



Risen HJT Hyper-ion: Libro Blanco

El Desarrollo y Aplicación Industrial de las Obleas de Silicio Ultrafinas

Enero, 2023

RISEN ENERGY Co., LTD



SUMARIO

1. Introducción	1
2. Desarrollo y Producción em Masa de Células HJT Basadas em Obleas de Silicio Ultrafinas	2
2.1 Efecto de las obleas de silicio ultrafinas en la eficiencia de las células HJT	2
2.2 Efecto de las obleas de silicio ultrafinas en el rendimiento de producción de las células HJT.....	6
3. Desarrollo y Pruebas de Fiabilidad de la Tecnología de Encapsulación de Células Ultrafinas	9
3.1 Condiciones de prueba con carga elevada.....	10
3.2 Condiciones de ensayo de envejecimiento acelerado.....	12
4. Consideraciones y Perspectivas	14

1. Introducción

El libro blanco publicado anteriormente sobre la tecnología de heterounión (HJT) de Risen, sobre la línea de productos Hyper-ion, titulado "[Desarrollo y industrialización de pastas de metalización con bajo contenido de plata](#)"^①, enfatizó la búsqueda de la optimización de los recursos, a través de la Investigación y el Desarrollo, como clave para la industrialización de la tecnología HJT. Los costes de las obleas de silicio, la pasta de metalización y los equipos representan más del 90% del coste total de producción de las células HJT, como puede verse en la figura 1.1. Por tanto, centrarse en la optimización de estas tres áreas ha permitido que estas células sean competitivas para la industria fotovoltaica (FV).

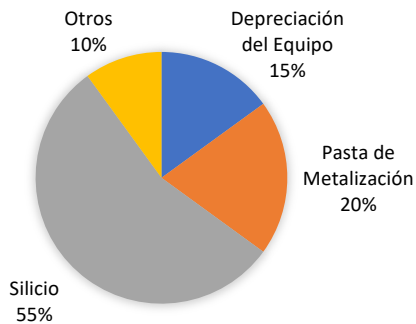


Figura 1.1 - Composición de Custos de las Células



Figura 1.2 - Célula Ultrafina HJT Risen

Se pueden tomar muchas medidas para reducir el coste de las obleas de silicio, de las cuales la más directa y eficaz es reducir su grosor. El proceso de pasivado superficial de doble cara a baja temperatura, junto con la estructura totalmente simétrica de las células HJT, permiten producir en masa obleas más finas sin comprometer la eficiencia y el rendimiento de las células. Además, la reducción del grosor de las obleas se traduce en una mayor flexibilidad, creando más posibilidades de diseño de células y módulos. Como se ilustra en la figura 1.2, la célula HJT con obleas de silicio ultrafinas producida por Risen tiene una flexibilidad y una capacidad de plegado excelentes.

Tras años de inversiones en investigación y desarrollo (I+D) destinadas a mejorar la tecnología HJT, Risen ha logrado avances significativos en el desarrollo técnico y la aplicación industrial de obleas de silicio ultrafinas. En la actualidad, la empresa cuenta con una producción masiva de células y módulos con obleas de silicio de 110µm de grosor, así como con capacidad para producir células con obleas aún más finas, de menos de 100µm.

① Conta oficial do Risen: <https://en.risenenergy.com/uploads/20230828/77456af7682eb30d9b8f409bc2da4c59.pdf>

2. Desarrollo y Producción en Masa de Células HJT Basadas em Obleas de Silicio Ultrafinas

Como ya se ha mencionado, el coste de las obleas de silicio constituye la mayor parte de los costes totales de las células, por lo que unas obleas más finas son la forma más directa y eficaz de optimizar estos costes. Conviene reiterar que la tecnología HJT es muy compatible con las obleas ultrafinas, ya que cuenta con células completamente simétricas, pasivación superficial por las dos caras a baja temperatura, así como la baja temperatura de todo su proceso de fabricación, siempre inferior a 200 °C.

Además, la producción de células HJT ultrafinas ayuda a evitar problemas como la deformación y los daños en las obleas de silicio, que suelen darse en las estructuras asimétricas y los procesos de alta temperatura que se observan en las tecnologías de células PERC y TOPCon. El uso de obleas de silicio ultrafinas es, por tanto, un indicador significativo de la tecnología de células HJT de tercera generación. Sin embargo, durante la producción de células y módulos con obleas de silicio ultrafinas deben afrontarse algunos retos prácticos. Entre estos retos figuran:

- a) ¿Afecta el uso de obleas de silicio ultrafinas a la eficiencia de las células?
- b) ¿Afecta el uso de obleas de silicio ultrafinas a la tasa de rendimiento de la línea de producción de células?
- c) ¿Afecta el uso de obleas de silicio ultrafinas a la calidad y fiabilidad de los módulos?

2.1 Efecto de las obleas de silicio ultrafinas en la eficiencia de las células HJT

En general, el grosor de las obleas tiene un impacto significativo en el rendimiento de la célula en términos de absorción de luz^[1]. Según el cálculo del modelo de célula ideal, se necesitarían obleas con un espesor de 280 μm para absorber toda la luz incidente. Además, existe una relación lineal entre el grosor de las obleas de silicio y la absorción de la luz, de forma que cuanto más fina es la oblea, mayor es la transmisión de la luz, como se muestra en la Figura 2.1.

