

Capítulo 3

Absorción del c-Si a altas temperaturas.

En este capítulo se explica el modelo teórico de la absorción óptica en el c-Si teniendo en cuenta los mecanismos que lo integran (absorción banda a banda y cargas libres). Se hace un repaso a los trabajos referenciados más importantes detallando el tipo de medida (transmisión, reflexión, emisión), rango, temperatura y material utilizado. También explica la ampliación de la teoría de cálculo del coeficiente de absorción de una luz monocromática para un espectro de emisión, el cálculo y ajuste del coeficiente de absorción, los mecanismos que lo conforman y la comparación con resultados obtenidos por otros autores.

3.1. Estado del arte.

3.1.1. Absorción banda a banda.

La absorción banda a banda ocurre cuando un fotón con energía ($h\nu$) es absorbido. Si $h\nu > E_g$ se genera un par electrón-hueco y el exceso de energía ($h\nu - E_g$) son los fonones disipados. Este mecanismo se llama transición intrínseca. Para un $h\nu < E_g$ un fotón puede ser absorbido solo si la energía es tomada por un nivel energético correspondiente a una impureza o a un defecto en el material. A este proceso se le llama transición extrínseca [20] [21].

La absorción banda a banda (α_{BG}) involucra diversos mecanismos que se comportan de forma diferente al activarse con la energía del fotón y/o al aumentar la temperatura. G. G. Marfalan et al. [9] identificó estos mecanismos con energías equivalentes en temperatura (θ_i) de 212 K, 670 K, 1050 K y 1420 K, donde la energía de $\theta_1=212$ K es llamada acústica longitudinal y la $\theta_2=670$ K es llamada óptica transversal [9] [22].

P. J. Timans et al. [15] propone un modelo de cálculo para α_{BG} , haciendo un repaso de lo hecho por otros autores. [9] [12] [22]

$$\alpha_{BG} = \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^2 \frac{(-1)^l \alpha_i (h\nu - E_g + (-1)^l k\theta_i)}{\exp\left[\frac{(-1)^l \theta_i}{T}\right] - 1} + \sum_{j=3}^4 \frac{\alpha_j (h\nu - E_g + k\theta_j)^2}{\exp\left[\frac{\theta_j}{T}\right] - 1} \quad (5)$$

Donde las unidades de α_{BG} son en cm^{-1} , $h\nu$ es la energía del fotón, T es la temperatura, k la constante de Boltzmann's y θ_i son la distintas energías que activan los fonones con la temperatura. $\alpha_i(E)$ representa los procesos de absorción de fonones y se calculan aplicando las siguientes funciones.

Para $\theta_1=212$ K

$$\alpha_1(E) = \begin{cases} 0,504\sqrt{E_g} + 392(E_g - 0,0055)^2 & \text{Para } E \geq 0,0055 \\ 0,504\sqrt{E_g} & \text{Para } 0 \leq E \leq 0,0055 \\ 0 & \text{Para } E < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Para $\theta_2=670$ K

$$\alpha_2(E) = \begin{cases} 18,08\sqrt{E_g} + 5760(E_g - 0,0055)^2 & \text{Para } E \geq 0,0055 \\ 18,08\sqrt{E_g} & \text{Para } 0 \leq E \leq 0,0055 \\ 0 & \text{Para } E < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Para $\theta_3=1050$ K

$$\alpha_3(E) = \begin{cases} 536 & \text{Para } E > E_g - k\theta_3 \\ 0 & \text{Para } E < E_g - k\theta_3 \end{cases} \quad (8)$$

Para $\theta_4=1420$ K

$$\alpha_4(E) = \begin{cases} 988 & \text{Para } E > E_g - k\theta_4 \\ 0 & \text{Para } E < E_g - k\theta_4 \end{cases} \quad (9)$$

Donde E y el valor 0,0055 tiene unidades de eV. Además para el cálculo es necesario conocer el valor de E_g , el cual es una función de la temperatura [22].

$$E_g = E_o - \frac{AT^2}{B+T} \quad (10)$$

Donde $A = 4,73 \times 10^{-4} \text{ eV}/\%K$, $B = 635^\circ K$ y $E_o = 1,17 \text{ eV}$

En la figura 15 se muestra α_{BG} en función de la temperatura para un barrido de la λ desde 1 μm hasta 1,6 μm calculada con la ecuación (5). Se puede ver la α_{BG} para λ a partir de 1,2 μm presentan un cambio abrupto (codo) en la curva.

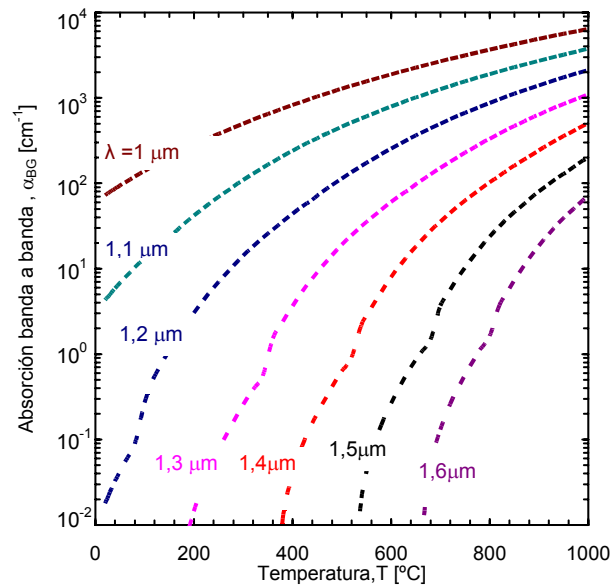


Figura 15. Absorción banda a banda en función de la temperatura para diferentes longitudes de ondas calculada con la ecuación (5).

Este codo se asocia con el cruce de dos mecanismos que se activan con la longitud de onda y la temperatura. A medida que aumenta la longitud de onda este codo se desplaza ubicándose en la zona media de la curva.

En la figura 16 se muestra la curva de α_{BG} con los 4 mecanismos de energías que las conforman, calculados con la ecuación (5) para 1,1 μm (a) y 1,4 μm (b). En el anexo B se presentan los detalles del cálculo de las curvas con las tablas mostrando los resultados.

Para una longitud de onda de 1,1 μm (figura 16.a) el mecanismo que domina en todo el rango de medida es el relacionado a la energía de 670 K.

Para 1,4 μm (figura 16.b) el mecanismo que domina por debajo de los 540 °C es el relacionado con la energía de 1420 K y para temperaturas superiores a 540 °C domina el correspondiente a la energía de 670 K. Para esta longitud de onda, en la temperatura de 540 °C se cruzan los distintos mecanismos ocasionando en la curva de α_{BG} un cambio abrupto o codo. Este efecto se sigue viendo a medida que aumenta la longitud de onda pero a diferentes temperaturas.

