

Capítulo 5.
Conclusiones.

Conclusiones

El primer objetivo de la tesis ha sido diseñar y construir un equipo óptico en un horno de difusión que combine la aplicación de altas temperaturas con medidas in-situ de transmisión óptica, caracterizando el comportamiento térmico de la oblea de silicio empleando el espectro de emisión de un LED comercial de bajo coste en el rango de 1.2 a 1.6 μm . Se concluye que el equipo hace posible reproducir y ampliar el rango de experimentos similares en los que anteriormente se utilizaron equipos sofisticados de alta tecnología (láser) con elevados costos de adquisición.

El segundo objetivo ha sido medir ópticamente la temperatura de la oblea de c-Si, determinar el coeficiente de absorción de c-Si en el rango de emisión del LED y los mecanismos fundamentales que intervienen (absorción banda a banda y por cargas libres), calculando el coeficiente de absorción empleando la teoría desarrollada en los últimas décadas. Los últimos que han trabajado sobre este tema fueron P. J. Timans et al. [22] quienes presentaron un modelo más completo para el ajuste de las curvas del coeficiente de absorción con temperatura para luz monocromática.

Para ajustar las curvas experimentales se ha ampliado la teoría de cálculo del coeficiente de absorción para una luz monocromática al espectro de emisión de un LED. Sumando las contribuciones de las longitudes de ondas que conforman el espectro de emisión del LED. En este caso el rango del espectro es de 1.2 a 1.6 μm con un pico máximo en 1.42 μm . Calculando la absorción para cada longitud de onda que lo conforman. Subdividiéndola en pasos de 20 nm y dándole un peso a cada segmento subdividido en todo el rango del espectro.

Se concluye que el LED a temperaturas superiores a los 620 $^{\circ}\text{C}$ se comporta como una luz monocromática de 1.36 μm . A temperaturas menores a los 620 $^{\circ}\text{C}$,

el espectro del LED no se comporta como una luz monocromática. Esto es debido a las contribuciones de las longitudes de onda cercanas a 1.2 μm, en las cuales el mecanismo que predomina es la absorción banda-banda (α_{BG}) y que no permiten dejar ver el cambio que presenta la curva teórica de 1.36 μm en este rango de temperatura.

Los resultados calculados al compararlos con los datos de otros trabajos hechos con medidas aplicando luz monocromático (láser) de 1.15, 1.3, 1.4 y 1.55 μm coinciden bien. Se concluye que para temperaturas menores a 240 °C el mecanismo que domina es de las cargas libres, y para temperaturas mayores a 240 °C el mecanismo que pasa a dominar es la absorción banda a banda.

En la absorción banda a banda el mecanismo que domina en todo el rango de medida es el correspondiente a la energía equivalente en temperatura de $\theta_2 = 670$ K, el cual está relacionado con la absorción óptica transversal de fonones de la red cristalina de c-Si.

En la absorción por efecto de cargas libres (α_{FC}) el mecanismo que domina en todo el rango de medida es el que corresponde a la secciones de captura relacionadas con los electrones ($\sigma_n * n$). Esto es a causa de la conductividad intrínseca del c-Si a altas temperaturas. El dopante de las obleas tipo p utilizado en este trabajo ($N_A = 1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) es demasiado bajo para que tenga una contribución importante en la absorción.

El último objetivo de esta tesis es comprobar por diferentes métodos ópticos el proceso de cristalización de las capas de a-SiC_x:H intrínsecas y dopadas con fósforo con medidas in-situ o ex-situ.

Conclusiones

Con las medidas de FTIR en el rango de 1 a 10 μm se confirmó la presencia de enlaces monohidridos (Si-H) en 2016 cm⁻¹ (496 μm) y polihidridos (Si-H₂) en 2100 cm⁻¹ (476 μm). En la capa intrínseca es mayor la presencia de estos enlaces que en la capa dopada.

El cambio de las propiedades ópticas que ocasiona el recocido es mayor en la capa dopada que en la intrínseca, la absorción para la capa dopada con fósforo es mayor en todo el rango de medida y aumenta aun más en el rango de 3000 a 1000 cm⁻¹ (3,33 a 10 μm). En cambio, en la capa intrínseca la absorción se mantiene constante en todo el rango de medida.