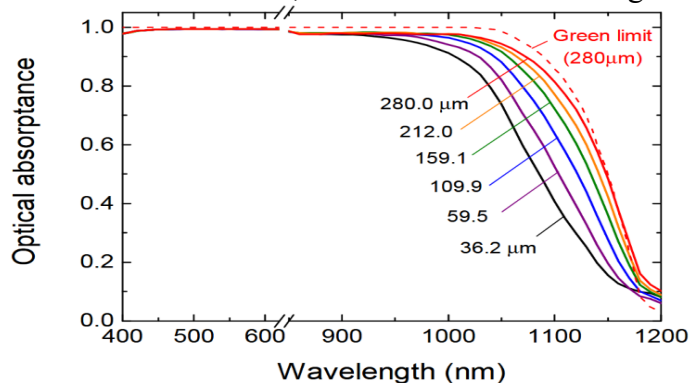


Figura 2.1 - Relación entre el espesor de la oblea y la absorción de la luz

^[1] Hitoshi Sai et al 2018 Jpn. J. Appl. Phys. 57 08RB10 (<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RB10>)

La cantidad de luz absorbida afecta directamente a la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) de la célula. A medida que disminuye el grosor de la oblea de silicio, se absorben menos longitudes de onda de luz, por lo que la densidad de corriente de cortocircuito muestra un descenso casi lineal, como se muestra en la Figura 2.2 (a).

Por otra parte, el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) muestra un comportamiento opuesto al de la corriente de cortocircuito. A medida que disminuye el grosor de la oblea, V_{oc} aumenta, de forma aproximadamente lineal, como puede verse en la Figura 2.2 (b).

Otro parámetro importante, el factor de llenado, también conocido como factor de forma (FF), no cambia significativamente debido al grosor de la oblea, mostrando una ligera tendencia a disminuir y puede considerarse que permanece constante, como se muestra en la Figura 2.2 (c).

Así, los cambios en el grosor de las obleas de silicio dan lugar a una relación de vaivén entre la densidad de corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto, con el factor de llenado como eje.

Partiendo de la definición original de eficiencia de conversión, se deriva una fórmula que incluye los tres principales parámetros de rendimiento eléctrico J_{sc} , V_{oc} y FF, como se muestra en la fórmula f1.

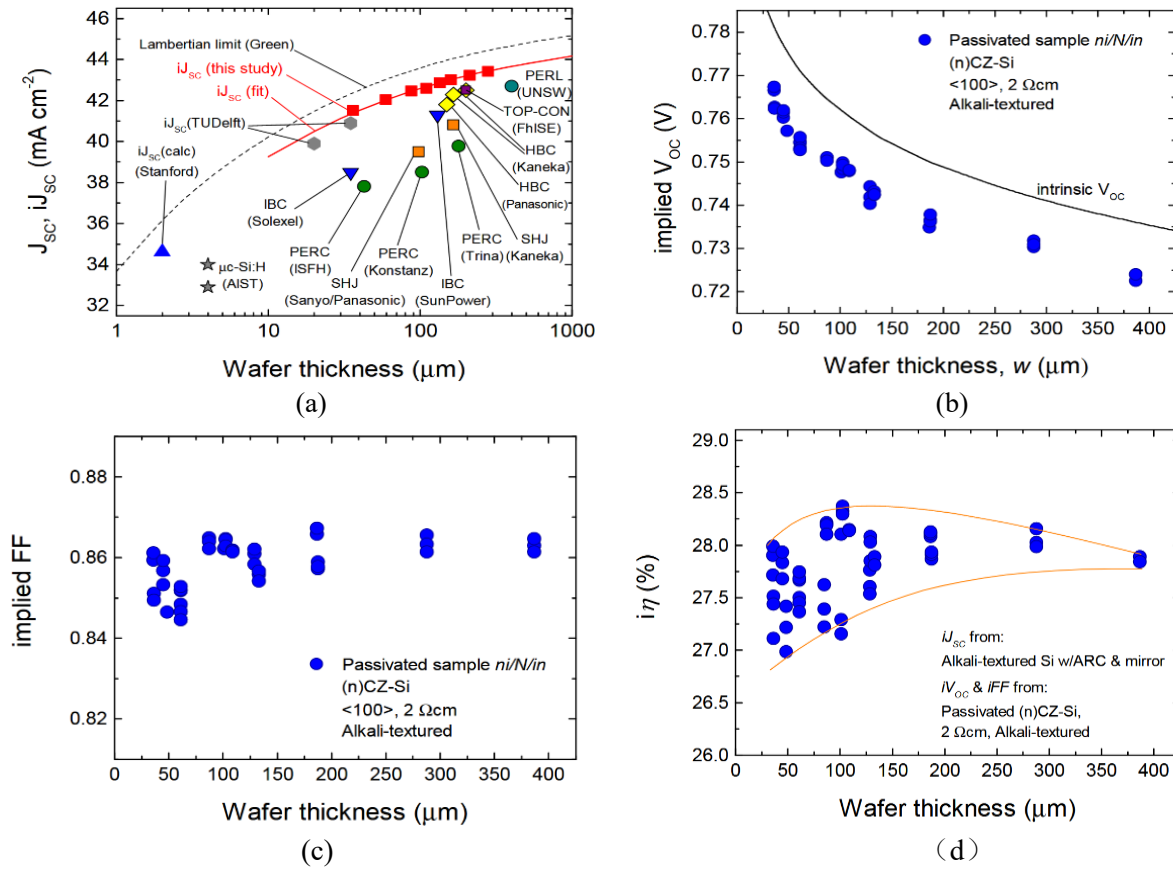
$$\begin{aligned} Eff(\%) &= P_{mpp}(W)/P_{in}(W) \cdot 100\% \\ &= [I_{sc}(A) \cdot V_{oc}(V) \cdot FF(\%)]/[CellArea(cm^2) \cdot 1000(W/m^2)] \\ &= J_{sc}(mA/cm^2) \cdot V_{oc}(mV) \cdot FF(\%) \cdot 10(cm^2/W) \end{aligned} \quad (f1)$$

