



HJT Risen: White Paper

Desenvolvimento e Aplicação Industrial de Wafers de Silício Ultrafinos

Janeiro, 2023

RISEN ENERGY Co., LTD



SUMÁRIO

1. Prefácio	1
2. Desenvolvimento e Produção em Massa de Células HJT Baseadas em Wafers de Silício Ultrafinos	2
2.1 Efeito dos Wafers de Silício Ultrafinos na Eficiência das Células HJT	2
2.2 Efeito dos Wafers de Silício Ultrafinos no Rendimento de Produção das Células HJT.....	6
3. Desenvolvimento e Testes de Confiabilidade da Tecnologia de Encapsulamento de Células Ultrafinas	9
3.1 Condições de Ensaio de Carga Elevada	10
3.2 Condições de Teste de Envelhecimento Acelerado.....	12
4. Considerações e Perspectivas	14

1. Prefácio

O White Paper lançado anteriormente sobre a tecnologia Heterojunção (HJT) da Risen, linha de produtos Hyper-ion, intitulado “Desenvolvimento e Aplicação da Pasta de Metalização com Baixo Teor de Prata”^①, enfatizou a busca pela otimização de recursos, através de Pesquisa e Desenvolvimento, como chave para a industrialização da tecnologia HJT. Os custos com wafers de silício, pasta de metalização e equipamentos representam mais de 90% do custo total de produção de células HJT, como pode ser visto na Figura 1.1. Assim, focar na otimização dessas três áreas permitiu que essas células se tornassem competitivas para a indústria fotovoltaica (FV).

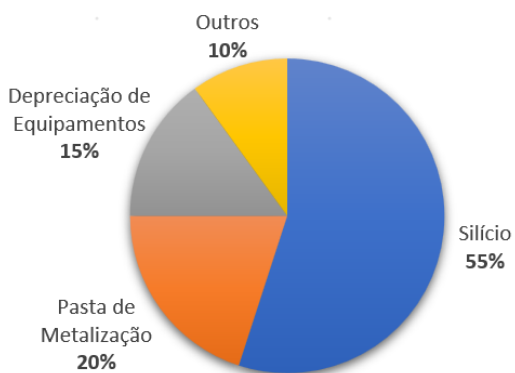


Figura 1.1 - Composição de Custos de Células



Figura 1.1 - Célula Ultrafina HJT Risen

Muitas medidas podem ser tomadas para reduzir os custos dos wafers de silício, dentre todas, a abordagem mais direta e efetiva é a redução da sua espessura. O processo de passivação superficial de dupla face a baixa temperatura, juntamente com a estrutura totalmente simétrica das células HJT, tornam viável a produção em massa com a utilização de wafers mais finos sem que se comprometa a eficiência e o rendimento das células. Além disso, a redução na espessura dos wafers resulta em maior flexibilidade, criando mais possibilidades de design de células e módulo. Tal como ilustrado na Figura 1.2, a célula HJT Risen com wafers de silício ultrafinos produzidas pela Risen apresenta uma excelente flexibilidade e capacidade de dobragem.

Após anos de investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) com o objetivo de melhorar a tecnologia HJT, a Risen registrou progressos significativos no desenvolvimento técnico e na aplicação industrial de wafers de silício ultrafinos. Atualmente, a empresa detém a produção em massa de células e módulos utilizando wafers de silício de 110 μ m de espessura, bem como tem capacidade de produzir células com wafers ainda mais finos, inferiores a 100 μ m.

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

2. Desenvolvimento e Produção em Massa de Células HJT Baseadas em Wafers de Silício Ultrafinos

Como já mencionado, o custo com os wafers de silício constituem a maior parte dos custos totais das células, de forma que, wafers mais finos são a forma mais direta e efetiva de otimizar tais custos. Reitera-se que, a tecnologia HJT é altamente compatível com wafers ultrafinos, por apresentar células completamente simétricas, passivação superficial em dupla face sob baixa temperatura, bem como, pela baixa temperatura de todo o seu processo de fabricação, sempre abaixo de 200°C.

Ademais, a produção de células ultrafinas HJT ajuda evitar problemas como deformações e danos nos wafers de silício, que são frequentemente encontrados em estruturas assimétricas e processos de alta temperatura observados nas tecnologias de células PERC e TOPCon. A utilização de wafers de silício ultrafinos é, por conseguinte, um indicador significativo da tecnologia de células HJT de terceira geração. No entanto, há que enfrentar desafios práticos durante a produção de células e módulos que utilizam wafers de silício ultrafinos. Estes desafios incluem:

- a) A utilização de wafers de silício ultrafinos afeta a eficiência das células?
- b) A utilização de wafers de silício ultrafinos afeta a taxa de rendimento da linha de produção de células?
- c) A utilização de wafers de silício ultrafinos afeta a qualidade e confiabilidade dos módulos?

2.1 Efeito dos Wafers de Silício Ultrafinos na Eficiência das Células HJT

De modo geral, a espessura dos wafers tem impacto significativo no desempenho da célula no que diz respeito à absorção da luz [1]. De acordo com o cálculo do modelo ideal de células, seriam necessários wafers com espessura de 280 μm para absorver toda a luz incidente. Além disso, existe uma relação linear entre a espessura dos wafers de silício e a absorção de luz, tal que quanto mais fino for o wafer, maior será a transmissão de luz, como se mostra na Figura 2.1.