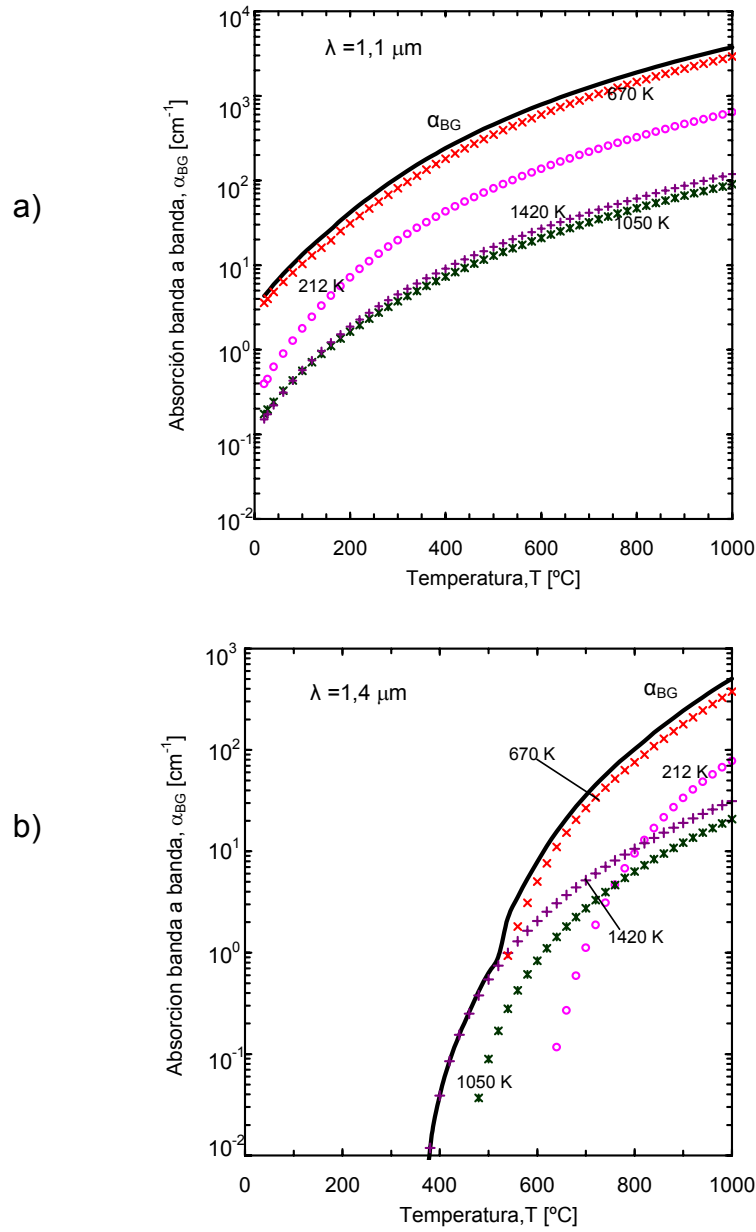


Figura 16 Absorción banda a banda para 1,1 (a) y 1,4 μm (b) con los mecanismos de energías que la conforman, calculada con la ecuación (5).

3.1.2. Absorción por cargas libres.

La absorción por cargas libres es un mecanismo que depende de la energía del fotón y su importancia relativa aumenta a medida que la longitud de onda de la luz aumenta [23]. Es proporcional a la concentración de cargas y al cuadrado de la longitud de onda, razón por la cual no es un mecanismo considerado para longitudes de onda en el rango del visible [24] [25].

Para conocer el coeficiente de absorción por cargas libres (α_{FC}) se empleará el modelo propuesto por P. J. Timans et al. [22]. El cual define en su modelo la α_{FC} como la suma de dos componentes [22] [25].

$$\alpha_{FC} = n\sigma_n + p\sigma_p \quad (11)$$

Donde σ_n y σ_p son las secciones de captura del fotón, que dependen directamente del cuadrado de la longitud de onda (λ) y de la temperatura (T) [22] [25].

$$\sigma_n = 1,01 \times 10^{-20} \lambda^2 T \quad (12)$$

$$\sigma_p = 0,51 \times 10^{-20} \lambda^2 T \quad (13)$$

Donde n es la concentración de electrones y p la concentración de huecos [26] [27].

$$p = \frac{1}{2}[N_A - N_D] + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2} \text{ para una semiconductor tipo p} \quad (14)$$

$$n = \frac{1}{2}[N_D - N_A] + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2} \text{ para una semiconductor tipo n} \quad (15)$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} \quad (16)$$

$$n_i = 3.10 \times 10^{16} T^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-0,605}{kT}\right) \quad (17)$$

Donde N_A y N_D son la concentración de los donadores y aceptores, n_i es la concentración intrínseca del material, k la constante de Boltzmann's.

En la figura 17 se puede ver el α_{FC} en función de la temperatura calculado para diferentes longitudes de onda, desde 1 μm hasta 1,6 μm para una oblea tipo p pulida por ambas caras asumiendo $N_A = 1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

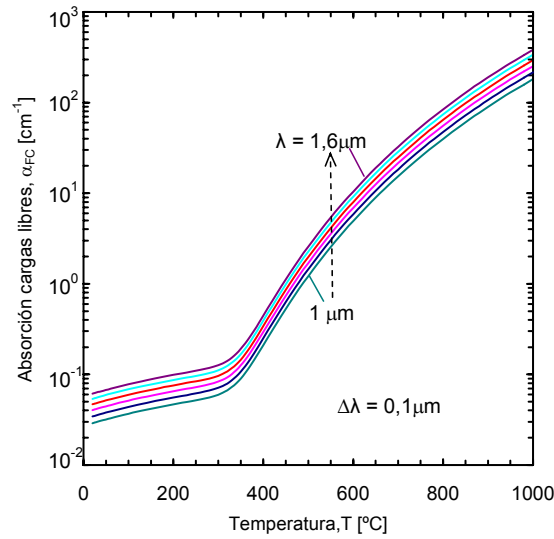


Figura 17. Absorción por cargas libres en función de la temperatura para diferentes longitudes de onda, de 1 a 1,6 μm, calculado con la ecuación (11). En el anexo B se presentan los detalles de los cálculos de las curvas con las tablas mostrando los resultados.

A diferencia de α_{BG} , el comportamiento de la α_{FC} es similar para todas las longitudes de onda. También aparece un codo a baja temperatura a causa de los mecanismos que lo conforman. En la figura 18 se muestran los diferentes mecanismos que componen la absorción por cargas libres para 1,1 (a) y 1,4 μm (b), calculados mediante la ecuación (11).

