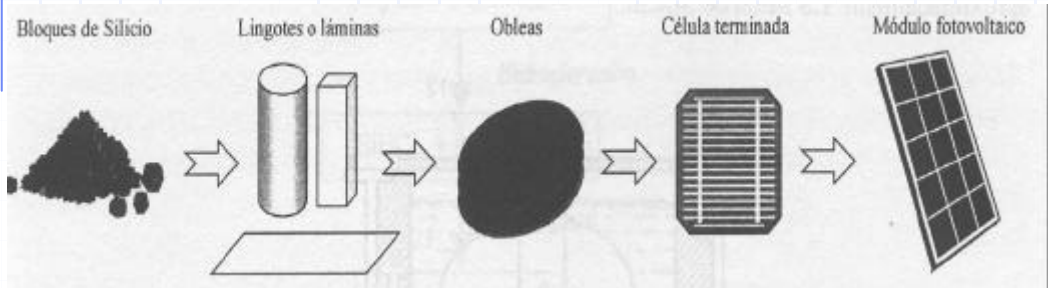


Tecnología fotovoltaica

◆ Proceso de fabricación de células y paneles FVs



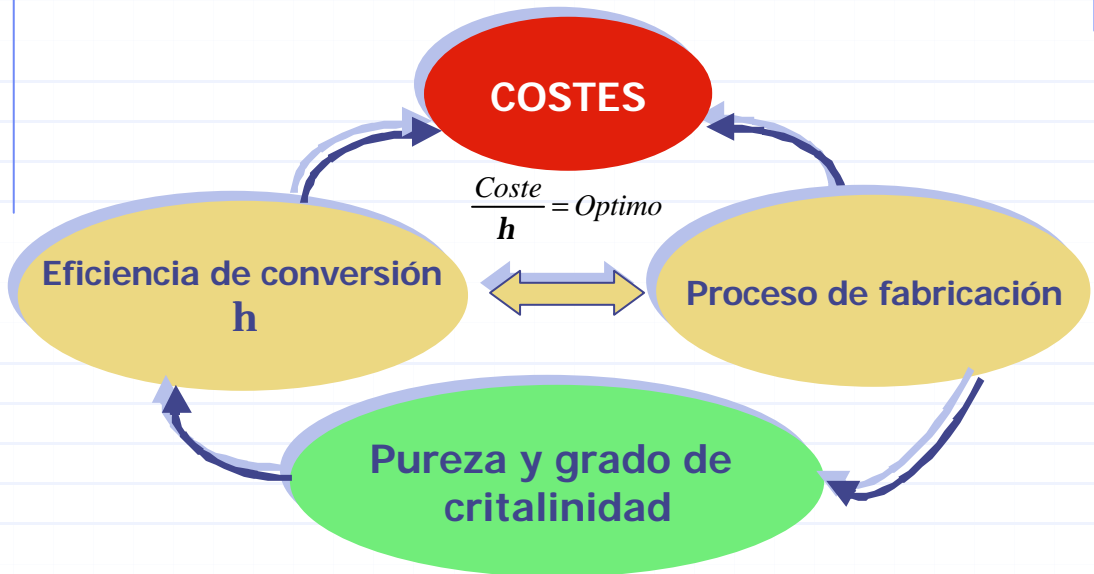
Tecnología fotovoltaica

◆ Proceso de fabricación de células y paneles FVs

F A S E S	I	Tratamiento de arenas de cuarzo	40%	C O S T E S
	II	Cristalización y laminación del Si		
	III	Transformación de obleas en células	30%	
	IV	Interconexión y encapsulado en módulos	30%	