Suponiendo J_{sc} en mA y V_{oc} en mV, la fórmula f1 puede simplificarse, despreciando las dimensiones, de la siguiente manera:

$$Eff = J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF \cdot 10^{-5} \quad (f2)$$

De las fórmulas anteriores se desprende que la Eficiencia (Efficiency) es el resultado del producto de la Densidad de Corriente de Cortocircuito (J_{sc}), el Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc}) y el Factor de Llenado (FF). Debido a la relación de vaivén entre los tres factores, un cambio en el espesor de la oblea de silicio no se traduce en un impacto lineal sobre la Eficiencia, ya que los factores muestran un comportamiento antagónico en relación con el espesor.

En cambio, hay una fase de "meseta" en la que la eficiencia muestra un descenso gradual, aunque sigue siendo aceptable, como se muestra en la Figura 2.2 (d).

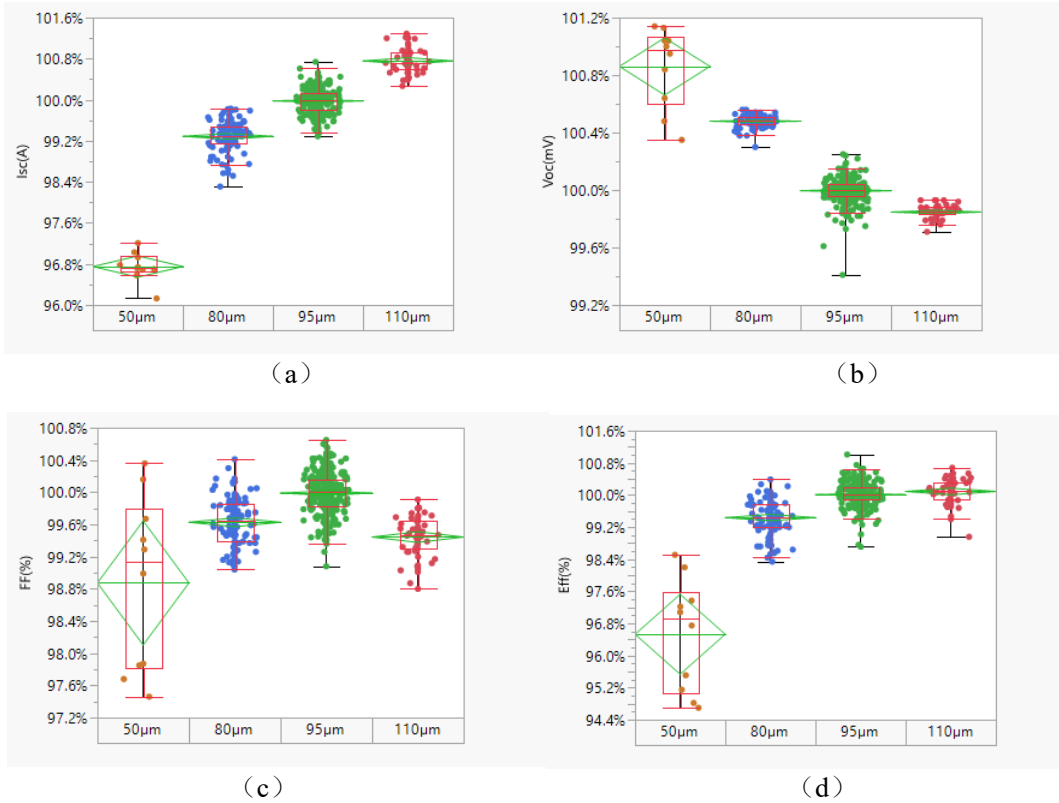


Figuras 2.2 (a)(b)(c)(d) - Relación entre espesor de la oblea y la densidad de corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto, factor de llenado y eficiencia de la célula [1]

[1] Hitoshi Sai et al 2018 Jpn. J. Appl. Phys. 57 08RB10 (<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RB10>)

La ley anterior ha sido validada mediante numerosos experimentos realizados por Risen. La figura 2.3 muestra los datos experimentales reales, que se asemejan mucho a los de la bibliografía presentada en la figura 2.2.

Como se observa en la Figura 2.3, la reducción de la corriente de cortocircuito es más intensa a medida que disminuye el grosor de la oblea, mientras que el voltaje de circuito abierto se aproxima gradualmente al límite teórico. Debido a perturbaciones externas, como una automatización no ideal, el factor de llenado es ligeramente inferior al esperado. Aún queda potencial para mejorar la eficiencia de la célula mediante su optimización.



Figuras 2.3 (a)(b)(c)(d) - Relación experimental entre espesor de la oblea y la corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto, factor de llenado y eficiencia de la célula

Las células HJT Hyper-ion de Risen, fabricadas en obleas de silicio de 110 μm de grosor, progresaron notablemente desde el inicio de su producción el 27 de abril de 2023 hasta alcanzar la producción a gran escala el 27 de junio de 2023. La figura 2.4 muestra que la eficiencia media del lote ideal alcanzó el 25,8%, con un pico del 26,1%, en línea con las expectativas.