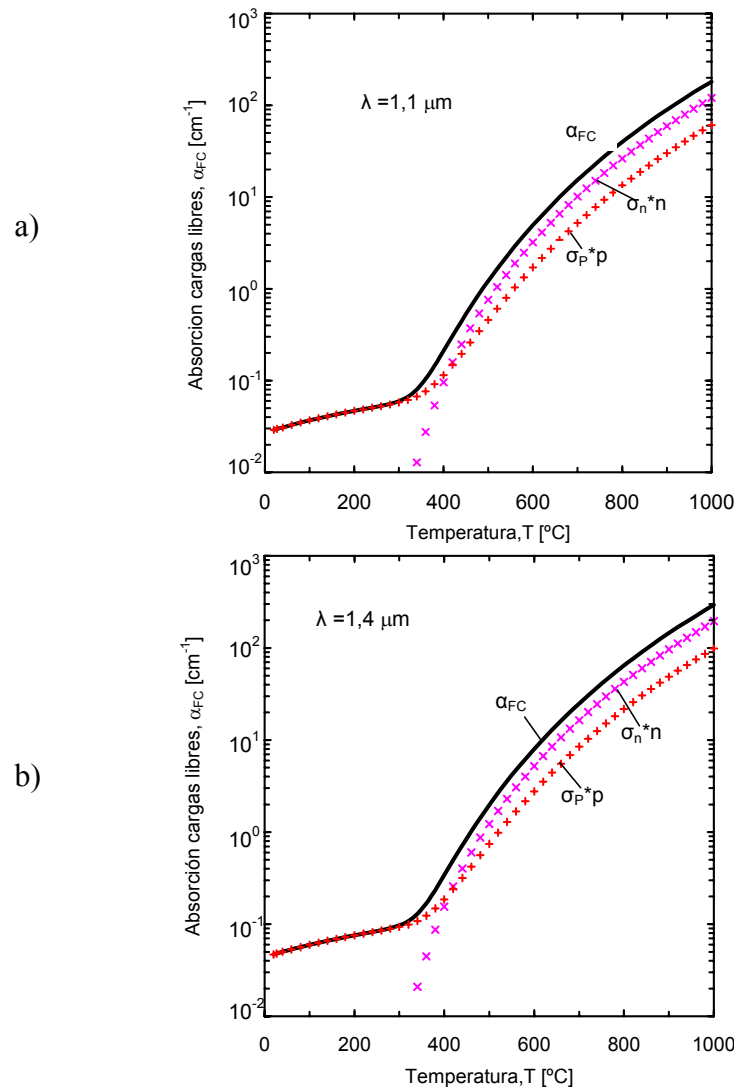


Figura 18. Absorción por cargas libres en función de la temperatura. Mecanismos que intervienen para 1,1 (a) y 1,4 μm (b) calculado con la ecuación (11).

En los dos casos presentados en la figura 18 (a) y (b), el mecanismo que domina a temperaturas menores a 400 °C es el relacionado con los huecos (p). Para temperaturas superiores a 400°C es el relacionado con los electrones. Aunque en orden de magnitud en ambos casos sea similar.

3.1.3. Coeficiente de absorción óptica en el c-Si

P. J. Timans et al. [22] proponen un modelo que tiene en cuenta tres mecanismos que intervienen en el proceso de absorción del c-Si: Banda a banda (α_{BG}), cargas libres (α_{FC}) y en la red cristalina (α_L) [22].

$$\alpha_T = \alpha_{BG} + \alpha_{FC} + \alpha_L \quad (18)$$

El mecanismo de absorción en la red cristalina sólo se activa para longitudes de onda superiores a las 6 μm [29] [30]. En los cálculos de ajuste de α_T hechos en esta tesis, no se tendrá en cuenta el mecanismo de α_L , debido a que el rango que abarca el espectro del LED está por debajo de las 2 μm, siendo obvio que se está fuera del rango de influencia de α_L . Entonces la ecuación (18) se simplifica quedando:

$$\alpha_T = \alpha_{BG} + \alpha_{FC} \quad (19)$$

Conociendo la α_{BG} y la α_{FC} se puede calcular el coeficiente de absorción óptica del c-Si en función de la temperatura para diferentes longitudes de ondas. En la

figura 19 se puede ver α_T en función de la temperatura (a) y de la energía del fotón (b) calculadas con la ecuación (19).

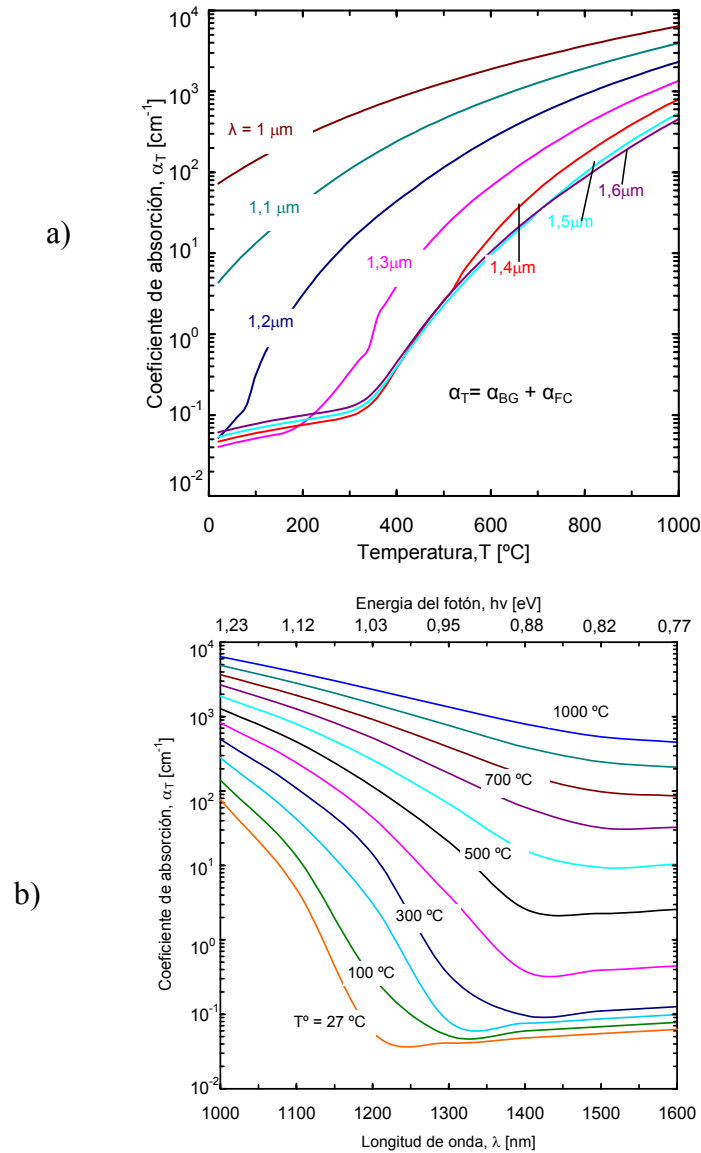


Figura 19. Coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas (a) y en función de la temperatura para diferentes longitudes de onda (b) calculado con la ecuación (19). En el anexo B se presentan los detalles de los cálculos de las curvas con las tablas mostrando los resultados.