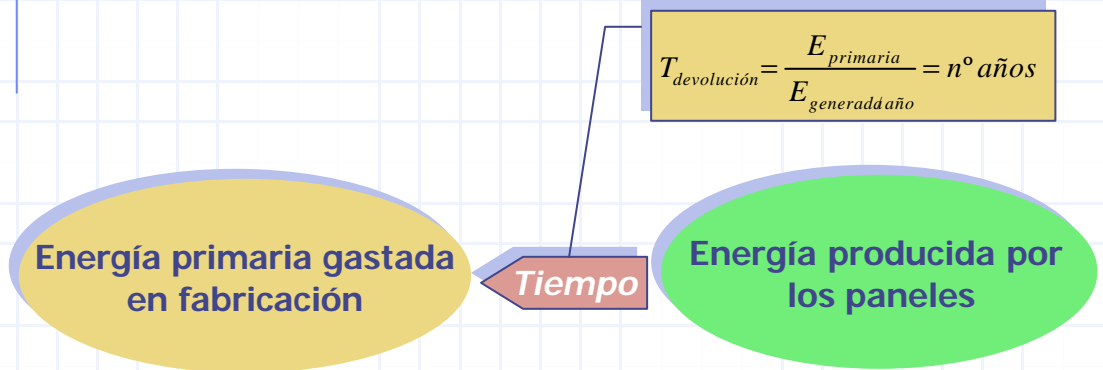
Tecnología fotovoltaica

◆ Eficiencia de conversión **VS** Proceso de fabricación



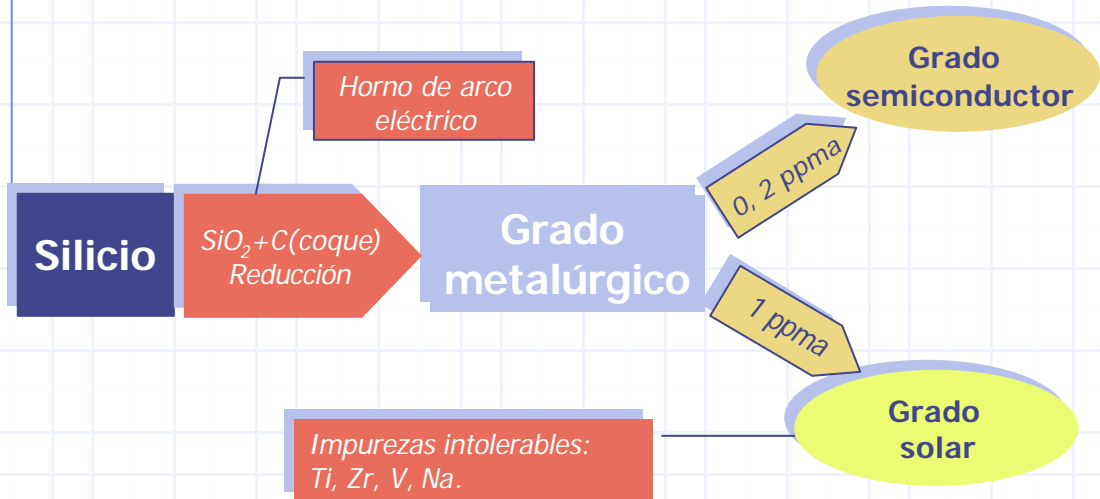
Tecnología fotovoltaica

◆ Evaluación de costes de fabricación



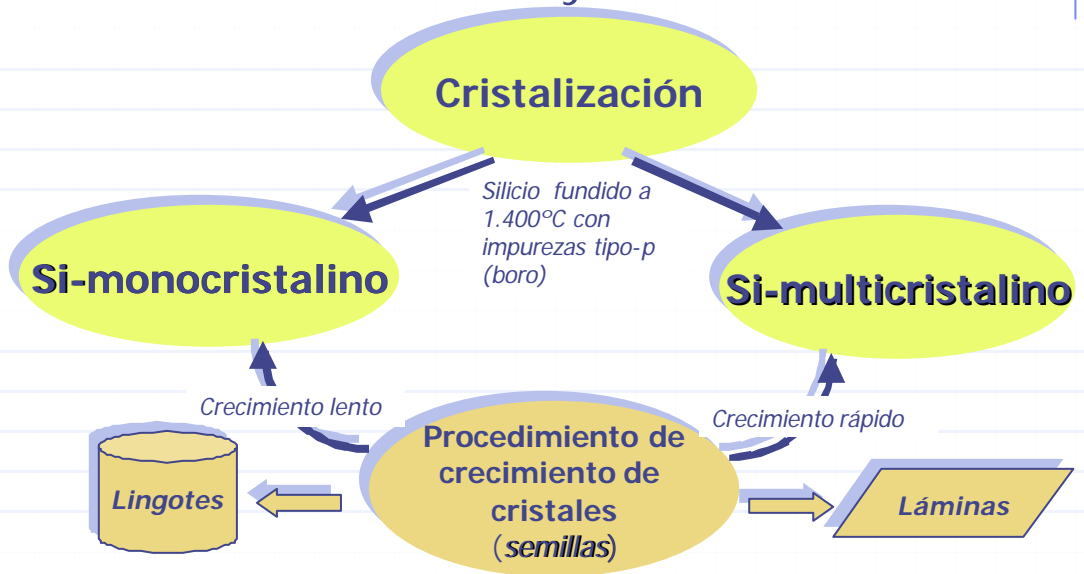
Tecnología fotovoltaica