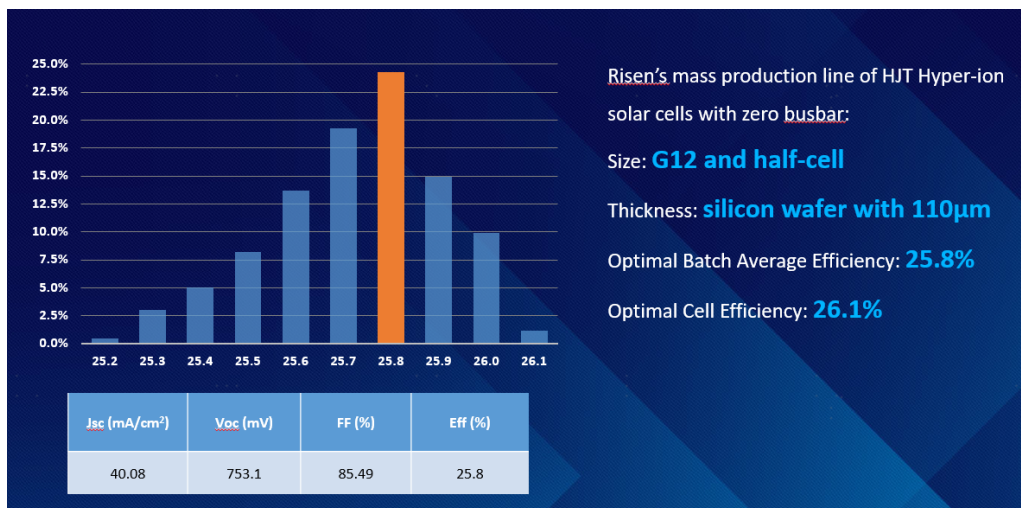


Figura 2.4 - Eficiencia de Conversión de las Células Ultrafinas HJT Risen

2.2 Efecto de las obleas de silicio ultrafinas en el rendimiento de producción de las células HJT

En el proceso de producción de células, la tasa de rendimiento de la producción tiene un impacto directo en los costes del producto y es uno de los indicadores de producción más críticos. A medida que aumenta el tamaño de las obleas y disminuye su grosor, las obleas ultrafinas se comportan de forma diferente en las distintas fases de producción y transporte en comparación con las obleas más gruesas. Como resultado, se necesitan nuevos diseños y ajustes en los procesos de producción, plantillas y accesorios, así como en los equipos de automatización.

Por ejemplo, en la fase inicial de la línea de producción, el casete se diseñó en modo de inserción horizontal debido a las limitaciones del equipo. A medida que las obleas de silicio se vuelven más delgadas, se hunden de forma natural debido a la gravedad, como se muestra en la figura 2.5. En este caso, cuando el brazo robótico manipula la oblea, puede provocar riesgos. En consecuencia, el soporte vertical de las obleas se utilizó como base para el diseño de la línea de producción en serie. El diseño de la automatización de cada proceso se ajustó en consecuencia. Además, se diseñaron y ajustaron otros equipos, plantillas y dispositivos, incluidos los transportadores entre equipos y los dispositivos de vacío, para adaptarlos a las características de las obleas ultrafinas y garantizar el cumplimiento de todos los objetivos de producción en serie.

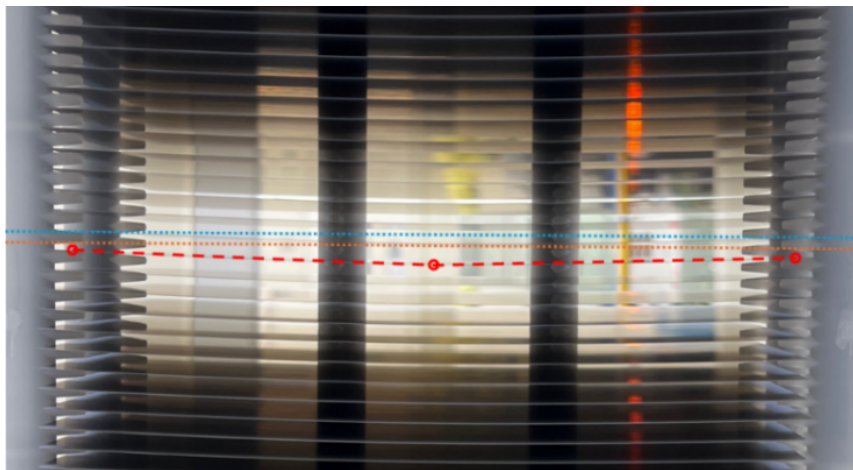


Figura 2.5 - Curvatura de las obleas de silicio dispuestas horizontalmente en el casete

Gracias a las mejoras y ajustes introducidos en los procesos, herramientas y equipos, la producción de las células HJT Hyper-ion de Risen ha aumentado rápidamente. La tasa de rendimiento estabilizado de las células se ha mantenido constantemente por encima del 99%, mientras que la tasa de fragmentación se mantiene por debajo del 0,5%, cumpliendo los requisitos de rendimiento y rotura especificados, según la figura 2.6(a)(b).