3.1.4. Cálculo del coeficiente de absorción óptico a partir de medidas de transmisión y reflexión.

Para el cálculo del coeficiente de absorción óptico (α_T) a partir de medidas experimentales de transmisión (T_T) y reflexión (R_T). J. C. Sturm et al. [31] proponen una ecuación sencilla a partir de medidas de transmisión óptica y de reflexión. Partiendo de la definición hecha por G. G Macfarlane et al. [32] [33].

$$T_T = \frac{(1 - R_T)^2 \exp(-\alpha_T d)}{1 - (R_T)^2 \exp(-2\alpha_T d)} \quad (20)$$

Donde d es el grosor de la muestra [31] [33]. Si se considera la aproximación que $R_T^2 \exp(-2\alpha_T d) \ll 1$, la ecuación (6) se simplifica y se obtiene una ecuación sencilla para calcular α_T [31].

$$\alpha_T = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T_T}{(1 - R_T)^2} \right] \quad (21)$$

Mediante esta sencilla ecuación, se puede calcular α_T en el rango de alta absorción (200 a 1000nm), pero presenta problemas en la región del infrarrojo cuando la absorción es baja, y la aproximación pierde validez.

J. M. Essick et al. [16] proponen un modelo más completo.

$$\alpha_T = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{\sqrt{((1 - R_T)^4 + 4T_T^2 R_T^2)} - (1 - R_T)^2}{2T_T R_T^2} \right] \quad (22)$$

Este modelo se puede emplear para calcular la absorción en el rango de alta y baja absorción. En el anexo C se muestra la deducción de las expresiones de α_T partiendo de la ecuación (20).

Para el desarrollo de esta tesis, la ecuación completa (22) es la que se utilizará para el cálculo α_T a partir de medidas experimentales de transmisión óptica.

3.2. Antecedentes

El coeficiente de absorción en el c-Si ha sido estudiado por muchos investigadores, empleando diversos métodos para determinarlo. Para explicar el comportamiento de la absorción se han propuesto modelos de ajuste en los que se tienen en cuenta los diferentes mecanismos que interactúan con la longitud de onda, la temperatura y la concentración de impurezas. A continuación se hace una reseña de investigadores que han trabajado sobre la absorción con temperaturas y que tienen más relación con esta tesis.

En 1958 G. G Macfarlane et al. [32] publican un trabajo en que se presenta n resultados del coeficiente de absorción en el c-Si en función de la temperatura entre 42 K a 1420 K a partir de medidas de transmisión óptica en el rango de 1 a 1,3 eV y presentando un modelo de ajuste con la teoría de transición indirecta en la absorción del fonon para la absorción banda a banda que incluye 4 mecanismos que intervienen en el proceso de absorción, los cuales se activan con longitud de onda y/o la temperatura, con energías equivalentes que corresponden a temperaturas de 212 K, 670 K, 1050 K y 1420 K.

En 1967 T. Sató et al. [28] publican un trabajo sobre el espectro de emisión del silicio, midiendo la emisión térmica entre 340 K y 1070 K usando obleas de silicio tipo n. Ajustándose los datos mediante un modelo teórico de cálculo de la absorción en el que tiene en cuenta la absorción banda a banda, cargas libres y en la red cristalina. Las medidas las realiza en el rango de 4 y 15 μm observando la variación de índice de refracción y del coeficiente extinción con la temperatura.

En 1978 D. K. Schroder et al. [34] publican un trabajo en el que presentan un modelo de ajuste para la absorción por cargas libres en el c-Si, teniendo en cuenta la absorción por mecanismo de cargas libres, en la región de 2,5 a 20 μm entre 20 a 300 K.

En 1978 H. A. Weaklien et al. [11] publican un trabajo de las propiedades ópticas del silicio en dependencia con la temperatura. Utilizan medidas de transmisión y reflexión en el rango de 458 a 633 nm en un rango de temperatura entre 299 y 516 K. Extrayendo de las medidas el coeficiente de absorción para analizar el cambio del coeficiente de extinción y el índice de refracción.

En 1980 N G Nilsson et al. [35] publica un trabajo sobre el papel de las cargas libres en la absorción en el silicio cristalino. Emplean medidas de transmisión óptica a una longitud de onda de 1,06 μm entre 200 y 500 K de temperatura.

En 1981 G. E. Jellison et al. [36] publican un trabajo sobre las propiedades ópticas del c-Si altamente dopado con medidas de transmisión óptica entre 1,5 y 4,1 eV. Miden los cambios en las propiedades ópticas a través del coeficiente absorción en función del dopado.

En 1982 G. E. Jellison et al. [12] presentan un trabajo donde calculan el coeficiente de absorción en el silicio cristalino a altas temperaturas (<900 °C), utilizando medidas de transmisión óptica a una longitud de onda fija de 1152 nm. Proponen un modelo refinado de la teoría de transición indirecta de fotones en c-Si para la absorción banda a banda, teniendo en cuenta sólo dos mecanismos de activación de la absorción (212 y 670 K) correspondientes a acústica longitudinal y óptica transversal.

En 1983 G. E. Jellison et al. [37] publican un trabajo sobre las propiedades ópticas del silicio cristalino a elevadas temperaturas (10 a 912 K) entre 1,7 y 4,7 eV. Se presentan resultados en función de las constantes dieléctricas (ϵ_1 y ϵ_2) que están relacionadas con el índice de refracción y el coeficiente de extinción.

En 1983 J. M. Moison et al. [38] publican un trabajo en el que se excita una muestra de c-Si con un láser en el rango de 2 a 2,6 eV, midiendo la emisión térmica de la oblea a elevadas temperaturas entre (400 y 800 °C).

En 1987 R. A. Soref et al. [39] presentan un trabajo en el que se calcula la variación del índice de refracción en el c-Si, con excitaciones ópticas empleando un láser en el rango de 1 a 2 μm. En sus resultados demuestran la dependencia de la absorción con la inyección de cargas, que varían debido al nivel de dopado de las muestras.

En 1992 J. C. Sturm et al. [14] publican un trabajo en que se miden los procesos fundamentales que intervienen en la absorción del c-Si a altas temperaturas (<900 °C) y los efectos del dopado. En su trabajo utilizan medidas de transmisión a 1,3 μm y 1,55 μm. Ajustando las curvas con el modelo complementado para el coeficiente de absorción total (α_T) teniendo en cuenta la

absorción banda a banda (α_{BG}) y la absorción por cargas libres (α_{FC}). Para modelar la absorción por banda a banda utilizan el modelo refinado de transición indirecta de fonones, teniendo en cuenta las absorciones acústica (212 K) longitudinal y la óptica transversal (670 K). Para la absorción por cargas libres tiene en cuenta las secciones de captura de los huecos y electrones.

En 1992 J. M. Essick et al. [16] publican un trabajo en el que se caracteriza el ancho de banda prohibida para el c-Si y el Ge mediante medidas de transmisión óptica. Presentan el cálculo de la energía del gap, demostrando que el c-Si es de gap indirecto y el Ge es de gap directo. Calculan la absorción a partir de medidas experimentales hechas en un monocromador utilizando una ecuación que tiene en cuenta las múltiples reflexiones internas en el semiconductor.

En 1993 P. J. Timans et al. [22] publican un trabajo en el que se mide la emisión del c-Si a temperaturas entre 300 y 800 °C en un rango entre 1,1 y 1,6 μm. Para ajustar las medidas de emisión utilizan el modelo de absorción total que tiene en cuenta α_{BG} , α_{FC} y además considera la absorción en la red cristalina (α_L).

