópticas se basan en los conceptos de transmisión, reflexión y absorción. En la figura 1 se muestra el esquema del proceso que define el concepto de transmisión, reflexión y absorción en función de intensidades de energía (7).

La transmisión ( $T_T$ ) caracteriza la parte del haz incidente que emerge por la cara posterior de la muestra. Se puede definir como la razón entre la intensidad resultante ( $I_T$ ) y la intensidad incidente ( $I_o$ ) (7).

$$T_T = \frac{I_T}{I_o} \text{ Ec. (1)}$$

La reflexión ( $R_T$ ) 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(7).

$$R_T = \frac{I_R}{I_o} \text{ (Ec. (2))}$$

La absorción es la cantidad de energía que queda atrapada en el obstáculo, transformándose en energía potencial y siendo luego disipada o remitida en forma de radiación o calor, durante el proceso de relajación. Para el cálculo del coeficiente de absorción óptico ( $\alpha_T$ ) a partir de medidas experimentales de transmisión ( $T_T$ ) y reflexión ( $R_T$ ) se propone un modelo que parte de la definición teórica de transmisión óptica hecha por (8).

$$T_T = \frac{(-R_T) e^{\alpha_T d}}{1 - (-R_T) e^{2\alpha_T d}} \text{ Ec. (3)}$$

Donde  $d$  es el grosor de la muestra. Este modelo permite calcular la absorción en el rango de alta y baja absorción (9).

$$\alpha_T = -\frac{1}{d} \ln \left[ \frac{\sqrt{(-R_T)^2 + 4T_T^2 R_T^2} - (-R_T)}{2T_T R_T} \right] \text{ Ec. (4)}$$

Para el c-Si cristalino que es un material de GAP indirecto (9), el mecanismo dominante para la absorción óptica es la transición del electrón banda a banda y puede ser seguido por la siguiente relación:

$$\alpha_T = Y (h\nu - E_g)^2 \text{ Ec. (5)}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción óptica,  $h\nu$  es la energía del fotón,  $E_g$  es el GAP del material y  $Y$  es una constante que toma valores según la energía de transición del electrón la cual puede ser de  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{3}{2}$ . En la transición indirecta de un electrón que salta de la banda de valencia a la de conducción se involucran procesos de absorción ( $h\nu \leq E_g$ ) o emisión ( $h\nu \geq E_g$ ) de fonones donde la constante  $Y$  asume el valor de 2 (9,10). Entonces se puede determinar el valor de energía del GAP a través de la intercepción entre la raíz cuadrada del coeficiente de absorción óptico ( $\alpha_T^{1/2}$ ) y el eje de energía ( $h\nu$ ) proyectando la zona lineal de la curva cercana a la región de baja energía de transición hasta el eje de  $h\nu$ . Este proceso se puede realizar a través de una regresión lineal que para este caso la relación de las incógnitas son exactas y se resuelve calculando la ecuación de la recta tomando la región plana de puntos.

$$E_{g(0)} = m (h\nu) + b_0 \text{ Ec. (6)}$$



Donde  $E_g$  es la energía del GAP determinado en el punto de intersección en el eje de energía,  $m$  es la pendiente de la recta,  $h\nu$  son los valores del eje de energía en electrón voltios y  $b_0$  es una constante de ajuste. Al solucionar la ecuación (6) y encontrar los valores de las constantes se obtiene la aproximación del valor de energía del GAP del sustrato de c-Si cristalino (9,10).

#### Desarrollo de la Etapa Experimental

Se diseñó un sistema conformado por una etapa de adquisición de datos a través de una interfaz gráfica desarrollada bajo el ambiente del software Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Labview) versión 8.2 de la National Instrument, una tarjeta de adquisición con comunicación a través del puerto RS-232 utilizando un microcontrolador 18F452 de la empresa Microchip y una etapa de instrumentación empleando 5 LED's convencionales de bajo costo de adquisición con espectros de luz en el rango de emisión del violeta, verde, amarillo, rojo y el infrarrojo, abarcando un espectro de frecuencia de 400 nm hasta los 1000 nm aproximadamente como se muestra en la figura 2.

Para determinar el espectro de emisión de cada LED se hicieron medidas con un espectrómetro óptico. El cual tiene un rango de medida que abarca un espectro de frecuencia desde los 300nm hasta 2.500nm.