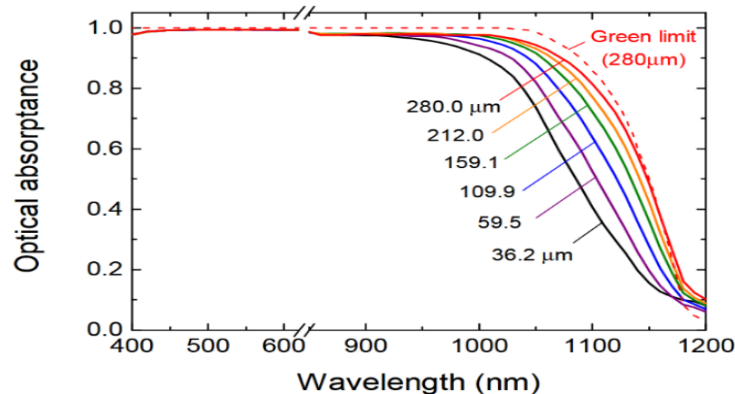


Figura 2.1 - Relação entre a Espessura do Wafer de Silício e a Absorção da Luz

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

A quantidade de luz absorvida afeta diretamente a densidade de corrente de curto-circuito (I_{sc}) da célula. A medida que a espessura do wafer de silício diminui, menos comprimentos de onda da luz são absorvidos, logo a densidade da corrente de curto-circuito apresenta um declínio quase linear, como mostra a Figura 2.2 (a).

Por outro lado, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) apresenta comportamento oposto ao da corrente de curto-circuito. Conforme diminui-se a espessura do wafer, a V_{oc} aumenta de forma aproximadamente linear, como pode ser observado na Figura 2.2 (b).

Outro importante parâmetro, o fator de preenchimento, também conhecido como fator de forma ou, do inglês, fill factor (FF), não sofre alteração significativa devido à espessura do wafer, apresentando uma ligeira tendência a diminuir, podendo considerar-se que se mantém constante, como mostra a Figura 2.2 (c).

Assim, as alterações na espessura dos wafers de silício resultam numa relação do tipo gangorra entre a densidade da corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto, com o fator de preenchimento como eixo.

Partindo da definição original de eficiência de conversão, deriva-se uma fórmula que inclui os três principais parâmetros de desempenho elétrico J_{sc} , V_{oc} e FF, como se mostra na fórmula f1.

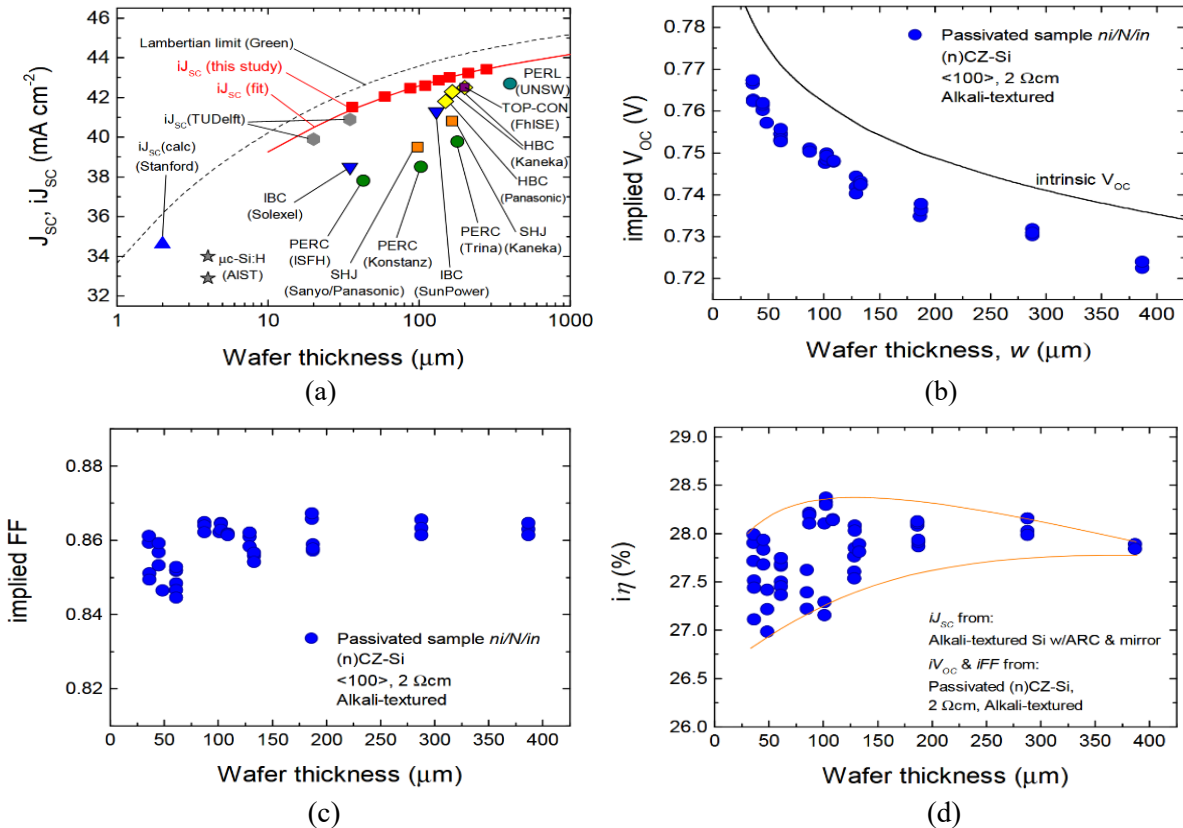
$$\begin{aligned} Eff(\%) &= P_{mpp}(W)/P_{in}(W) \cdot 100\% \\ &= [I_{sc}(A) \cdot V_{oc}(V) \cdot FF(\%)]/[CellArea(cm^2) \cdot 1000(W/m^2)] \\ &= J_{sc}(mA/cm^2) \cdot V_{oc}(mV) \cdot FF(\%) \cdot 10(cm^2/W) \end{aligned} \quad (f1)$$