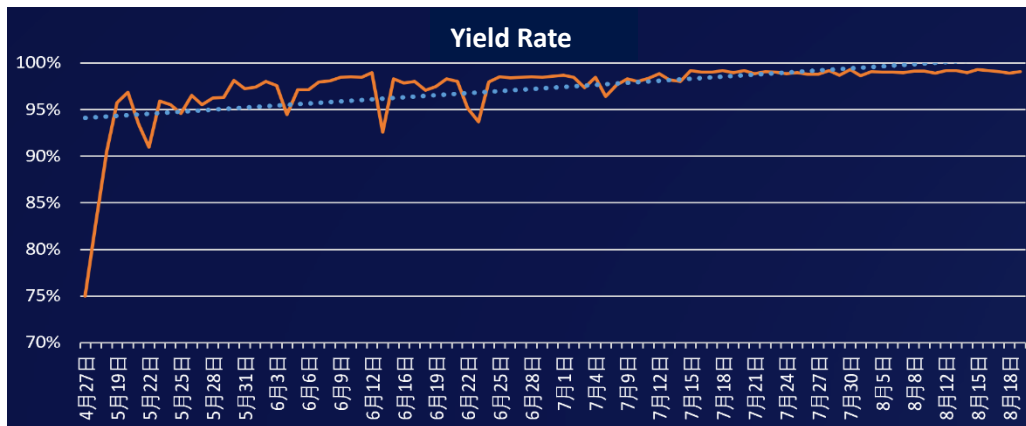


Figura 2.6(a) - Tasa de Rendimiento de producción de obleas ultrafinas

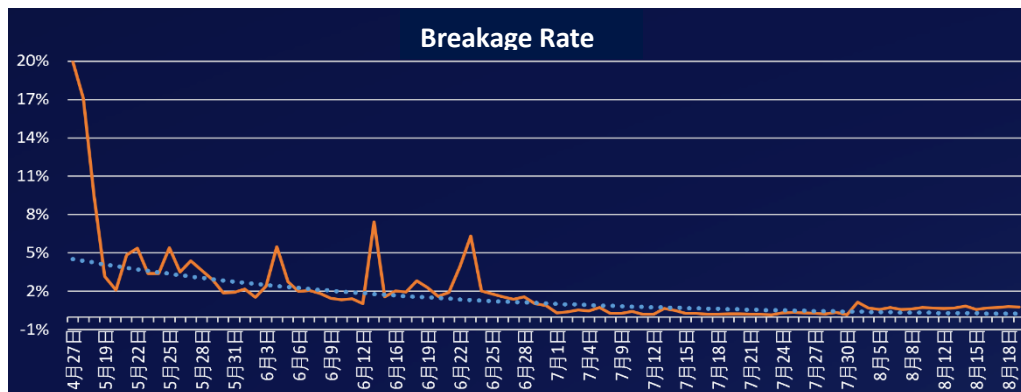
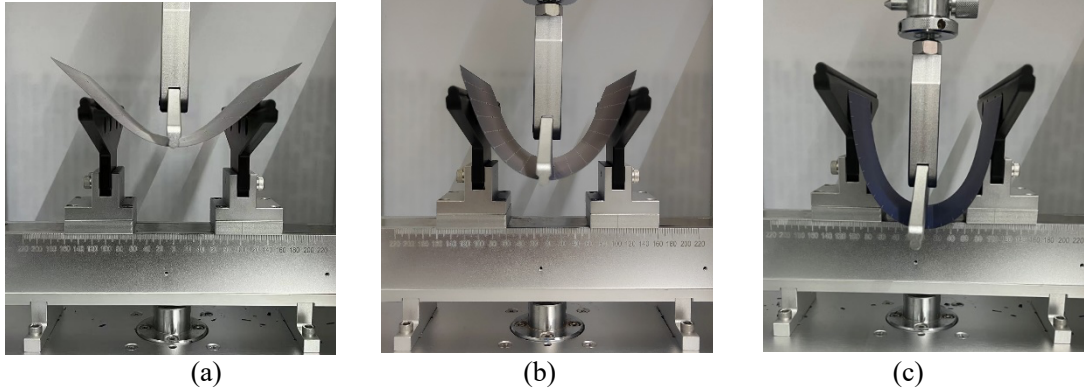


Figura 2.6(b) - Índice de rotura de obleas de silicio ultrafinas

En general, existe la percepción de que las células más delgadas tienen menor resistencia mecánica. Por lo tanto, la cuestión sigue siendo cuál sería la resistencia mecánica de las células HJT con obleas de silicio ultrafinas. Para resolver este problema, se han realizado numerosas pruebas de resistencia mecánica comparando células de diferentes tipos y con diferentes grosores.

La figura 2.8 muestra (a) una célula PERC de 150µm, (b) una célula TOPCon de 130µm y (c) la célula HJT de 90µm.



Figuras 2.8 (a) (b) (c) - Prueba de carga mecánica en células PERC, TOPCon y HJT con diferentes grosores

Durante las pruebas, tanto la célula PERC de 150 μm de espesor como la célula TOPCon de 130 μm de grosor sufrieron roturas al alcanzar un cierto nivel de flexión. En cambio, la célula solar HJT de 90 μm permaneció intacta incluso después de alcanzar el rango máximo de movimiento de la máquina de ensayos de carga mecánica, como se muestra en la Tabla 2.1.

Está claro que la flexibilidad de las células solares HJT es significativamente superior con obleas de silicio ultrafinas, lo que contribuye positivamente a seguir mejorando los indicadores de rendimiento en los procesos de producción de células y módulos.