En 1997 G. Chen et al. [40] publican un trabajo sobre el efecto del fotón en las propiedades de radiación del c-Si durante el RTA en el rango de temperatura de 300 a 1000 K. Utiliza obleas con diferentes dopados para medir la variación de la absorción en función de la temperatura y del dopado. Sus medidas son ajustadas con el modelo de secciones de captura de electrones y huecos para calcular la absorción por cargas libres.

De los anteriores trabajos se han tomado los resultados que tienen mayor relación con esta tesis y se comparan entre sí, tal y como se muestra en la figura 20. Los datos tomados de la literatura son ajustados mediante el modelo del coeficiente de absorción propuesto en la ecuación (19).

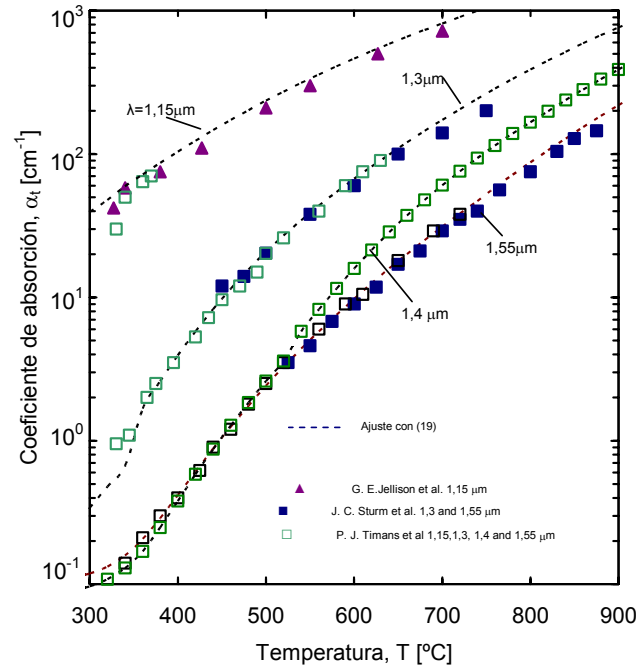


Figura 20. Comparación de los trabajos más relacionados con esta tesis.

En la tabla III se muestra un resumen de los autores resaltando el trabajo realizado y los resultados obtenidos.

Año	Autor	Medida	Rango de medida	Resultado
1958	G.G.Macfarlane et al. [32]	Transmisión	42 K a 1420 K 1 a 1,3 eV	Modelo de α_{BG} mecanismos que intervienen: Absorción banda a banda
1967	T. Sató et al. [28]	Emisión térmica	4 a 15 μm 340 a 1070 K	Modelo α_T para ajustar la emisión con absorción banda a banda, cargas libres y en la red cristalina.
1978	D. K. Schroder et al. [34]	Transmisión	Infrarrojo 2,5 a 20 μm	Variación de α_T con la temperatura
1978	H. A. Weaklien et al. [11]	Transmisión	299 a 516 K Región UV (330-640 nm)	Variación de las propiedades ópticas del c-Si con temperatura
1980	N G Nilsson et al. [35]	Transmisión	400 a 800 °C 1060 nm	Modelo de ajuste de la absorción por cargas libres
1981 /82/83	G. E. Jellison et al. [14-36-37]	Transmisión	1,5 y 4,1 eV 1,7 y 4,7 eV 10 a 970 K 400 a 800 °C 1152 nm	Propiedades ópticas del c-Si con alto dopado Variación de las propiedades ópticas del c-Si, (n y k) Coeficiente de absorción a elevadas temperaturas a una landa fija
1983	J. M. Moison et al. [38]	Transmisión	2 a 2,6 eV 300 a 625 K	Efecto de las cargas libres con la temperatura
1987	R. A. Soref et al. [39]	Transmisión	Infrarrojo 1 a 2 μm	Efecto del dopado en el coeficiente de absorción
1992	J. C. Sturm et al. [14]	Transmisión	400 a 800 °C 1,3 y 1,55 μm	Coeficiente de absorción con temperatura y los mecanismos fundamentales que intervienen
1992	J. M. Essick et al. [16]	Transmisión	300 a 1000 nm	Energía del gap para el c-Si y Ge
1993	P. J. Timans et al. [22]	Emisión con temperatura	1 a 1,6 μm 300 a 800 °C	Nuevo modelo de ajuste α_T
1998	G. Chen et al. [40]	Emisión con temperatura	400 a 800 °C	Efecto del fotón con la temperatura

Tabla III. Antecedentes de absorción con temperatura

3.3. Experimentos y resultados.

Este apartado trata de los experimentos hechos utilizando el equipo de medida óptica, la medición in-situ de la transmisión, determinación del coeficiente de absorción. Así como los mecanismos que lo conforman. También se explica el modelo empleado para los ajustes de medidas utilizando el espectro de emisión de un LED y se comparan los resultados obtenidos con lo publicado por otros autores.

3.3.1. Medida in-situ de la transmisión óptica del c-Si a alta temperatura.

Para el realizar el experimento se utiliza una oblea tipo p con orientación $\langle 100 \rangle$ pulida por ambas caras, de 300 μm de grosor con una resistividad de 0,95 Ωcm. La temperatura inicial del horno es de 300 °C y la señal detectada sin muestra en el camino óptico es de 3,36 mV. Una vez puesta la muestra en el camino óptico la señal cae a un valor de 1,60 mV. Después la temperatura del horno se incrementa en pasos de 20 °C para medir el valor de la tensión hasta llegar a los 800 °C. En la tabla IV se presentan los datos de intensidad y transmisión para 6 valores diferentes de temperatura.

Temperatura [°C]	Tensión [V]	Transmisión
300	0,001601358	0,48609067
400	0,00150648	0,45729063
500	0,001132214	0,34368246
600	0,000537871	0,335884669
700	0,000102846	0,031218961
800	3,31683E-06	0,001006822

Tabla IV. Medida de intensidad transformadas en transmisión utilizando la ecuación (2) del apartado (2.1).

3.3.2. Medida in-situ de α_T de c-Si a altas temperaturas.

Conociendo la transmisión en función de la temperatura, se puede conocer el coeficiente de absorción empleando la ecuación completa (22) mostrada en el apartado (3.1.4.). Para esto es necesario conocer el valor de la reflexión del c-Si. Este valor se puede conocer realizando una medida de transmisión utilizando un espectrómetro en el rango de 300 a 1000 nm y un FTIR para el rango de 1 a 10 μm tal y como se muestra en la figura 21.