La potencia de emisión óptica, el punto óptimo de trabajo sin llegar a la saturación se estableció realizando las

medidas del espectro de emisión de cada LED, excitándolos con intensidades de corriente de 20mA, 50mA y 100mA respectivamente. Las longitudes de onda emitidas por cada LED se determinaron tomando la ubicación del pico máximo de emisión medido por el espectrómetro óptico.

Para la detección de la señal emitida por los LED's se utilizó un fotodiodo infrarrojo PIN (SiGaAlAs), de la serie SFH-213A con un área activa de 5mm de la empresa SIEMENS. Con un espectro de medida que abarca desde los 400nm hasta los 1100nm con un pico máximo en 880nm y una potencia máxima de disipación de 100 mW.

Los LED's y el Detector se colocaron en lados opuestos a una distancia de 20cm en una caja rectangular de 20x15x15cm recubierta en su interior por un material de color negro mate para evitar emisión de luz provenientes de fuentes externas y la reflexión de la luz emitida por los LED's. En el centro de la caja se ubica el soporte que permite colocar la muestra con un ángulo de incidencia del haz de luz de 90° para las medidas de transmisión y con un ángulo de incidencia de 45° para las medidas de reflexión. Sin embargo, para calcular los valores de la transmisión, reflexión, es necesario normalizar los valores medidos tomando el máximo valor de intensidad incidente emitida por los LED's. Que para este trabajo el valor teórico de intensidad generada puede estar cercano a los 5Vol según las especificaciones el Microcontrolador utilizado para fabricar la tarjeta. Pero en la realidad este valor es menor (4,5Vol) debido a las pérdidas que se tiene en las diferentes conexiones

parásitas resistivas que presenta el circuito. En la calibración del sistema es necesario realizar una primera medida sin muestra para medir el ruido de fondo del sistema y establecer el punto de trabajo.

Para realizar las medidas de transmisión y reflexión en el equipo de caracterización óptica se utilizaron obleas de c-Si cristalino tipo p de 200 y 300 nm de grosor pulida por ambas caras con orientación cristalográfica  $\langle 100 \rangle$  y resistividad de  $0,95 \Omega\text{cm}$ . Las muestras se colocaron en el soporte haciendo incidir el haz de luz en la superficie de la muestra y en cada medida se varió la excitación de los LED's con tres valores de corrientes diferentes (20,50 y 100 mA). Luego se procedió a calcular la absorción del material utilizando la ecuación (4) y se determinó el valor del GAP del c-Si cristalino proyectando una recta de la forma descrita en la ecuación (6) al eje de energía desde la región plana de la curva cercana a la región de baja absorción.

### Resultados y Discusión.

En la figura 3 se puede ver el espectro de emisión medido por un Espectrómetro Óptico para cada LED en la que se determinó la longitud de onda por el valor de intensidad del pico máximo medido con valores de corriente de 22, 50, 106 mA. Los picos máximos de las curvas se normalizaron para ser comparados entre si y se puede ver que para las corrientes de 22 y 50 mA la luz emitida por todos los LED's alcanzan el 25% y el 60% del 100% establecido, excepto el LED infrarrojo que está por debajo de la referencia.

En la tabla 1 se muestran los valores medidos por el espectrómetro óptico sin normalizar de las intensidades emitidas por cada LED y para cada valor de corriente se relaciona los colores con las longitudes de onda respectiva.

En la figura 4 se puede ver las medidas hechas con el equipo de caracterización óptica de transmisión (fig. 4.a)) y reflexión (fig. 4.b)) de un substrato de c-Si cristalino de 200 nm de grosor y diferentes valores de corriente para cada LED excitado con corrientes de 22, 50 y 106 mA. En la figura 4.a) de transmisión se puede ver que para los valores que corresponde a las longitudes de ondas comprendidas entre 400 y 650nm, la transmisión es baja, por debajo de 0,1 manteniéndose para los tres valores de corrientes. No obstante, el valor de la transmisión que corresponde a 940nm varía según la intensidad de la corriente siendo mayor la emitida por la corriente de 106 mA. Para la figura 4.b) de reflexión se aprecia que los valores de las longitudes de onda comprendida entre 400 y 600nm son bajos y la medida que corresponde a los 650nm la señal cambia para los tres valores de corriente siendo mayor la de 106 mA. La región de 940nm la señal medida aumenta manteniendo los valores para las tres variaciones de corriente.