Assumindo J_{sc} em mA e V_{oc} em mV, a fórmula f2 pode ser simplificada, negligenciando as dimensões, do seguinte modo:

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

A partir das fórmula acima, observa-se que a Eficiência (Eff) é resultado do produto da Densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), Tensão de circuito aberto (V_{oc}) e Fator de Preenchimento (FF). Devido a relação gangorra entre os três fatores, uma alteração na espessura do wafer de silício não resulta num impacto linear na Eficiência, uma vez que os fatores apresentam comportamentos antagônicos em relação à espessura.

Em vez disso, há uma fase de “planalto” na qual a eficiência apresenta um declínio gradual, ainda que permaneça aceitável, como mostrado na Figura 2.2 (d).

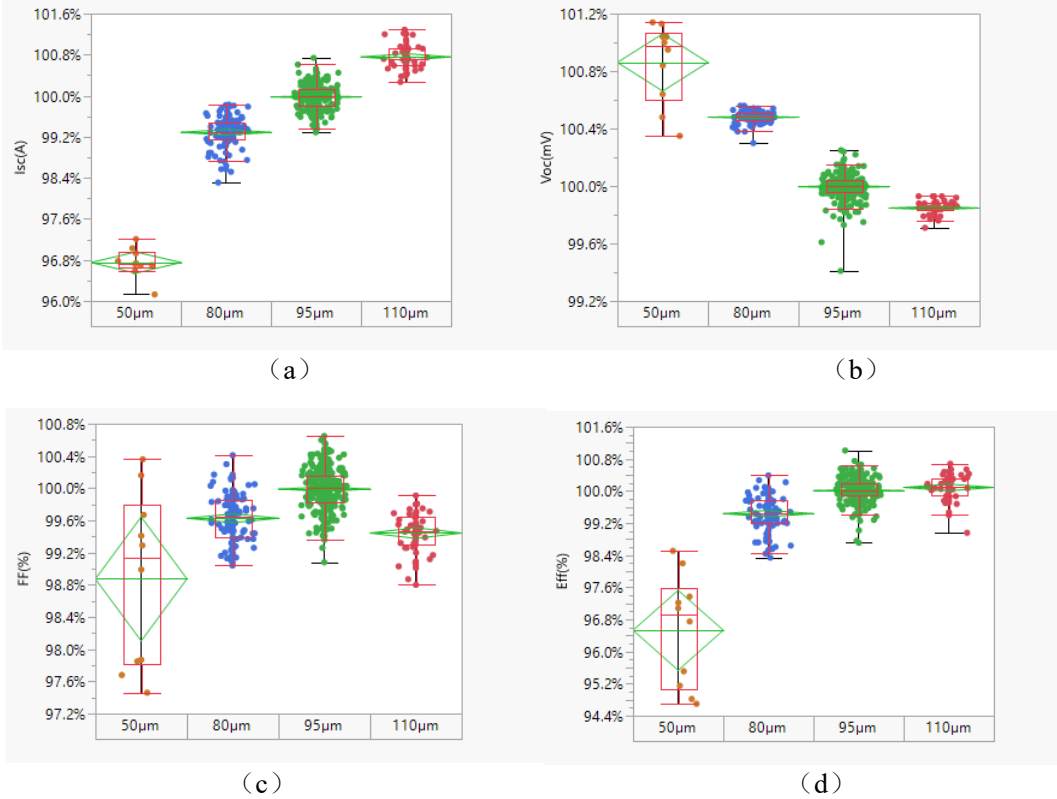


Figuras 2.2 (a)(b)(c)(d) - Relação entre Espessura do Wafer de Silício e Densidade de Corrente de Curto-Circuito, Tensão de Circuito Aberto, Fator de Preenchimento e Eficiência da Célula ^[1]

A lei acima exposta foi validada através de muitas experiências desenvolvidas pela Risen. A Figura 2.3 mostra os dados experimentais reais, os quais se assemelham muito a literatura, como apresentada na Figura 2.2

Como visto na Figura 2.3, a redução na corrente de curto-circuito é mais intensa com a redução da espessura do wafer, enquanto que a tensão de circuito aberto vai gradualmente se aproximando ao limite teórico. Devido a perturbações externas, como a automação não ideal, o fator de preenchimento é suavemente menor que o esperado. Resta ainda potencial para a melhoria da eficiência da célula através de otimização.

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



Figuras 2.3 (a)(b)(c)(d) - Relação Experimental entre Espessura do Wafer de Silício e Corrente de Curto-Circuito, Tensão de Circuito Aberto, Fator de Preenchimento e Eficiência da Célula

As células HJT Hyper-ion da Risen, fabricadas em wafers de silício com 110µm de espessura, tiveram progresso significativo desde o início de sua produção em 27 de Abril de 2023, até alcançar a produção em escala total em 27 de Junho de 2023. Na Figura 2.4 observa-se que a eficiência média do lote ideal atingiu 25,8%, com um pico de 26,1%, alinhando-se bem com as expetativas.