Tabela 2.1 - Datos de deformación de las células PERC, TOPCon y HJT con diferentes grosores

Tecnología de Célula	PERC	TOPCon	HJT
Grosor (μm)	150	130	90
Deformación (mm)	46.74 (roto)	53.68 (roto)	98.56 (intacto)

3. Desarrollo y Pruebas de Fiabilidad de la Tecnología de Encapsulación de Células Ultrafinas

Se han cumplido los requisitos de eficiencia y tasa de rendimiento de las células HJT que utilizan obleas de silicio ultrafinas. Sin embargo, los investigadores siguen enfrentándose al reto de encontrar un encapsulado eficaz para estas células, especialmente en lo que respecta a su interconexión.

La tecnología convencional para interconectar células en el encapsulado de módulos implica calentar para fundir tiras o cables de cobre estañado, conectándolos a las barras conductoras de plata de las células. Este proceso de soldadura requiere normalmente temperaturas superiores a 200°C. Sin embargo, dado que, debido a su naturaleza, todo el proceso de producción de células HJT debe llevarse a cabo a bajas temperaturas, no superiores a 200°C, el uso de la tecnología de soldadura convencional para interconectar células plantea riesgos significativos en términos de fiabilidad.

Especialmente en la aplicación de células ultrafinas, la soldadura a altas temperaturas provoca un aumento de la tasa de rotura y una disminución de la tasa de rendimiento. Por tanto, era imperativo desarrollar un método de interconexión de células más adecuado, fiable y económico. La elección de materiales adecuados para la interconexión, así como el establecimiento de una estrategia de patentes, fueron esenciales durante el desarrollo del producto y también la producción en serie.

En el desarrollo de la tecnología HJT Hyper-ion, Risen creó primero la tecnología de interconexión de células sin tensiones, denominada Hyper-link, que cuenta con más de 50 patentes exclusivas y se complementó con el desarrollo en colaboración con fabricantes de equipos. Aplicando esta tecnología, Risen logró la producción en masa de módulos HJT Hyper-ion, de alta eficiencia y fiabilidad, en junio de 2023.

Con el fin de evaluar el rendimiento de los módulos que utilizan células ultrafinas con tecnología Hyperlink, se diseñó una serie de pruebas para llevar a cabo una validación exhaustiva, principalmente en términos de fiabilidad, evaluando los efectos bajo carga mecánica (estática y dinámica) y la degradación del rendimiento del módulo.

3.1 Condiciones de prueba con carga elevada

De acuerdo con la norma IEC 61215, se realizaron rigurosas pruebas de carga estática y dinámica en los módulos HJT Risen. Las condiciones de ensayo se muestran en la Tabla 3.1.

Tabela 3.1 - Pruebas de fiabilidad de los módulos HJT Risen con células ultrafinas

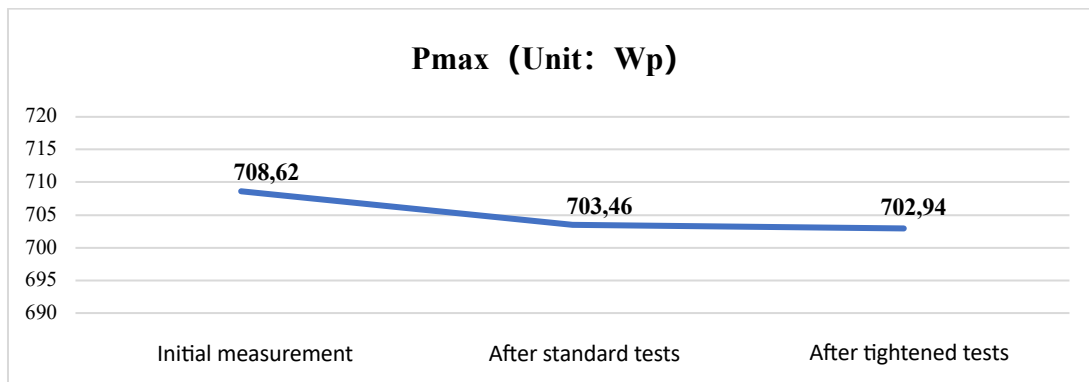
Pruebas	Condiciones de la prueba
Carga mecánica estática	Instalación con abrazaderas, sin travesaño/ delante 5400Pa, detrás 2400Pa
Carga mecánica dinámica	delantera/trasera 1000Pa, 10000 ciclos

Los resultados mostraron:

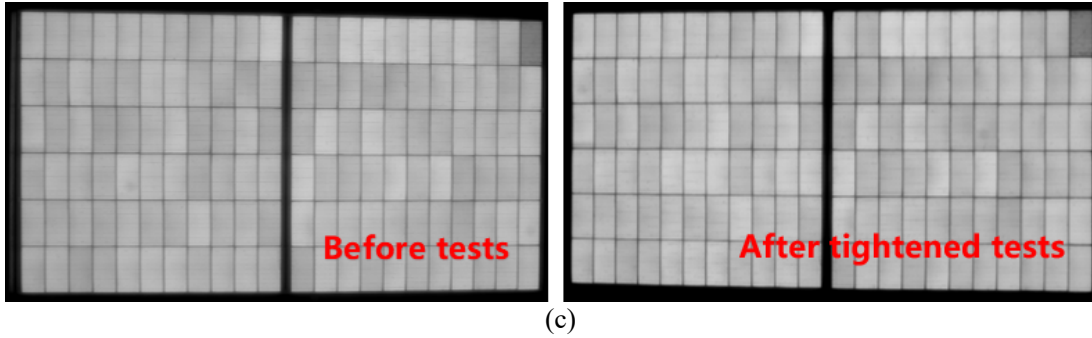
- Utilizando el método de instalación con abrazaderas y sin vigas transversales, no se detectaron grietas ocultas ni células rotas según la prueba de electroluminiscencia (EL) bajo una carga frontal de 5400 Pa y una carga trasera de 2400 Pa. Además, la degradación de la potencia tras la prueba fue inferior al 1%, como se muestra en la Figura 2.9.