En la figura 5 se puede ver las medidas hechas con el equipo de caracterización óptica de transmisión (fig. 5.a)) y reflexión (fig. 5.b)) para el substrato de c-Si cristalino de 300 nm de grosor y valores de corriente para cada LED de 22, 50 y 106 mA. En la figura 5.a) se puede ver la curva de transmisión y se observa que el comportamiento para los



68

puntos comprendidos entre 400 y 650nm son iguales a los presentados en la figura 4.a), con valores por debajo de 0,1. Para el punto que corresponde a la medida de 940nm también existe un cambio menos significativo que en la medida hecha en el sustrato de 200 nm debido a que la transmisión de la señal depende de la absorción y del grosor del material lo que explica que se tenga diferentes valores para el punto de 940nm. En la figura 5.b) se puede apreciar el mismo comportamiento que el presentado en la figura 4.b), lo cual es coherente debido a que la reflexión no depende el grosor del material.

En la figura 6 se puede ver el coeficiente de absorción óptico calculado con la ecuación (6) tomando los valores de transmisión y reflexión de la figuras 4 y 5. La figura 6.a) muestra igual comportamiento que la figura 6.b) para los valores comprendidos en la zona de 3 a 2 eV. Este resultado se correlaciona con el obtenido con las medidas de reflexión y transmisión de los sustratos de 200 y 300 nm, donde

El punto de más baja absorción es la zona que corresponde al infrarrojo y es la de más alta transmisión en las medidas hechas en las figuras 4 y 5, Lo cual es coherente debido a que el silicio absorbe poca energía para longitudes de ondas cercanas al infrarrojo (>900 nm) (8,9). Por otro lado, para el punto que corresponde a 1,9 eV se pueden apreciar los cambios ocasionados por las variaciones de corriente en el LED. Donde el valor más alto del coeficiente de absorción para ambas curvas es el de

la corriente de 22 mA (fig. 6.a) y fig. 6.b)).

Los puntos obtenidos en la zona comprendida entre 1 y 2 eV permiten realizar el calculo para determinar el valor de energía del GAP. Estos tres últimos puntos de la curva del coeficiente de absorción permiten establecer la zona plana y proyectarla al eje de energía mediante una recta numérica.

En la tabla 2 se pueden ver los valores obtenidos del GAP para las medidas hechas con diferentes intensidades de corriente en sustratos de c-Si cristalino de grosores diferentes. Los resultados son similares para ambas muestras y se correlaciona con los datos obtenidos en otros trabajos publicados [9,10]. Los valores del GAP no son exactos ya que los LED's utilizados no son monocromáticos y tienen un ancho de banda espectral que generan pequeños errores en la medida.

### Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema capaz de reproducir experimentos complejos para la caracterización de materiales utilizando elementos de bajo costo de adquisición que combinados con la teoría y el análisis riguroso de los datos obtenidos permiten complementar el sistema y llegar a resultados razonables. El GAP del silicio determinado es en promedio es de 1,17 eV para los diferentes valores de corrientes que excitaron a los LED's y coincide con los valores encontrados en otras publicaciones demostrando que es posible utilizar elementos de bajo coste de adquisición en la fabricación de equipos destinados a la investigación científica.

**Referencias Bibliograficas.**

1.-Martin A. Green and David Jordan, Technology and Economics of Three Advanced Silicon Solar Cells, Taiwan PV World Forum: PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS, Prog. Photovolt. Res. Appl. (1998).

2.-S.M.Sze, Semiconductor Devices Physics and Thecnology: 2nd Edition, John Wiley & Son, Inc, (2001).

3.-Z. Felk. Estudio Morfológico Y Estructural Del Crecimiento Epitaxial De Capas de c-Si, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, España, (2000).

4.-M. Vetter, Y. Touati, I. Martin, R. Ferré, R. Alcubilla, I. Torres, J. Alonso, M.A. Vazquez, Characterization of Industrial p-type CZ Silicon Wafers Passivated with a-SiC<sub>x</sub>:H Films, IEEE, Electronic Device, (2005).

5.-J. Revelo y A. Luque, Contribución A La Mejora De Las Células Solares De Silicio, Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid-España, (1998).

6.- Lorin X. Benedict, Robert B. Bohn and Eric L. Shirley, Theory Of Optical Absorption In Diamond, Si, Ge, and GaAs, Physical Review B, (1998).

7.- J. M. Cabrera, F. J. López, F. A. López, Fundamento de Óptica Electromagnética, Addison-Wesley Iberoamericana, (1993).

8.- G. G. Macfarlane, T. P. McLean, J. E. Quarrington, and V. Roberts, Fine Structure in the Absorption-Edge Spectrum of Ge, Physics Review, (1957).