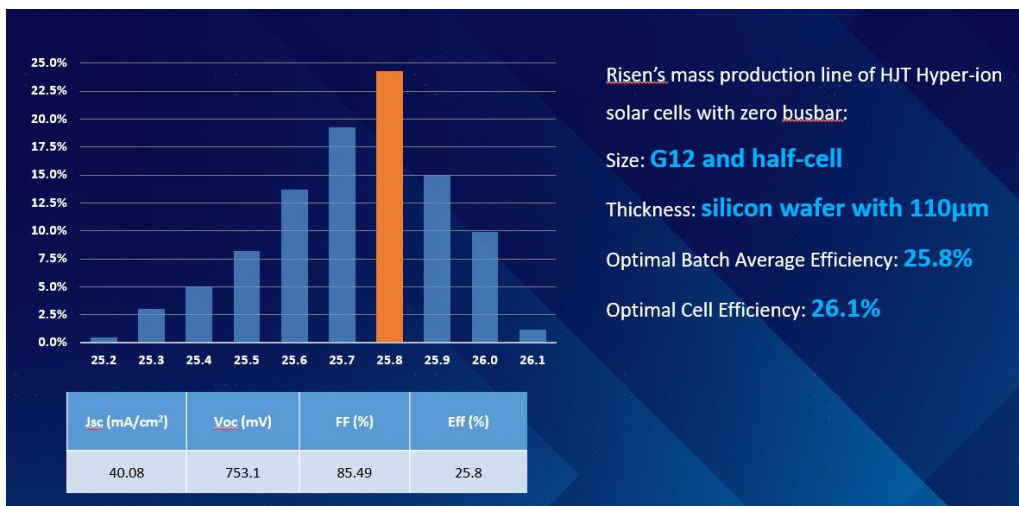


Figura 2.4 - Eficiência de Conversão das Células Ultrafinas HJT Risen

2.2 Efeito dos Wafers de Silício Ultrafinos no Rendimento de Produção das Células HJT

No processo de produção de células, a taxa de rendimento da produção impacta diretamente nos custos do produto, sendo um dos indicadores de produção mais críticos. Com o aumento do tamanho dos wafers e a diminuição da sua espessura, os wafers ultrafinos têm um desempenho diferente em várias etapas de produção e transporte, em comparação com aqueles mais espessos. Consequentemente, são necessárias novos designs e ajustes nos processos de produção, nos gabaritos e acessórios, bem como nos equipamentos de automatização.

Por exemplo, na fase inicial da linha de produção, o cassete foi concebido num modo de inserção horizontal devido a limitações do equipamento. À medida que os wafers de silício se tornam mais finos, cedem naturalmente devido à gravidade, como se mostra na Figura 2.5. Neste caso, quando o braço robótico manuseia o wafer, pode causar riscos. Desta forma, passou a se utilizar suporte de wafers em modo vertical como base para a concepção da linha de produção em massa. Assim, o projeto da automatização de cada processo foi ajustado em conformidade. Além disso, outros equipamentos, gabaritos e acessórios, incluindo transportadores entre equipamentos e dispositivos de vácuo, foram concebidos e ajustados para corresponder às características dos wafers ultrafinos, de modo a garantir que todos os objetivos de produção são cumpridos quando da produção em massa.



Figura 2.5 - Flexão de wafers de silício quando dispostos horizontalmente no cassete

Através de aprimoramento e ajustes no processos, nas ferramentas e nos equipamentos, a produção das células HJT Hyper-ion da Risen aumentou rapidamente. A taxa estabilizada de rendimento das células tem se mantido consistentemente acima dos 99%, enquanto a taxa de fragmentação se mantém abaixo dos 0,5%, cumprindo os requisitos especificados de rendimento e quebra, confa Figura 2.6(a)(b).