(a)



(b)

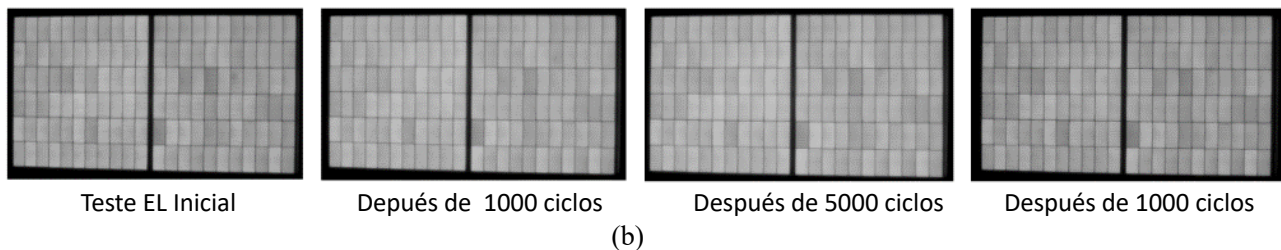


Figuras 2.9 (a) (b) (c) - Prueba de carga mecánica estática: disposición de la carga, degradación de la potencia y resultados de la prueba EL

- Tras 1000 ciclos de pruebas de carga dinámica estándar, también se realizaron pruebas continuas de 1000 ciclos, pruebas continuas de 5000 y 10000 ciclos de carga mecánica dinámica. Los resultados de las pruebas no revelaron grietas ocultas ni células rotas, según las pruebas EL. Puede concluirse que los requisitos normalizados de rendimiento de los módulos en términos de carga dinámica, como se muestra en la figura 2.10.



(a)



Figuras 2.10 (a) (b) - Prueba de carga mecánica dinámica: equipo de prueba, resultados de la prueba EL

3.2 Condiciones de ensayo de envejecimiento acelerado

Con el fin de validar la fiabilidad de los módulos Hyper-ion HJT Risen, compuestos por células ultrafinas con tecnología de interconexión Hyperlink aplicada, se diseñaron pruebas para aumentar los ciclos de ensayo normalizados para diferentes pruebas de intemperie y envejecimiento de los módulos, según la norma IEC 61215:2021.

Se seleccionaron dos módulos HJT Hyper-ion y se sometieron a pruebas de fiabilidad: calor húmedo, ciclos térmicos, congelación por humedad y degradación inducida por potencial (PID). Ambos módulos superaron las pruebas de acuerdo con los requisitos de la IEC.

Además, se realizaron otras pruebas de ciclos múltiples, como: una prueba de calor húmedo (85°C+85%HR) realizada durante 2000 horas (DH2000); una prueba de ciclo térmico (-40°C/85°C) durante 400 ciclos (TC400); una prueba de congelación húmeda durante 30 horas (HF30); y una prueba de degradación inducida por potencial durante 288 horas (PID288). Como era de esperar, la degradación de la potencia tras todas las pruebas se mantuvo en valores inferiores al 3%. Asimismo, en la prueba de degradación inducida por luz y altas temperaturas, realizada durante 324 horas (LeTID324), la degradación de la potencia tras la prueba fue inferior al 1%. Los resultados de las pruebas se muestran en la figura 3.1

