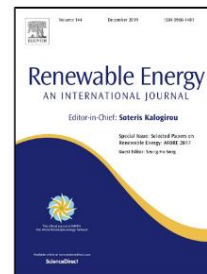


Tạp chí Bản in thử trước

Mô hình hóa và điều tra thực nghiệm các vết nứt nhỏ trong pin quang điện silicon tinh thể: Một đánh giá

Lamprini Papargyri, Marios Theristis, Bernhard Kubicek, Thomas Krametz, Christoph Mayr, Panos Papanastasiou, George E. Georghiou



Thông tin mã bài: S0960-1481(19)31158-9
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.138>
Thẩm quyền giải quyết: RENE 12050

Đề xuất hiện trong: Năng lượng tái tạo

Ngày nhận: Ngày 18 tháng 2 năm 2019

Ngày chấp nhận: Ngày 29 tháng 7 năm 2019

Vui lòng trích dẫn bài viết này như sau: Lamprini Papargyri, Marios Theristis, Bernhard Kubicek, Thomas Krametz, Christoph Mayr, Panos Papanastasiou, George E. Georghiou, Mô hình hóa và điều tra thực nghiệm các vết nứt nhỏ trong quang điện silic tinh thể: Một bài đánh giá, (2019), Có thể tái tạo Năng lượng <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.138>

Đây là tệp PDF của một bài viết đã được cải tiến sau khi được chấp nhận, chẳng hạn như thêm trang bìa và siêu dữ liệu, và định dạng để dễ đọc, nhưng vẫn chưa phải là phiên bản chính thức. Phiên bản này sẽ được biên tập thêm, sắp chữ và đánh giá trước khi xuất bản ở dạng cuối cùng, nhưng chúng tôi cung cấp phiên bản này để bài viết được hiển thị sớm.

Xin lưu ý rằng trong quá trình biên soạn, có thể phát hiện ra lỗi ảnh hưởng đến nội dung và tất cả các tuyên bố miễn trừ trách nhiệm pháp lý áp dụng cho tạp chí đều có liên quan.

© 2019 Xuất bản bởi Elsevier.

Mô hình hóa và điều tra thực nghiệm các vết nứt nhỏ trong pin quang điện silicon tinh thể: Một đánh giá

Lamprini Papargyri (tác giả liên hệ, papargyri.lamprini@ucy.ac.cy)

Phòng thí nghiệm công nghệ PV, Trung tâm nghiên cứu FOSS về năng lượng bền vững, Đại học Síp, Nicosia, 1678, đảo Síp

Khoa Kỹ thuật Xây dựng và Môi trường, Đại học Síp, Nicosia 1678, Síp

Marios Theristis (theristis.marios@ucy.ac.cy)

Phòng thí nghiệm công nghệ PV, Trung tâm nghiên cứu FOSS về năng lượng bền vững, Khoa Điện và Máy tính Kỹ thuật, Đại học Síp, Nicosia, 1678, Síp

Bernhard Kubicek (Bernhard.kubicek@ait.ac.at)

Viện Công nghệ Áo, Vienna 1210, Áo

Thomas Krametz (Thomas.Krametz@ait.ac.at)

Viện Công nghệ Áo, Vienna 1210, Áo

Christoph Mayr (Christoph.Mayr@ait.ac.at)

Viện Công nghệ Áo, Vienna 1210, Áo

Panos Papanastasiou (panospap@ucy.ac.cy)

Phòng thí nghiệm công nghệ PV, Trung tâm nghiên cứu FOSS về năng lượng bền vững, Đại học Síp, Nicosia, 1678, đảo Síp

Khoa Kỹ thuật Xây dựng và Môi trường, Đại học Síp, Nicosia 1678, Síp

George E. Georghiou (geg@ucy.ac.cy)

Phòng thí nghiệm công nghệ PV, Trung tâm nghiên cứu FOSS về năng lượng bền vững, Khoa Điện và Máy tính Kỹ thuật, Đại học Síp, Nicosia, 1678, Síp

1 Mô hình hóa và điều tra thực nghiệm 2 vết nứt nhỏ trong pin quang điện silicon tinh thể: Tổng quan 3

4 Lamprini Papargyri^{1,2,*}, Marios Theristis¹, Bernhard Kubicek³, Thomas Krametz³, Christoph Mayr³, ^{Toàn cảnh}
5 Papanastasiou^{1,2} và George E. Georgiou¹

6 ¹ Phòng thí nghiệm công nghệ PV, Trung tâm nghiên cứu FOSS về năng lượng bền vững, Khoa Kỹ thuật điện
7 và máy tính, Đại học Síp, Nicosia 1678, Síp

8 ² Khoa Kỹ thuật Xây dựng và Môi trường, Đại học Síp, Nicosia 1678, Síp

9 ³ Viện Công nghệ Áo, Vienna 1210, Áo

10 *email của tác giả liên hệ: papargyri.lamprini@ucy.ac.cy

11 Tóm tắt

12 Trong những năm gần đây, nghiên cứu khoa học về công nghệ quang điện (PV) đã tập trung vào các chế độ hỏng hóc nhằm tăng độ tin cậy, độ
13 bền và tuổi thọ của PV. Một trong những chế độ hỏng hóc chủ yếu xuất hiện trong công nghệ PV silicon tinh thể (c-Si) là nứt cell có thể
14 làm hỏng tính toàn vẹn cơ học 15 của mô-đun PV và do đó, dẫn đến mất điện do các khu vực bị ngắt kết nối của cell. Các dạng suy thoái
khác cũng có thể được kích hoạt như suy thoái cảm ứng điện thế (PID) và các điểm nóng 16. Do đó, việc hiểu biết về cơ chế nứt là rất quan trọng.
17 Bài báo này trình bày nguồn gốc và các yếu tố ảnh hưởng đến các vết nứt cell. Phân loại các vết nứt đã được tiến hành vì các đặc điểm
của chúng quyết định sự suy thoái cơ học và điện của mô-đun PV. Hơn nữa, 20 nghiên cứu thực nghiệm và số liên quan đến các vết nứt PV trên quy mô
18 wafer, cell và mô-đun PV được 21 phân tích chi tiết. Kết quả từ các cuộc điều tra trên cho thấy rằng các vết nứt không phải lúc nào cũng
19 dẫn đến sự suy giảm hiệu suất mạnh 22 và do đó tác động của các vết nứt đối với các đặc tính điện của mô-đun PV 23 vẫn còn đang gây tranh
cãi.