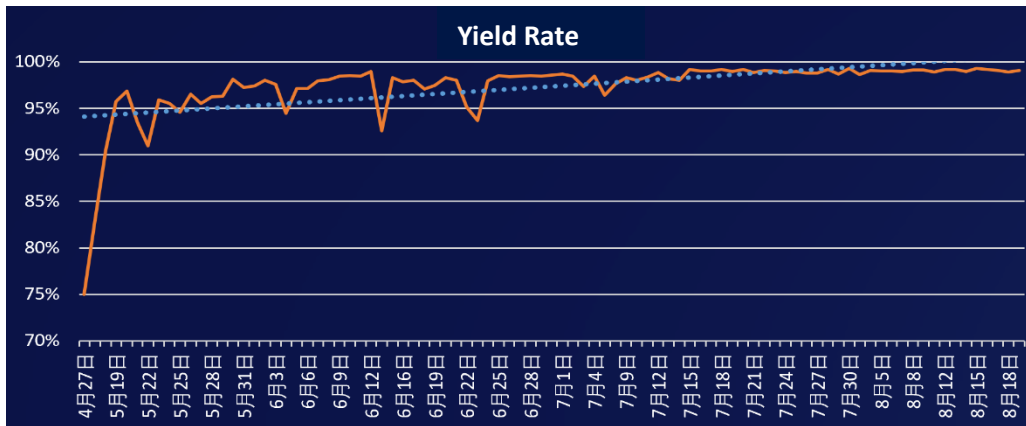


Figura 2.6(a) - Taxa de Rendimento de produção de wafers ultrafinos

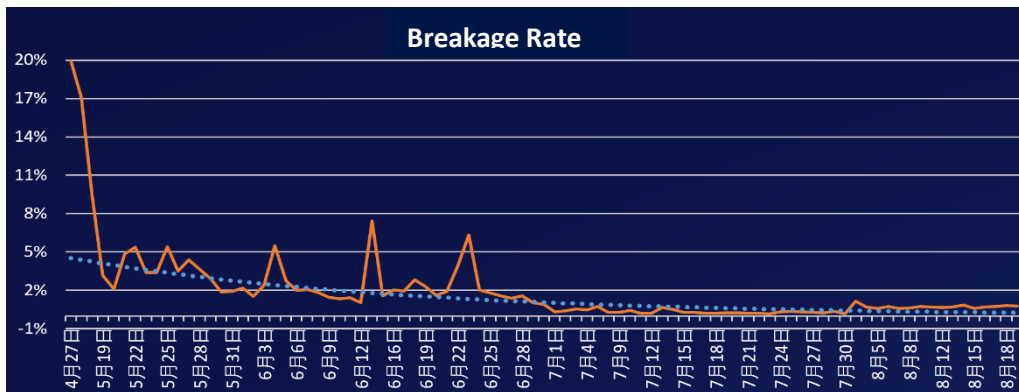
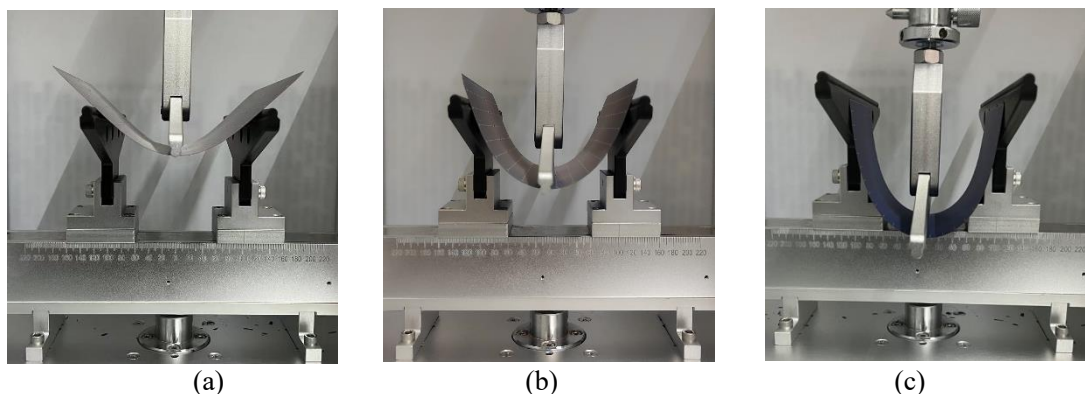


Figura 2.6(b) - Taxa de quebra de wafers de silício ultrafinos

Em geral, tem-se a percepção de que células mais finas têm menor resistência mecânica. Assim, resta a pergunta de qual seria a resistência mecânica das células HJT com wafers de silício ultrafinos. Para resolver este problema, foram realizados muitos testes de resistência mecânica comparando-se células de diversos tipos e com diferentes espessuras.

Na Figura 2.8, mostra-se em (a) uma célula PERC de 150µm, (b) uma célula TOPCon de 130µm e em (c) a célula HJT de 90µm.



Figuras 2.8 (a) (b) (c) - Teste de carga mecânica em células PERC, TOPCon e HJT com diferentes espessuras

Durante os testes, tanto a célula PERC com 150 μm de espessura, como a célula TOPCon com 130 μm de espessura sofreram rupturas ao atingir um determinado nível de flexão. Em contrapartida, a célula solar HJT de 90 μm permaneceu intacta mesmo depois de atingir a amplitude máxima de movimento da máquina de ensaio de carga mecânica, como indicado na Tabela 2.1.

É evidente que a flexibilidade das células solares HJT é significativamente superior com wafers de silício ultrafinos, o que contribui positivamente para melhorar ainda mais os indicadores de rendimento nos processos de produção de células e módulos.

Tabela 2.1 - Dados de Deformação para células PERC, TOPCon e HJT com diferentes espessuras

Tecnologia de Célula	PERC	TOPCon	HJT
Espessura (μm)	150	130	90
Deformação (mm)	46.74 (quebrou)	53.68 (quebrou)	98.56 (intacto)

3. Desenvolvimento e Testes de Confiabilidade da Tecnologia de Encapsulamento de Células Ultrafinas

Os requisitos de eficiência e de taxa de rendimento para as células HJT que wafers de silício ultrafinos foram cumpridos. No entanto, resta o desafio subsequente para os pesquisadores de encontrar o encapsulamento eficaz destas células, especialmente no que diz respeito à interconexão das células.

A tecnologia convencional de interconexão entre as células no encapsulamento de módulos, envolve o aquecimento para fundir tiras ou fios de cobre estanhado, ligando-os aos barramentos de prata nas células (busbars). Este processo de soldagem requer, normalmente, temperaturas superiores a 200°C. No entanto, uma vez que, devido à sua natureza, todo o processo de produção de células HJT deve ser realizado sob baixas temperaturas, não superiores a 200°C, a utilização da tecnologia de soldagem convencional para a interligação entre células, representa riscos significativos em termos de confiabilidade.