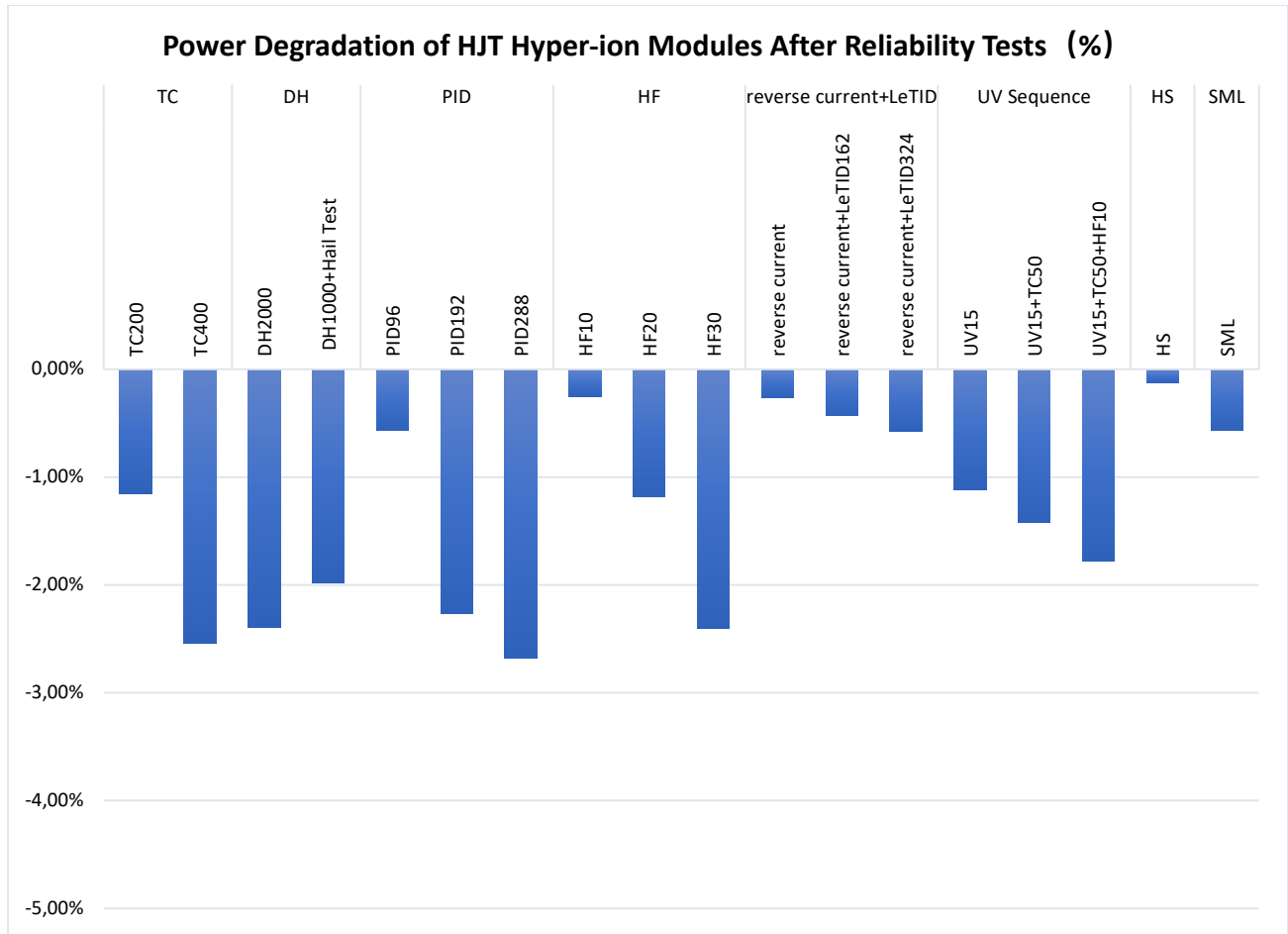


Figura 3.1 - Pruebas de fiabilidad realizadas en los módulos HJT Risen

Según los resultados de las pruebas anteriores, está claro que el uso de obleas ultrafinas con tecnología de interconexión Hyperlink no afecta a la resistencia, a la carga mecánica ni a la fiabilidad de los módulos, que cumplen todos los requisitos de la norma. Gracias a la tecnología Hyperlink, las obleas ultrafinas resultan perfectamente adecuadas para la producción de células y módulos HJT, satisfaciendo las exigencias de la producción en serie. Sobre todo, el rendimiento del módulo cumple plenamente las normas exigidas por la IEC para aplicaciones a largo plazo.

De ello se deduce que la reducción del grosor de las células HJT es una forma razonable, viable y necesaria de optimizar las características y los costes de los módulos. Risen ha liderado esta revolución en el sector gracias a años de inversión en I+D y a su experiencia en la producción de células HJT.

4. Consideraciones y Perspectivas

Como pionero e innovador en el desarrollo e industrialización de HJT, Risen Energy ha acumulado una amplia experiencia en esta tecnología desde 2018. La primera línea piloto se estableció en 2019, seguida de los primeros envíos de módulos HJT en 2020, situándose como el proveedor TOP1 mundial de HJT durante dos años consecutivos. En 2023, la línea de producción de módulos Hyper-ion a escala GW de Risen se puso en pleno funcionamiento, marcando un logro significativo.

A lo largo del proceso de desarrollo e industrialización de células y módulos HJT, Risen se ha enfrentado a numerosos retos para la producción en masa. Como resultado, Risen se dio cuenta de que el desarrollo y la industrialización de los productos HJT requieren la integración vertical de todas las industrias de la cadena, aguas arriba y aguas abajo, incluido el desarrollo de la tecnología de encapsulación de obleas de silicio, células y módulos, que son interdependientes en su conjunto. Imaginemos un escenario en el que cada segmento desarrolle su tecnología de forma independiente, sin integración orgánica aguas arriba y aguas abajo, lo que significaría que no se podría alcanzar la producción en masa del producto final. Esto es lo que ocurre cuando se dispone de una excelente tecnología de obleas de silicio que no puede utilizarse en la producción en serie, o de una avanzada tecnología de células que no puede encapsularse eficazmente en módulos. ¡Qué pena!

Risen es el primer fabricante del sector en producir en serie utilizando obleas de silicio ultrafinas, pasta de metalización de bajo contenido en plata y tecnología de célula con cero barra colectora (0BB). Estas tres tecnologías desempeñan un papel crucial en el aumento de la eficiencia y la reducción de costes de la tecnología HJT. Sin embargo, para lograr grandes resultados, fue necesario desarrollar la tecnología de interconexión de células sin tensión de Risen, la Hyperlink, que integra realmente todas las demás y ha unificado la cadena ascendente y descendente. Con el apoyo de las tecnologías mencionadas, junto con Hyperlink, Risen ha completado con éxito la aplicación masiva de obleas de silicio ultrafinas.

La base de producción de HJT Risen, con una capacidad de producción de 15 GW, situada en Nanbin, logró la producción en masa y la entrega de módulos HJT de 700 Wp+ en sólo un año.

En el futuro, Risen seguirá desarrollando e industrializando la tecnología HJT, mejorando continuamente la eficiencia y reduciendo los costes. Además, mediante la integración de la tecnología HBC y la tecnología tándem de perovskita, Risen sigue iterando y mejorando los

productos de la línea Hyer-ion. Creemos que alcanzar los 900Wp no es un sueño, así como 1000Wp están a nuestro alcance a medida que mejora la eficiencia de las células