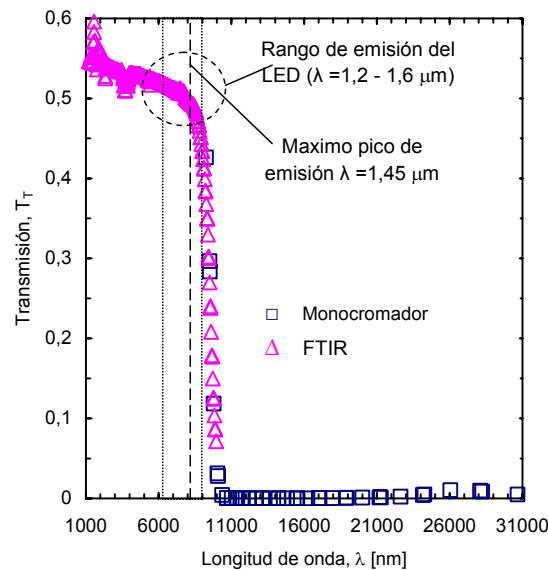


Figura 21. Espectro de transmisión medido con espectrómetro en la región del visible (cuadrados) y un FTIR en la región del infrarrojo (triángulos) para el c-si.

Para calcular el valor de la reflexión en el rango del espectro de emisión del LED (1,2 a 1,6 μm), se parte de la ecuación (21) del apartado (3.1.4.) que define la transmisión en función de la reflexión y del coeficiente de absorción. Si consideramos la región de baja absorción ($\alpha \approx 0$) para c-Si en el rango de 1,2 a 1,6 μm, se simplifica la ecuación quedando [31] [32]:

$$R_T = \frac{1 - T_T}{1 + T_T} \quad (23)$$

Con la ecuación (23) aplicada a los datos de transmisión en el rango del espectro del LED, se obtiene el valor de la reflexión para este rango. En la tabla V se presentan los valores de R_T para el rango de 1,2 a 1,6 μm obtenidos con la ecuación (24). En el cálculo del coeficiente de absorción utilizaremos el valor promedio de valores calculados ($R_T = 0,3277$).

λ [μm]	T_T	R_T
1,2	0,4928	0,3397
1,3	0,5061	0,3378
1,4	0,5124	0,3223
1,5	0,5147	0,3194
1,6	0,5192	0,3194

Tabla V. Valores de R_T para el rango de 1,2 a 1,6 μm calculado con la ecuación (23).

En la figura 22 se muestra la curva medida in-situ de transmisión óptica calculada con la ecuación (2) y el coeficiente de absorción calculado con la ecuación (22). Se observa que a medida que aumenta la temperatura la transmisión disminuye y la absorción aumenta.

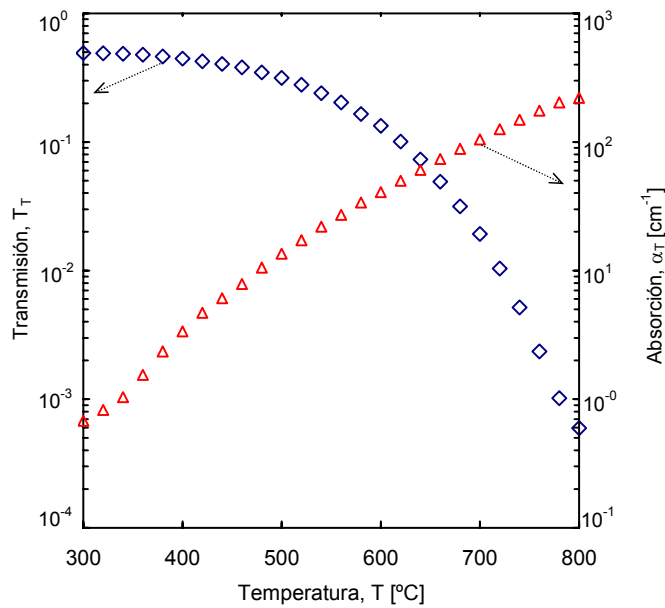


Figura 22. Medida de transmisión in-situ y del coeficiente de absorción del c-Si.

3.3.3. Ajuste del α_T medido con el espectro de un LED.

La teoría presentada para el cálculo de α_T en el apartado (3.1.3) solo sirve para espectros de luz monocromática (láser). En esta tesis se emplea un LED comercial, el cual emite la luz con un espectro de forma gaussiana con un máximo ubicado en (1,42 μm).

En la figura 23 se puede ver la absorción teórica calculada para el c-Si mediante la ecuación (19) para longitudes de onda comprendidas entre 1,2 y 1,6 μm de (rango de emisión del LED), con las datos experimentales obtenidos de α_T en esta tesis.

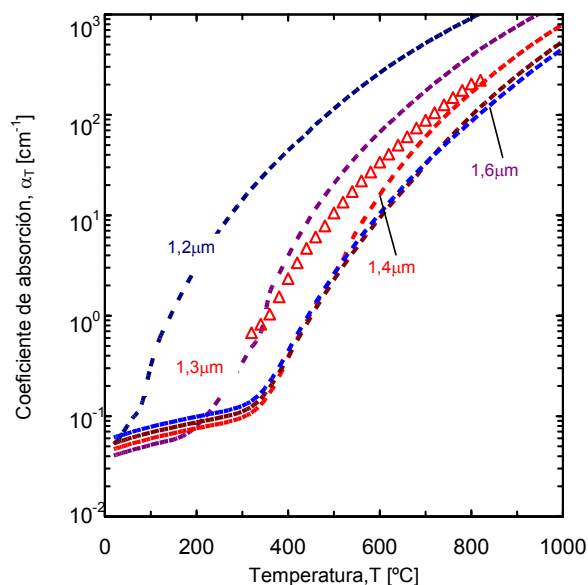


Figura 23. Coeficiente de absorción calculado con la ecuación (20) del apartado (3.1.3.) comparadas con los datos experimentales obtenidos en esta tesis.

Se puede ver claramente que los datos experimentales no ajustan con la teoría para ninguna longitud de onda. Esto requiere que la teoría desarrollada para el coeficiente de absorción medido con una luz monocromática se modifique teniendo en cuenta el espectro de emisión de un LED.

En el apartado (2.2.1) se había hablado sobre las características del LED, y se mostraba en la figura 4 su espectro de emisión real en el rango de 1,2 a 1,6 μm con un máximo en 1,42 μm . Se ha discretizado en pasos de 20 nm, dándole pesos a cada longitud de onda proporcionales a la altura de la señal del espectro. y hemos tomado como 100 % el valor correspondiente a la longitud de onda de 1,42 μm (máximo de emisión). En la discretización se tuvo en cuenta también el espectro del detector, pero la variación es mínima debido a que el rango del espectro del LED coincide con la región plana del espectro del detector. En la

figura 24 se muestra la curva discretizada en pasos de 20 nm. En la tabla VI se presentan los valores y los pesos asignados a cada longitud

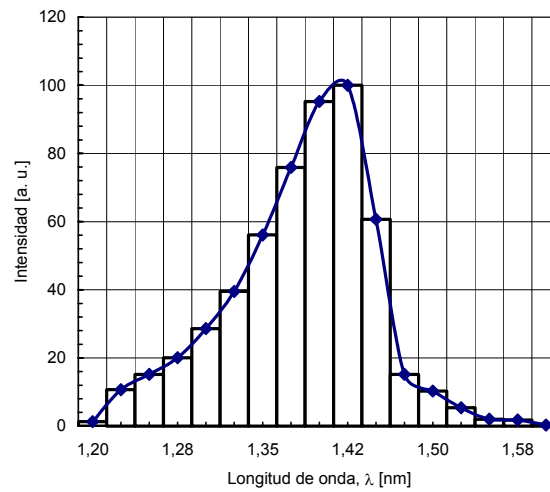


Figura 24. Espectro de emisión del LED- L7850 discretizado.