9.- John. M. Essick and Richard T. Mather, Characterization of a bulk semiconductor's band gap via a near-absorption edge optical

transmission experiment, American Journal Physics, (1993).

10.-G.E. Jellison, and F.A.Modine, Parameterization Of The Optical Functions Of Amorphous Materials In The Interband Región, Applied Physics Letters, (1996).

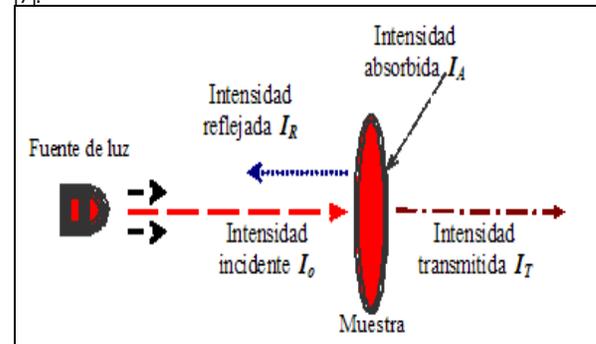
LED'S	Longitud de Onda [nm]	Corrientes de excitación [mA]		
		106	50	22
Violeta	409	0,613	0,360	0,204
Verde	516	0,364	0,236	0,142
Amarillo	593	0,127	0,102	0,041
Rojo	638	0,127	0,654	0,324
Infra-Rojo	940	0,992	0,476	0,218

Tabla 1. Relación de intensidades tomadas de los picos máximos medidos con el Espectrómetro Óptico.

Intensidad [mA]	Sub-200µm	Sub-300µm
	Valor de l Gap [eV]	Valor de l Gap [eV]
106	1,150990358	1,203691928
50	1,16737971	1,159275587
22	1,175430973	1,163750211

Tabla 2. Valores del GAP calculador con la ecuación (7) para c-Si cristalino de 200 µm y 300mm de grosor.

Figura 1. Esquema del fundamento físico de la transmisión óptica [7].



70

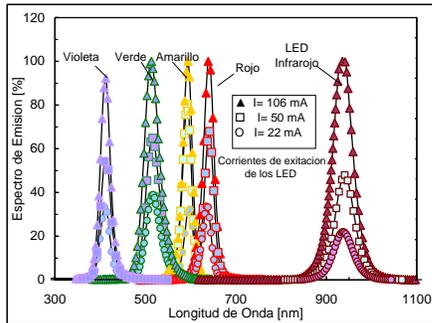


Figura 3. Espectro de emisión de los LED hechas con un Espectrómetro Óptico.

Figura 4. Medida hecha con el equipo de caracterización óptica para el sustrato de c-Si de 200  $\mu\text{m}$ . a) Medida de Transmisión y b) Medida de reflexión

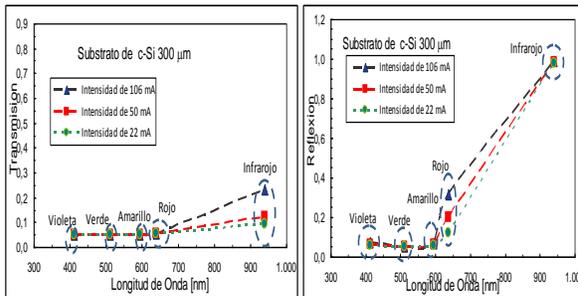


Figura 5. Medida hecha con el equipo de caracterización óptica para el sustrato de c-Si de 300  $\mu\text{m}$ . a) Medida de Transmisión y b) Medida de reflexión

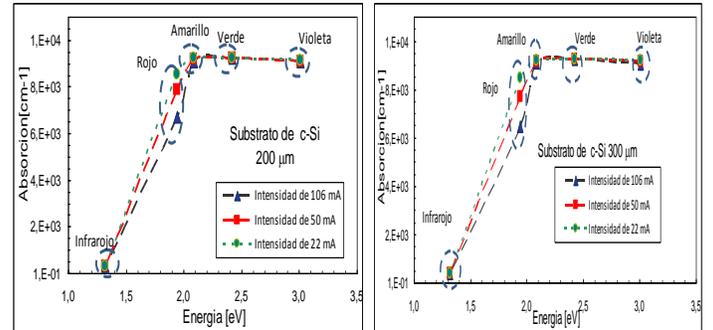


Figura 6. Coeficiente de absorción óptica del c-Si cristalino calculado con la ecuación (6). a) Substrato de 200  $\mu\text{m}$  y b) Substrato de 300  $\mu\text{m}$