◆ Fase I: obtención del silicio



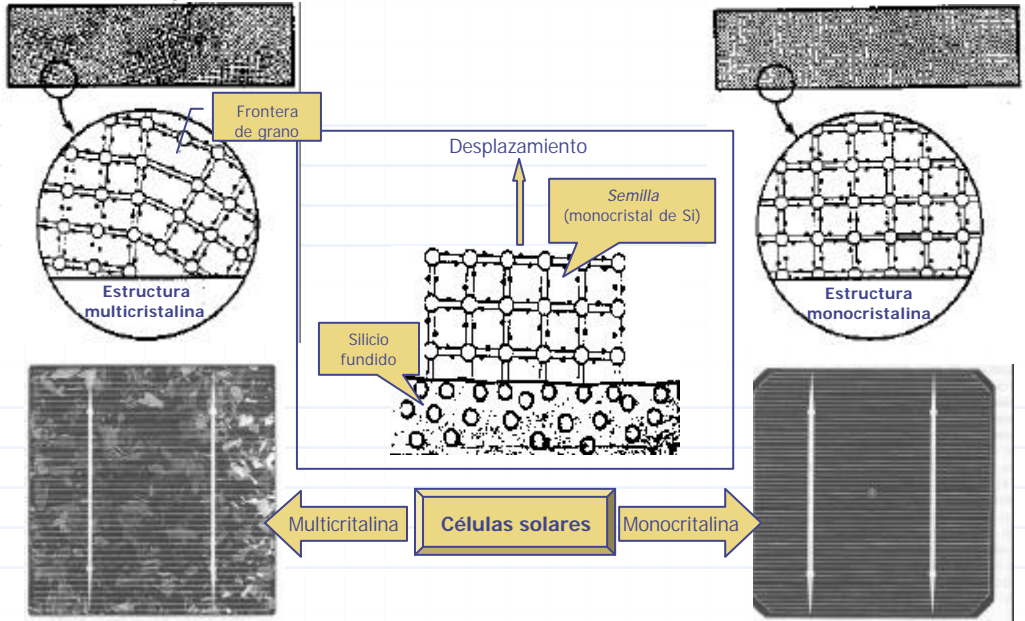
Tecnología fotovoltaica

◆ Fase II: cristalización y laminación del silicio



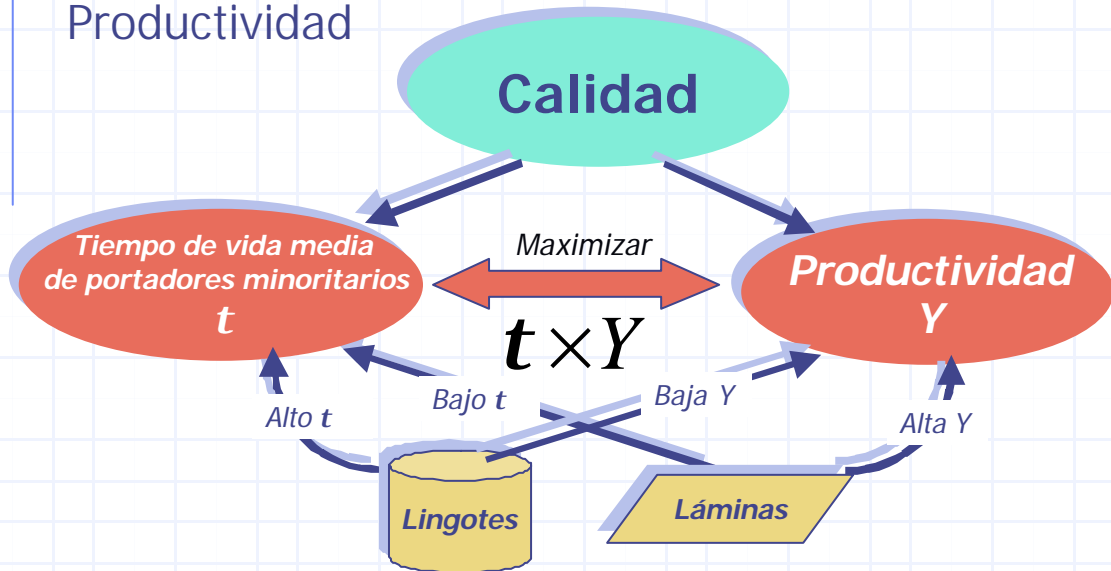
Tecnología fotovoltaica

Fase II: Esquema de crecimiento de cristales (semillas).



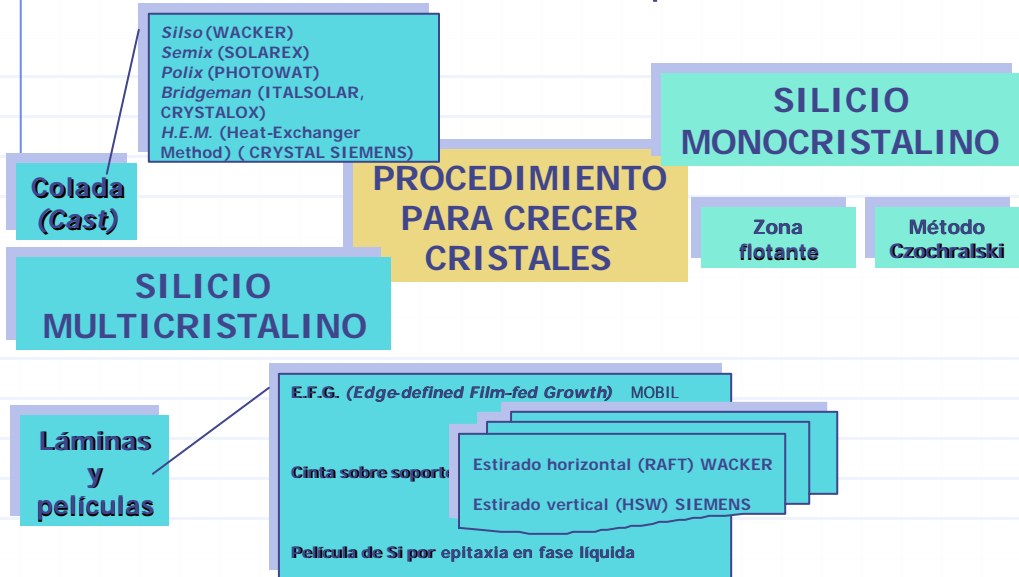
Tecnología fotovoltaica

- ◆ Fase II: Tiempo de vida media de portadores **VS** Productividad



Tecnología fotovoltaica

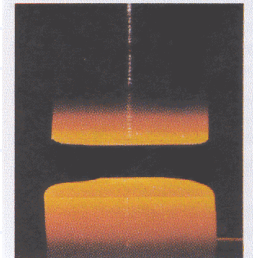
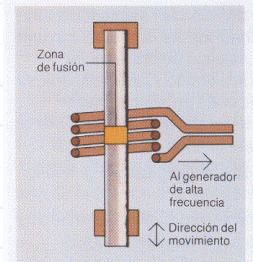
◆ Fase II: Procedimientos para crecer silicio



Tecnología fotovoltaica

◆ Método de Zona Flotante (*Si-ZF*)