El cambio que sufre la capa dopada después del recocido se refleja en el coeficiente de extinción (k_e) el cual muestra un cambio en siete órdenes de magnitud mayor que el de la capa intrínseca. El coeficiente de refracción (n_e) es mayor en la capa intrínseca que en la capa dopada, manteniéndose constante en todo el rango de medida (1 a 10 μm).

Se puede concluir que los cambios en el coeficiente de extinción dependen en gran medida del dopado de la capa después del recocido. El coeficiente de refracción depende solo del recocido. La combinación de dopado con el recocido cambia significadamente las propiedades ópticas de la capa dopada, aumentando la k_e y disminuyendo la n_e .

Para medias superiores de las 2 μm el mecanismo que domina en el proceso de absorción es el de α_{FC} . A partir de 6 μm hay que sumar la absorción en la red cristalina (α_L).

Conclusiones

En las medidas in-situ de difracción de rayos X (XDR) se verifica la formación de tres picos característicos de difracción debido al crecimiento aleatorio de los cristales de Si con orientaciones cristalográficas $\langle 111 \rangle$, $\langle 220 \rangle$, $\langle 311 \rangle$ situados en los ángulos de 28,9°, 47,5° y 56,4° grados con predominante orientación en la dirección $\langle 111 \rangle$.

Se concluye también que en la capa dopada de 300 nm de grosor cristaliza al hacerle un recocido de 1h y 30 minutos a 800 °C, presentando en la medida de XDR los picos de difracción. En la capa intrínseca no presenta picos de difracción en la medida de XDR después de 1h y 30m de recocido a 800 °C, indicando que aun se mantiene en estado amorfo.

Con medidas in-situ se verificó el crecimiento de este pico en la orientación $\langle 111 \rangle$ confirmando que en la capa dopada empieza a formarse en los primeros 30 minutos de haber alcanzado la temperatura de proceso, luego en los siguientes 30 minutos el pico se forma con mayor intensidad indicando que la fase de cristalización ha ocurrido.

En la capa intrínseca se empieza a intuir una formación de pico en la orientación $\langle 111 \rangle$ a partir de la primera hora de proceso y en la segunda hora el pico se forma con mayor claridad, indicando que en la capa intrínseca el proceso a esta temperatura ocurre más lentamente.

Con las medidas de UV se concluye que la intensidad del pico en la capa dopada aparece con mayor intensidad en 276 nm luego del recocido de 1h y 30 m, indicando que la capa dopada alcanza la fase cristalina en este tiempo de recocido. En la capa intrínseca no presenta pico en 276 nm indicando que su

Conclusiones

estado sigue siendo amorfo con este tiempo de cristalización y a esta temperatura.

De las medidas in-situ con de la fase de cristalización de capas de a-SiC_x:H intrínsecas y dopadas con fósforo utilizando el equipo de transmisión óptica, se concluye que durante el paso de la liberación de hidrógeno se detecta un cambio. La transmisión de la capa con sustrato es 0,42 y la de intrínseca es de 0,44. Luego al terminar los 30 minutos de la liberación del hidrógeno ambas capas transmiten el mismo valor de señal 0,41. Durante todo el resto del proceso el comportamiento de las capas es similar y no se detecta cambio que se pueda relacionar con el cambio de fase de amorfo a cristalino. La configuración del equipo al emplear un espectro de emisión en este rango (1,2 a 1,6 μm), no permite medir a 800 °C el cambio de fase de amorfo a cristalino. Debido al efecto de la absorción en el sustrato de c-Si que aumenta con la temperatura.

Las líneas futuras en la que se puede seguir investigando empleando el equipo de medida óptica con temperatura son:

1. Monitorizar in-situ la fase de la cristalización de las capas a-SiC_x:H cambiando la configuración del equipo óptico midiendo en reflexión con luz en el ultravioleta en el rango de 275 nm.
2. Hacer un estudio en el que se combine la fase de cristalización con la difusión in-situ para fabricar emisores de células solares de alta eficiencia. Empleando diferentes temperaturas, tiempos de recocidos.

3. Hacer un estudio teórico del efecto del dopado en obleas tipo p al coeficiente de absorción durante del recocido a elevadas temperaturas. Para estimar la temperatura superficial de la oblea (en el interfaz a-SiC_x/c-Si). Un aumento de la temperatura a causa del alto dopado (aumento de la absorción por cargas libres) podría elevar significativamente la temperatura superficial y ocasionar la cristalización más rápida de las capas a-SiC_x dopadas.