Landa [nm]	Pesos
1200	0
1220	3,82
1240	6,37
1260	10,48
1280	16,04
1300	25,61
1320	35,80
1340	48,94
1360	59,86
1380	77,97
1400	95,26
1420	100
1440	89,98
1460	57,24
1480	26,29
1500	12,23
1520	4,70
1540	2,62
1560	4,03
1580	1,29
1600	0

Tabla VI. Datos de discretización del espectro de emisión del LED.

El coeficiente de absorción para el LED ($\alpha_{T(LED)}$) será, entonces, la suma ponderada de todos los coeficientes multiplicados por sus correspondientes pesos. α_T es el coeficiente de absorción calculado mediante la ecuación (19). Entonces la $\alpha_{T(LED)}$ utilizando el espectro de emisión de un LED se modifica, calculándose con la siguiente relación:

$$\alpha_{T(LED)} = \frac{\sum_{\lambda_L=1,2\mu m}^{1,6\mu m} \alpha_T(\lambda_L) \times P_L(\lambda_L)}{\sum_{\lambda_L=1,2\mu m}^{1,6\mu m} P_L(\lambda_L)} \quad (24)$$

Donde λ_L varia de 1,2 a 1,6 μm (valor máximo y mínimo del espectro del emisión del LED), P_L es el peso asignado a cada segmento discretizado en la curva del espectro de emisión (ver tabla VI).

En la figura 25 se muestra el coeficiente de absorción del c-Si ajustado mediante la teoría ampliada correspondiente a un LED mediante la ecuación (24) y el ajuste es bueno. También se presentan los mecanismos que lo conforman responsables de la absorción, absorción banda a banda para un LED ($\alpha_{BG(LED)}$) y cargas libres para un LED ($\alpha_{FC(LED)}$).

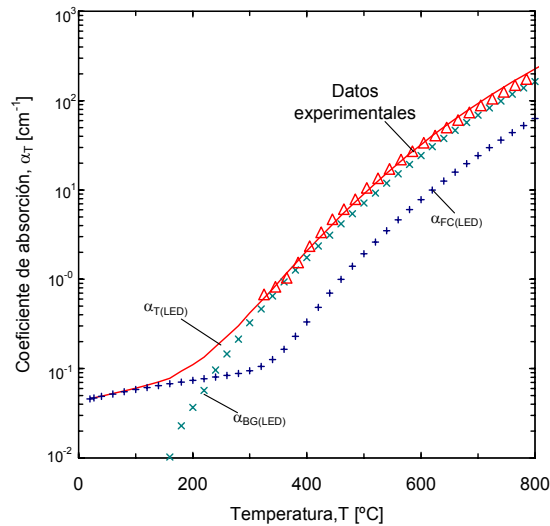


Figura 25. Absorción del c-Si en función de la temperatura a partir de medidas experimentales de transmisión óptica (triángulos) ajustada con la teoría ampliada de la absorción para un LED ($\alpha_{T(LED)}$) ecuación (24). También se muestran los mecanismos que la conforman $\alpha_{BG(LED)}$ y $\alpha_{FC(LED)}$

Los puntos se ajustan bien mediante la teoría ampliada de cálculo $\alpha_{T(LED)}$ (ecuación 25) y se observa que para temperaturas por debajo de los 240 °C el mecanismo que gobierna es el de cargas libres, y para temperaturas superiores a 240 °C el mecanismo que gobierna es el banda a banda. Para cada proceso de absorción $\alpha_{BG(LED)}$ y $\alpha_{FC(LED)}$ se puede conocer el mecanismo que domina en todo el rango de la medida de transmisión óptica con temperatura. En la figura 26 (a) se muestra el $\alpha_{BG(LED)}$ y los 4 mecanismos de absorción que lo conforman, también se puede ver la curva experimental del coeficiente de absorción ajustada con la ecuación (24). Se obtiene que el mecanismo principal que gobierna en todo el rango de medida es el correspondiente a energía relacionada con la absorción óptica transversal ($\theta_2 = 670$ K).

En la figura 26 (b) se muestra el $\alpha_{FC(LED)}$ y los mecanismos que lo conforman. El mecanismo que domina en todo el rango de medida es el relacionado a la sección de captura de los electrones.

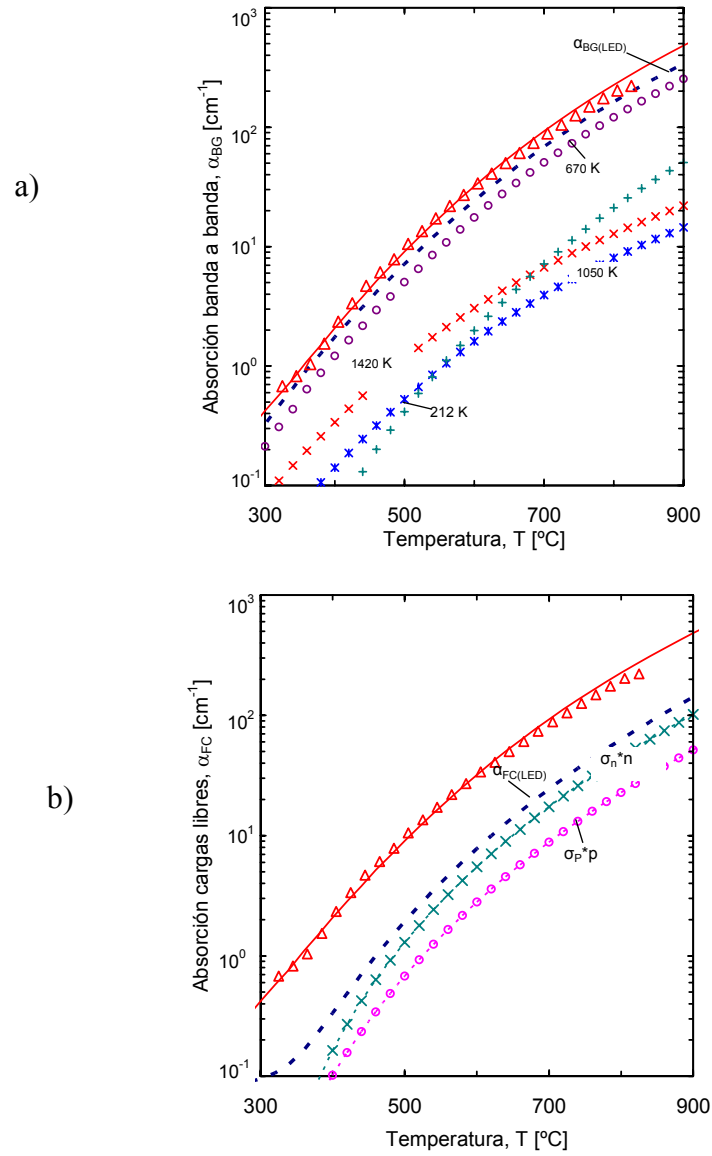


Figura 26. Mecanismos fundamentales que interviene en la absorción banda a banda (a) y absorción por cargas libres (b), ajustada con la ecuación (24).