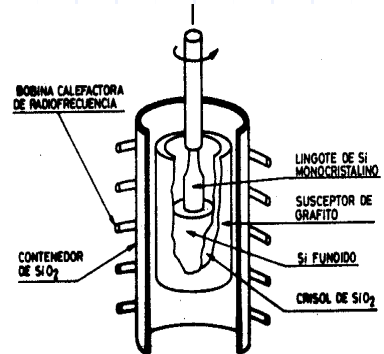
- **Si-monocristalino**
 - ◆ Gran CALIDAD ($\tau \cong 1\text{ms}$)
- Segregación de impurezas
- Velocidad de crecimiento: 0,3-0,5 cm/min
- Tamaño de lingote: 12,5 cm \varnothing x100 cm longitud
- **Células de alta eficiencia (23,3%)**



Tecnología fotovoltaica

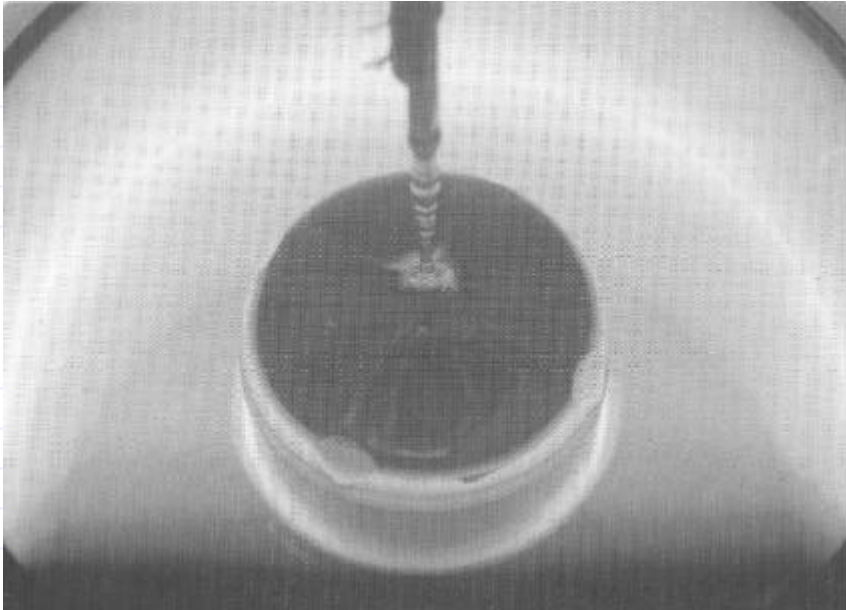
◆ Método Czochralski (Si-CZ)

- Si-monocristalino
 - ◆ Suficiente CALIDAD ($\tau \cong 100\mu\text{s}$)
- Crisol fuente de impurezas (O_2, C)
- Velocidad de crecimiento: 0,1-0,2 cm/min
- Tamaño de lingote: 15 cm \varnothing x 1 m longitud
- Células comerciales. Eficiencia del 12 al 14%



Tecnología fotovoltaica

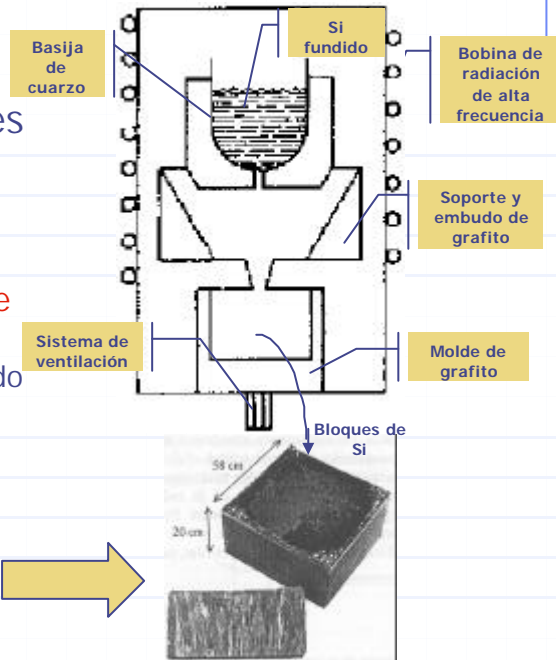
◆ Método Czochralski (*Si-CZ*)