Especialmente na aplicação de células ultrafinas, a soldagem sob altas temperaturas leva ao aumento da taxa de quebra e à diminuição da taxa de rendimento. Portanto, foi imperativo o desenvolvimento de um método de interligação entre células mais adequado, confiável e econômico. A escolha de materiais adequados à interconexão, bem como o estabelecimento de uma estratégia de patentes foram essenciais durante o desenvolvimento do produto e também à produção em massa.

No desenvolvimento da tecnologia HJT Hyper-ion, primeiro a Risen criou a tecnologia de interligação de células livre de stress, chamada de Hyper-link, que possui mais de 50 patentes exclusivas e foi complementada através do desenvolvimento em colaboração com fabricantes de equipamentos. Ao aplicar esta tecnologia, a Risen alcançou a produção em massa de módulos HJT Hyper-ion, com elevada eficiência e confiabilidade, em junho de 2023.

A fim de avaliar o desempenho dos módulos que utilizam células ultrafinas com a tecnologia Hyper-link, foi concebida uma série de testes para realizar a validação exaustiva, principalmente quanto a confiabilidade, avaliando-se os efeitos sob carga mecânica (estática e dinâmica) e a degradação do desempenho dos módulos.

3.1 Condições de Ensaio de Carga Elevada

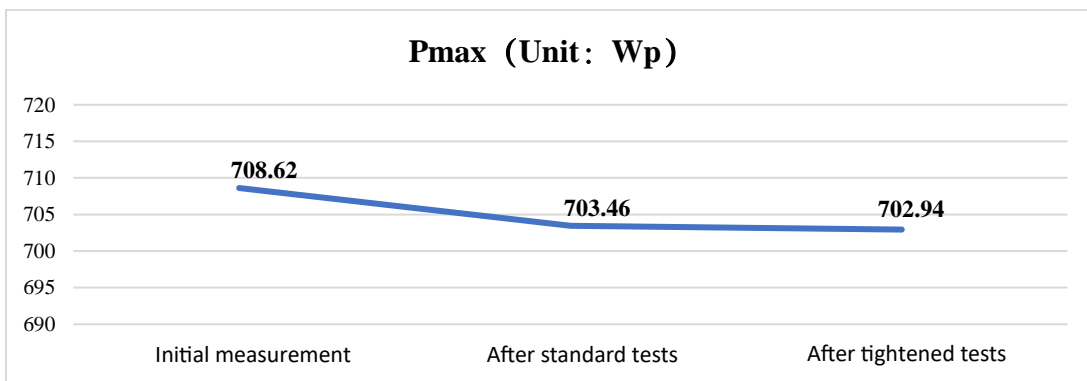
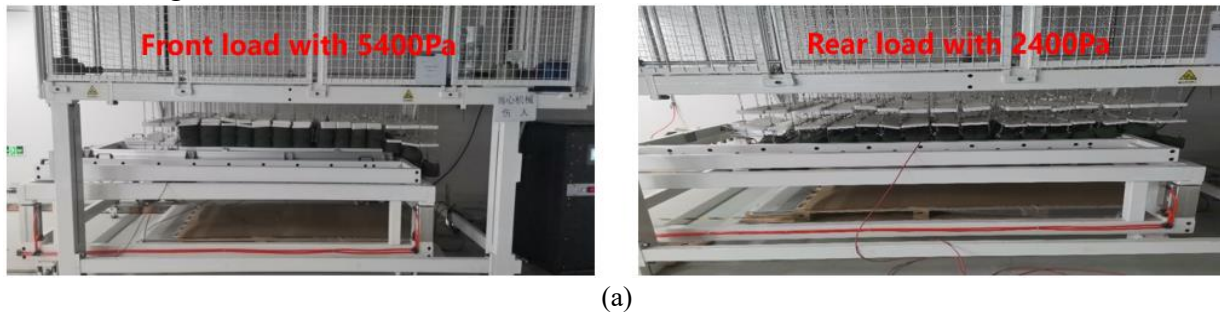
De acordo com a norma IEC 61215, realizaram-se rigorosos testes de carga estática e dinâmica nos módulos HJT Risen. As condições de ensaio são apresentadas na Tabela 3.1.

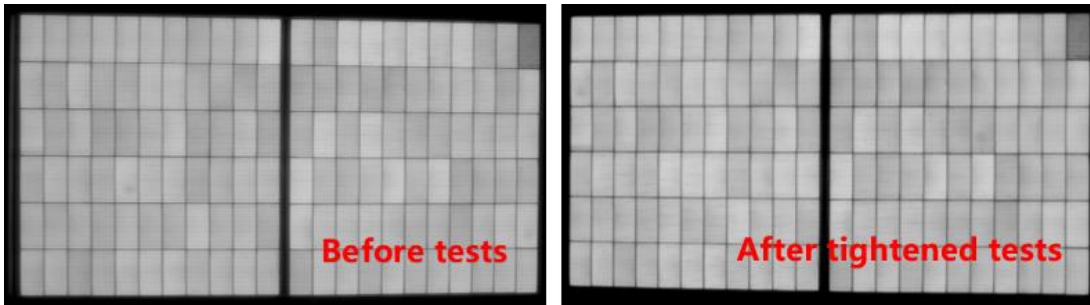
Tabela 3.1 - Ensaio de Confiabilidade nos módulos HJT Risen com células ultrafinas

Testes	Condições de Teste
Carga Mecânica Estática	Instalação com grampos, sem viga transversal/ frente 5400Pa, traseira 2400Pa
Carga Mecânica Dinâmica	frente/traseira 1000Pa, 10000 ciclos

A partir dos resultados, observou-se:

- Utilizando-se o método de instalação com grampos e sem vigas transversais, não foram detectadas fissuras ocultas ou células partidas, de acordo com o ensaio de eletroluminescência (EL), sob 5400 Pa de carga frontal e 2400 Pa de carga traseira. Além disso, a degradação da potência após o ensaio foi inferior a 1%, como mostra a Figura 2.9.