Ahora se compara la teoría de ajuste modificada para un espectro de un LED con la teoría de ajuste para una luz monocromática. En la figura 27 se puede ver la comparación de los datos experimentales del coeficiente de absorción ajustados con (24) y comparados con los α_T teórica calculada con la ecuación (19). En el rango de emisión del LED (1,2 a 1,6 μm)

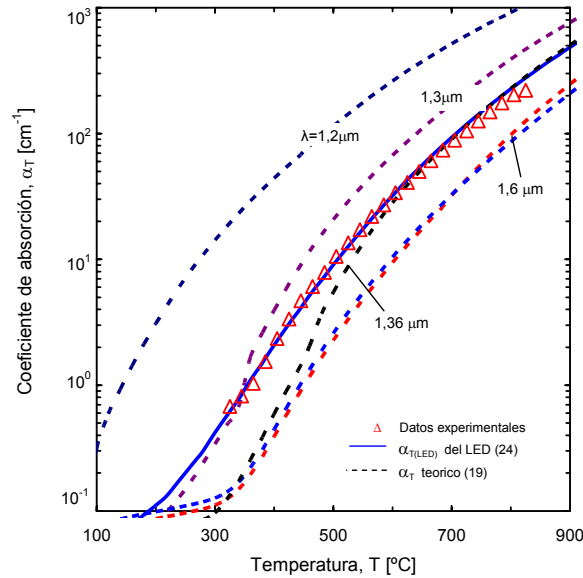


Figura 27. Coeficiente de absorción del c-Si medido experimente (triángulos) ajustados con (24). Comparados con α_T teóricos calculado con la ecuación (19).

Se observa que para temperaturas mayores a los 620 °C el comportamiento de los datos se ajustan a la curva calculada teóricamente mediante la ecuación (20) para una longitud de onda de 1,36 μm. Mientras que para temperaturas por debajo de los 620 °C la curva de 1,36 μm no se ajusta a la experimental, presentando una desviación. Esto es a causa de las contribuciones de las longitudes de ondas cercanas a 1,2 μm del espectro del LED.

3.3.4. comparación del resultado obtenido con otros autores.

Los resultados obtenidos en esta tesis se comparan en la figura 28 con los datos de otros investigadores que utilizaron para hacer sus medidas láseres con longitudes de onda de 1,15 μm, 1,3 μm, 1,4 μm y 1,55 μm. P. J Timans et al. [22] presentan un repaso de los resultados obtenidos por otros autores a estas longitudes de onda, ampliando el rango de medida hasta los 300 °C.

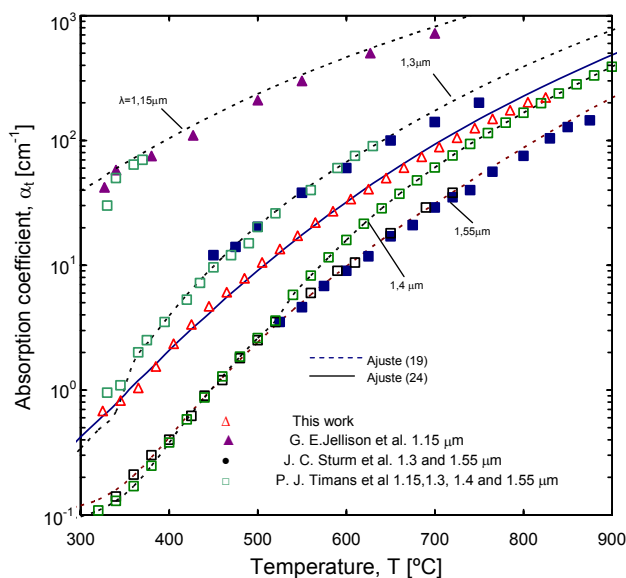


Figura 28. Coeficiente de absorción en función de la temperatura ajustados con la ecuación (24) comparados con los dato publicado por P. J Timans et al. [22].

Los resultados obtenidos en esta tesis son coherentes con los publicados por otros autores, en los que emplearon para sus medidas tecnología de alto costo (láser) y validan el trabajo hecho en esta tesis en el qué se empleo tecnología de bajo coste (LED) para obtener los resultados.

Para conocer la transmisión teórica y ajustar los datos medidos experimentalmente la ecuación que se puede usar es la siguiente, basada en la ecuación (21)

$$T_{T(LED)} = \frac{(1 - R_T)^2 \exp(-\alpha_{T(LED)} \times d)}{1 - R_T^2 \exp(-2\alpha_{T(LED)} \times d)} \quad (25)$$

Donde d es el grosor, $\alpha_{T(LED)}$ coeficiente de absorción calculado para el espectro de un LED, utilizando la ecuación (24) y R_T es la reflexión.

J. C Sturm et al. [31] presentan medidas de transmisión óptica normalizada hechas con láser para longitudes de onda de 1,3 y 1,55 μm utilizando oblea tipo p de 500 μm de grosor. En la figura 29 se comparan los datos de transmisión presentados por Sturm ajustados mediante la ecuación (21) con los obtenidos en esta tesis usando el LED y ajustados mediante la ecuación (25).

Se observa que los datos medidos en esta tesis se corresponden con los publicados en dicho trabajo. En los que empleó para las medidas de transmisión óptica tecnología de alto costo (láser). En esta tesis se ha conseguido implementar una nueva forma de realizar medidas de transmisión óptica usando tecnología de bajo coste.

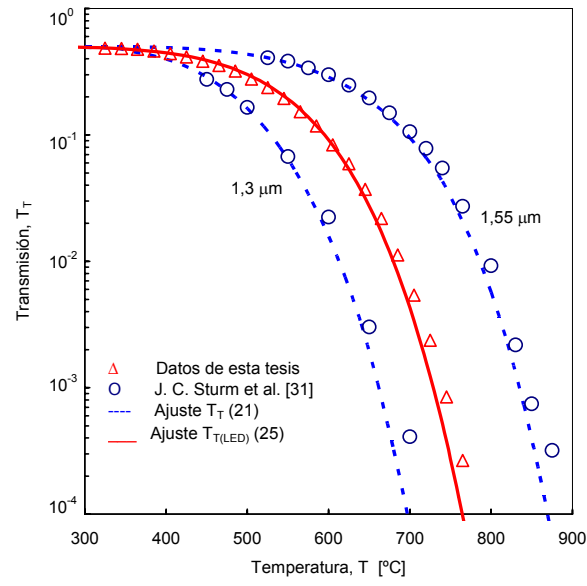


Figura 29. Comparación de los datos experimentales de esta tesis (triángulos) ajustados con (25) comparados con los publicados por los datos J. C. Sturm [31] ajustados con la ecuación (20).