Tecnología fotovoltaica

◆ Método de Colada (Cast)

- Si-multicristalino: lingotes
- Métodos específicos de cada fabricante
 - ◆ Fundido en moldes de grafito (No segregación de impurezas)
 - Enfriamiento desplazando verticalmente el crisol con respecto a la zona calefactora
 - Método H.E.M.: el Si se enfría y solidifica en el crisol



Tecnología fotovoltaica

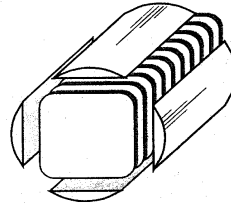
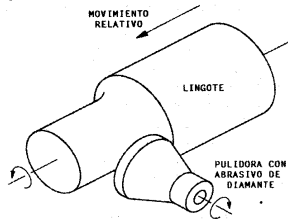
◆ Método de Colada (*Cast*)

- Alta productividad: sencillez de proceso y equipos
- Fronteras de grano: alta probabilidad de recombinación
 - ◆ Tiempo de vida media bajo (1 a 10 μ s)
- Eficiencia de conversión energética
 - ◆ Células comerciales (100 cm²) 12 al 14%
 - ◆ Células industriales 15,8%
 - ◆ Células record de laboratorios 17,8%

Tecnología fotovoltaica

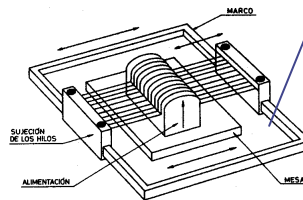
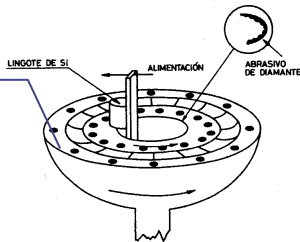
◆ Corte de los lingotes en obleas

■ Pulido y corte



■ Procedimientos de corte

Sierra de A interno

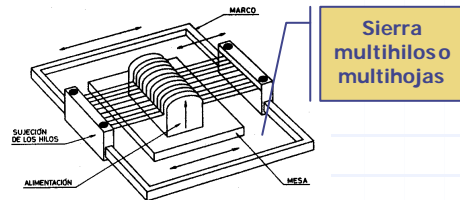
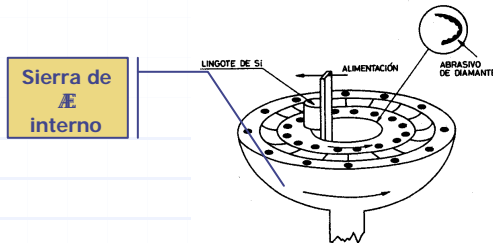


Sierra multihilos o multihojas

Tecnología fotovoltaica

◆ Procedimientos de corte

- Sierras de diámetro interno
 - ◆ Proceso muy lento (30 obleas/hora). **Baja productividad.**
- Sierras multihilo
 - ◆ Aumento de productividad