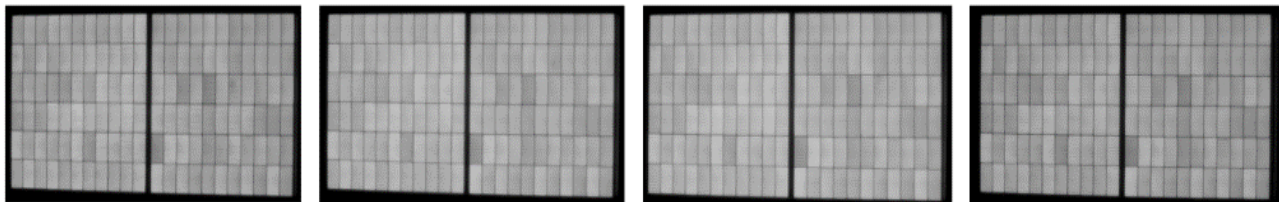
(c)

Figuras 2.9 (a) (b) (c) - Ensaio de Carga Mecânica Estática: Disposição de Cargas, Degradação de Potência e Resultados do teste EL

- Após 1000 ciclos de teste de carga dinâmica padrão, também foram realizados testes contínuos de 1000 ciclos, testes contínuos de 5000 e 10000 ciclos de carga mecânica dinâmica. Os resultados dos ensaios não revelaram fissuras ocultas, nem células quebradas, de acordo com os testes de EL. Conclui-se que os módulos atendem os requisitos normalizados para o desempenho do módulo em termos de carga dinâmica, conforme Figura 2.10.



(a)



Teste EL Inicial

Depois de 1000 cycles

Depois de 5000 ciclos

Depois de 10000 ciclos

(b)

Figuras 2.10 (a) (b) - Teste de Carga Mecânica Dinâmica: Equipamento de Ensaio, resultados dos Testes EL

3.2 Condições de Teste de Envelhecimento Acelerado

Com o intuito de validar a confiabilidade dos módulos Hyper-ion HJT Risen, constituídos de células ultrafinas, com tecnologia de interconexão Hyperlink aplicada, foram concebidos testes para aumentar os ciclos de teste normalizado para diferentes ensaios de resistência às intempéries e de envelhecimento dos módulos, segundo a norma IEC 61215:2021.

Dois módulos HJT Hyper-ion foram selecionados aleatoriamente e, então, submetidos aos testes de confiabilidade: Ensaio de Calor Úmido (Damp Heat), Ciclos Térmicos (Thermal Cycling), Congelamento Úmido (Humidity Freeze) e Degradação Induzida por Potencial (PID). Ambos os módulos foram aprovados nos testes, de acordo com os requisitos IEC.

Além disso, outros testes de ciclos múltiplos foram realizados, tais como: teste de calor úmido (85°C+85%RH), realizado durante 2000 horas (DH2000); teste de ciclos térmicos (-40°C/85°C) durante 400 ciclos (TC400); teste de congelamento úmido durante 30 horas (HF30); ensaio de degradação induzida por potencial durante 288 horas (PID288). Como esperado, a degradação da potência, após todos os testes, se manteve em valores inferiores a 3%. Também, no ensaio de degradação induzida por luz e temperatura elevada, realizado durante 324 horas (LeTID324), a degradação da potência após o ensaio foi inferior a 1%. Os resultados dos ensaios são imostrados na Figura 3.1.