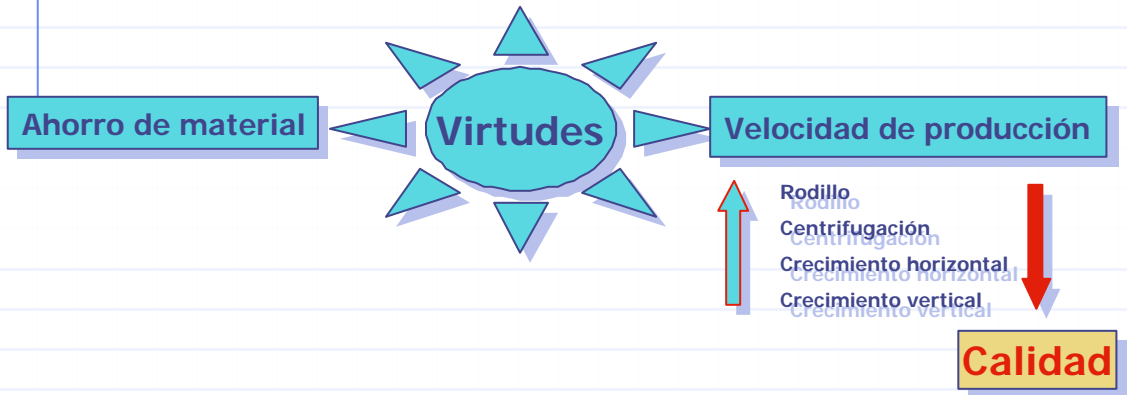
Tecnología fotovoltaica

◆ Coste del proceso de corte: Muy costoso

- Se desperdicia casi la mitad del material cristalino
 - ◆ *Kerf loss = pérdidas de material por aserrado*
- Consumo de energía
 - ◆ Cristalización + corte (sierra con \emptyset interior): obleas de $450\mu\text{m}$
 - Método CZ 930 kWh/m²
 - Multicristalino 743 kWh/m²
 - ◆ Con sierra multihilo (tendencia): obleas de $200\mu\text{m}$
 - 283 kWh/m²

Tecnología fotovoltaica

- ◆ Crecimiento de láminas y películas de silicio cristalino: Si-multicristalino



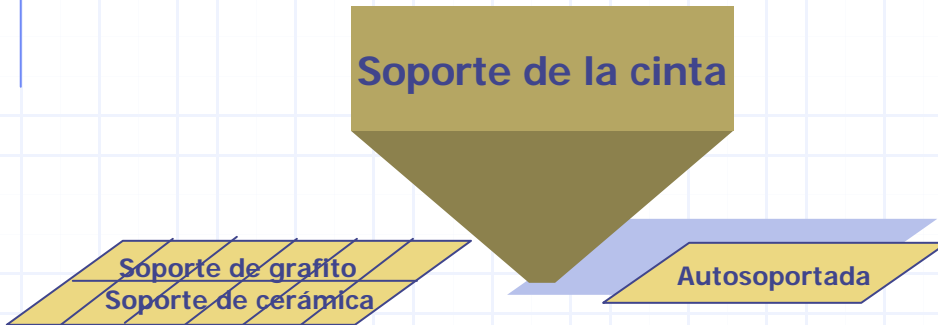
Tecnología fotovoltaica

- ◆ Crecimiento de láminas y películas de silicio cristalino: Si-multicristalino



Tecnología fotovoltaica

- ◆ Crecimiento de láminas y películas de silicio cristalino.



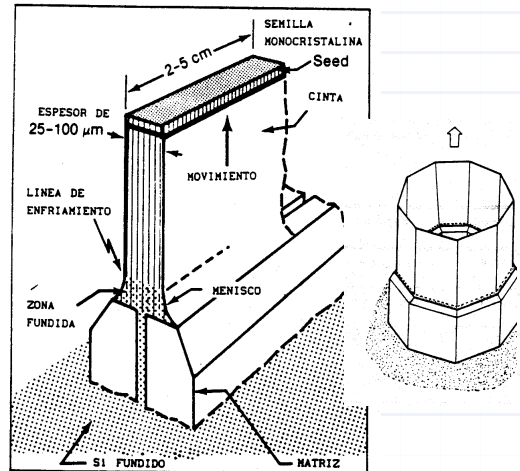
Tecnología fotovoltaica

◆ Crecimiento de láminas y películas de silicio cristalino.

■ Método EFG (*Edge-defined Film-fed Growth*). MOBIL

- Si-monocristalino
- Lámina por extrusión con matriz de grafito
 - Si fundido asciende por capilaridad
 - Se utiliza *semilla cristalina*
- Velocidad de producción 160 cm²/min
- Matriz poligonal de 8, 9 y 10 cm/cara

- Problemas de estabilización de la interfase líquido-sólido: Si-multicristalino
- Múltiples defectos



Tecnología fotovoltaica

◆ Crecimiento de cinta sobre soporte

- **Si-multicristalino**
- La malla del material soporte se sumerge en el silicio fundido

Ventajas

- ☺ Velocidad de crecimiento elevada
- ☺ Capas muy delgadas (50 μm)
- ☺ Fácil control de temperatura

Inconvenientes

- ☹ La calidad depende del sustrato
- ☹ El sustrato puede ser contaminante

Eficiencia de conversión energética 16%

Tecnología fotovoltaica

◆ Crecimiento de cinta sobre soporte

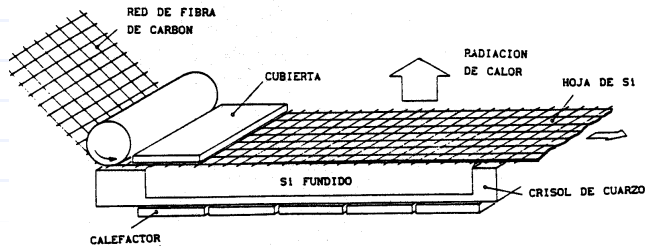
- Método RAFT (Ramp Assisted Foil Technique)
- **Si-multicristalino**
- La malla del material soporte se sumerge en el silicio fundido
- Estirado vertical
- Soporte reutilizable (superficie recubierta con material que facilita la separación del Si)
- Velocidad de crecimiento 10 m/min.
- Espesor 150-250 μm

Eficiencia de conversión energética 10%

Tecnología fotovoltaica

◆ Crecimiento de cinta sobre soporte

- Método HSW (Horizontal Supported Wed)
- **Si-multicristalino**
- La malla del material soporte se sumerge en el silicio fundido
- Estirado horizontal
- Soporte fibra de carbón



Tecnología fotovoltaica

◆ Crecimiento de cinta sobre soporte

- Método HSW (Horizontal Supported Wed)

Ventajas

☺ Mayor superficie de contacto entre fases

⇒ Favorece la disipación del calor

⇒ Mayor velocidad de crecimiento

Inconvenientes

☹ Dificil control del espesor de la capa

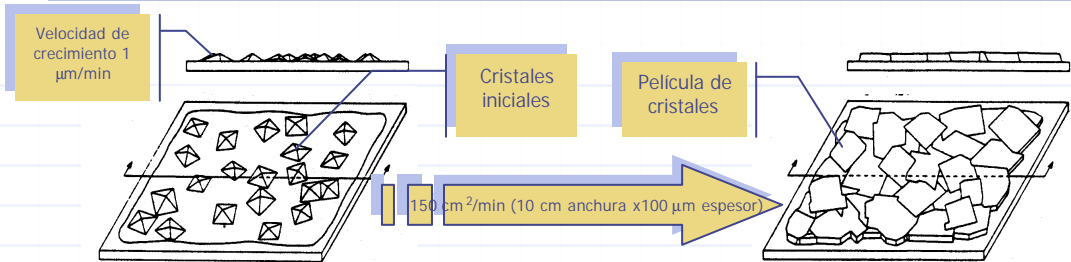
Eficiencia de conversión energética 11%

Tecnología fotovoltaica

- ◆ Crecimiento de láminas y películas de silicio cristalino.
- ◆ **Epitaxia en fase líquida**

Epitaxia

Proceso de crecimiento de una lámina delgada de un material cristalino sobre otra de igual o distinta naturaleza cristalina.



Tecnología fotovoltaica

- ◆ Crecimiento de láminas y películas de silicio cristalino.
- ◆ **Epitaxia en fase líquida**

Epitaxia

Proceso de crecimiento de una lámina delgada de un material cristalino sobre otra de igual o distinta naturaleza cristalina.



Tecnología fotovoltaica

◆ Crecimiento de silicio en cinta. Resumen

Método	Compañía	Características	Velocidad de crecimiento	Eficiencia máxima
WEB	Westhighose	membrana entre dos filamentos	1-2 cm/min	17%
EFG	Mobil Solar	capilaridad a través de un molde de grafito	2-3 cm/min	16%
MS	Hoxan	centrifugación en un molde de grafito		12%
RAFT	Wacker	recubrimiento de un sustrato reutilizable	1000 cm/min	10%
HSW	Siemens	impregnación de una malla de grafito	100 cm/min	11%
SSP	Fraunhofer ISE	fusión zonal de una capa de polvo de silicio	2-3 cm/min	13%