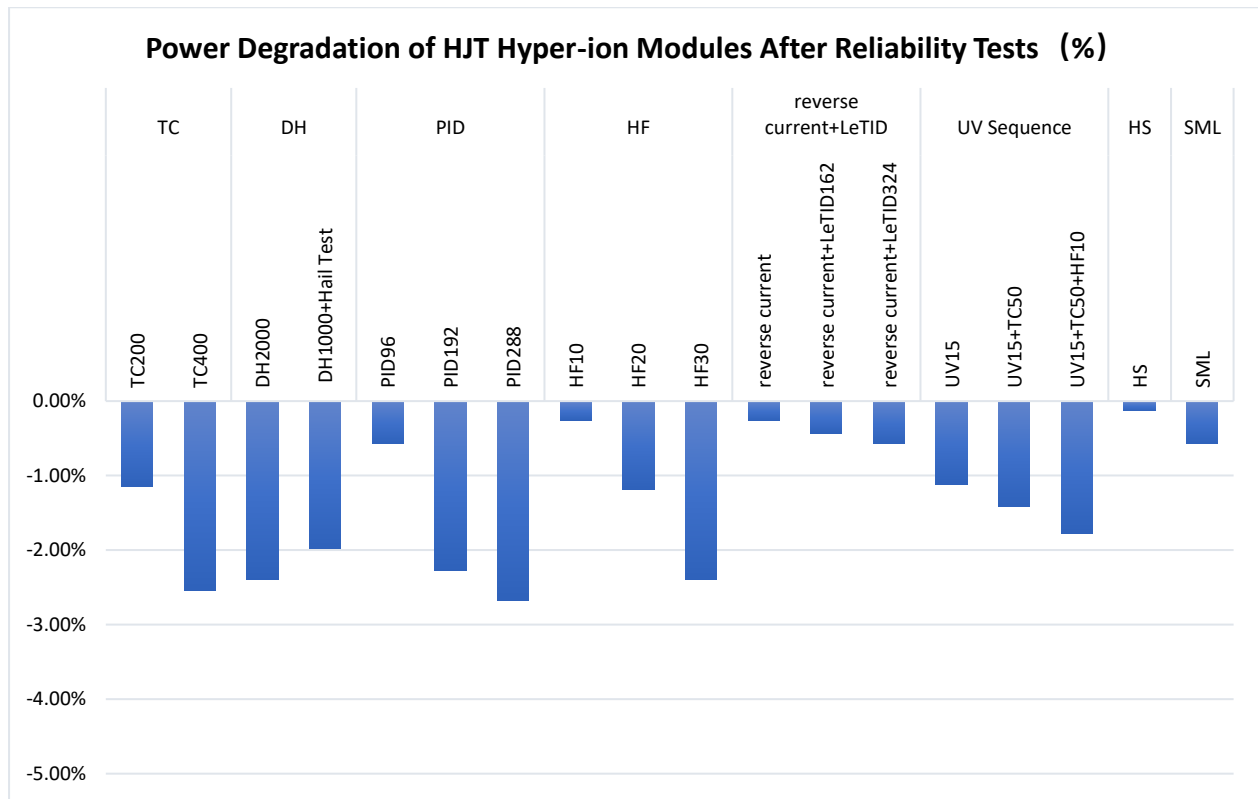


Figura 3.1 - Testes de Confiabilidade realizados nos módulos HJT Risen

Com base nos resultados dos testes acima, é evidente que, a utilização de wafers ultrafinos com a tecnologia de interconexão Hyper-link, não afeta a resistência a carga mecânica e a confiabilidade dos módulos, que atendem todos os requisitos da norma, ostensivamente. Através da tecnologia Hyper-link, os wafers ultrafinos tornam-se perfeitamente adequados para a produção de células e módulos HJT, satisfazendo as exigências da produção em massa. Sobretudo, o desempenho do módulo cumpre totalmente os padrões exigidos pelas normas IEC para aplicações de longo prazo.

Resulta então que a redução da espessura das células HJT é uma via razoável, viável e necessária para a otimização de características e de custos dos módulos. A Risen liderou esta revolução no setor através de anos de investimento em P&D e experiência na produção de células HJT.

4. Considerações e Perspectivas

Como pioneira e inovadora no desenvolvimento e industrialização de HJT, a Risen Energy acumulou uma vasta experiência nesta tecnologia desde 2018. A primeira linha piloto foi estabelecida em 2019, seguido dos primeiros envios dos módulos HJT em 2020, classificando-se como TOP1 mundial no fornecimento de HJT por dois anos consecutivos. Em 2023, a linha de produção do módulo Hyper-ion da Risen, em escala de GW, foi colocada em operação total, marcando uma conquista significativa.

Ao longo de todo o processo de desenvolvimento e industrialização das células e módulos HJT, a Risen enfrentou inúmeros desafios à produção em massa. Como consequência, Risen percebeu que o desenvolvimento e a industrialização de produtos HJT requerem a integração vertical de todas as indústrias da cadeia, a montante e a jusante, incluindo o desenvolvimento de tecnologia de wafers de silício, de células e de encapsulamento de módulos, que são interdependentes como um todo. Imagine um cenário em que cada segmento desenvolve a sua tecnologia de forma independente, sem a integração orgânica a montante e a jusante, resultaria que não permitiria atingir a produção em massa do produto final. Isso acontece quando existe uma excelente tecnologia de wafers de silício, mas que não pode ser utilizada na produção em massa, ou ainda, uma tecnologia avançada de células que, da mesma forma, não pode ser eficazmente encapsulada em módulos. Que pena!

A Risen é o primeiro fabricante do setor a produzir em massa utilizando wafers de silício ultrafinos, pasta de metalização com baixo teor de prata e tecnologia de células com zero barramentos (busbars). Estas três tecnologias desempenham um papel crucial no aumento da eficiência e na redução dos custos da tecnologia HJT. No entanto, para resultarem em grandes resultados, necessário foi o desenvolvimento da tecnologia de interconexão de células sem stress Hyperlink da Risen, que verdadeiramente integra todas as outras e que unificou os a cadeia a montante e a jusante. Com o apoio das tecnologias mencionadas, juntamente com o Hyperlink, a Risen concluiu com êxito a aplicação em massa de wafers de silício ultrafinos.

A base de produção de HJT Risen conta com 15GW de capacidade de produção, localizada em Nanbin, alcançou a produção em massa e a entrega de módulos HJT de 700Wp+ em apenas um ano.

No futuro, Risen continuará a aprofundar o desenvolvimento e a industrialização da tecnologia HJT, melhorando continuamente a eficiência e reduzindo os custos. Além disso, através da integração da tecnologia HBC e da tecnologia tandem de perovskite, a Risen continua a iterar e a atualizar os produtos Risen Hyper-ion. Acreditamos que atingir 900Wp não é um sonho, assim como 1000Wp está ao nosso alcance a medida que se melhora a eficiência das células.