24 Từ khóa: vết nứt, quang điện, độ tin cậy, suy thoái, gãy xương

25 Danh pháp

Xe đập	Các thành phần của tenxơ độ cứng bậc bốn của các tính chất vật liệu hoặc Mô đun đàn hồi (GPa)
VÀ	Mô đun Young (GPa)
EQE	Hiệu suất lượng tử bên ngoài (%)
G	Mô đun cắt (GPa)
I ₀₁	Dòng điện (A)
ISC	Dòng điện ngắn mạch (A)
JREV	Mật độ dòng điện ngược (A)
Lc	Chiều dài tới hạn (mm)

t ₀₁	Môđun Weibull (-)
P	Áp suất (MPa)
PMPP	Công suất đầu ra tối đa (W)
ĐẠI HỌC	Điện trở nối tiếp
RSH	Điện trở shunt
t	Độ dày (mm)
VMPP	Điện áp ở công suất cực đại (V)
VOC	Điện áp mạch hở (V)
Và	Độ lệch (mm)

26 chữ cái Hy Lạp

ΔPMPP	Tổn thất công suất tối đa (%)
Ê _{ij}	Các thành phần của tenxơ biến dạng (-)
t ₀₁	Giá trị riêng
N	Tỷ số Poisson (-)
th	Cứng độ đặc trưng (MPa)
áp dụng	Ứng suất áp dụng (MPa)
σ _{ij}	Các thành phần của tenxơ ứng suất (GPa)
σ _{tối đa}	Ứng suất tối đa (MPa)

27 Viết tắt

Tại	Bạc
Al	Nhôm
c-Si	Silic tinh thể
CZM	Mô hình vùng kết dính
CTE	Hệ số giãn nở nhiệt
ĐẠI HỌC	Nhiệt ẩm
DML	Tải trọng cơ học động
DuraMat	Vật liệu mô-đun bền
DWS	Cửa dây kim cương
ANH TA	Phát quang điện
EVA	Etylen Vinyl Acetate
THỰC TẾ	Phân tích phần tử hữu hạn
FF	Hệ số lấp đầy
ĐẠI HỌC	Cơ quan Năng lượng Quốc tế

ITRPV	Lộ trình công nghệ quốc tế cho quang điện
Tiếng Việt	Khóa nhiệt độ
MBB	Thanh cái đa năng
Máy tính	Tải cơ học
MPP	Điểm công suất cực đại
SỞ HỮU	Phân tích mô hình hoạt động
PVPS	Hệ thống điện quang điện
PL	Phát quang
PV	quang điện
PVB	Polyvinylbutyral
Và	Silic
SML	Tải trọng cơ học tĩnh
SUC	Hợp chất đơn vị nhỏ
SWCT	Công nghệ tiếp xúc Smartwire
SWS	Cứ a dây bunn
TCT	Kiểm tra chu trình nhiệt
TPS	Chất đàn hồi silicon nhiệt dẻo
3D	Ba chiều
3PB	Uốn cong 3 điểm
4PB	Uốn cong 4 điểm

28

29 1. Giới thiệu

30 Ngành công nghiệp quang điện, với silic tinh thể (c-Si) là vật liệu bán dẫn được sử dụng phổ biến nhất, đang phát triển để đáp ứng
 31 nhu cầu năng lượng sạch toàn cầu. Tấm wafer silic (Si) đóng góp khoảng 40% vào 32 chi phí của một tế bào quang điện silic [1]. Lộ
 trình công nghệ quốc tế năm 2010 cho quang điện (ITRPV) 33 báo cáo rằng cần phải giảm đáng kể độ dày của tấm wafer tế bào quang điện silic để
 giảm chi phí của 34 tế bào quang điện và do đó, của các mô-đun PV [1]. Tuy nhiên, các tấm wafer mỏng hơn dẫn đến độ bền kém hơn của các tế bào
 quang điện 35 trước tải trọng cơ học dẫn đến nứt tế bào. Một trong những thách thức công nghệ hiện nay là xác định 36 và loại bỏ các nguồn gây
 ra các khuyết tật cơ học có thể kích hoạt sự khởi đầu và lan truyền vết nứt dẫn đến 37 sự thoái hóa cơ học của tấm wafer và cuối cùng là sự vỡ
 của các tấm wafer và tế bào silic. 38

Trong quá trình chế tạo pin, các pin mặt trời được tải nhiệt cơ học và do đó 39 biến dạng vĩnh viễn được tạo ra [2]. Những biến dạng
 vĩnh viễn này tương ứng với ứng suất dư đáng kể 40 có thể dẫn đến nứt trong các pin mặt trời silicon. Người ta thấy rằng 2% tấm wafer silicon
 bị vỡ trong quá trình 41 sản xuất của chúng dẫn đến giảm năng suất, tăng chi phí sản xuất và tổn thất vật liệu từ 5-10% [3].

42 Mặc dù việc tối ưu hóa các quy trình chế tạo có thể làm giảm nứt tế bào, nhưng vẫn không thể tránh khỏi
 những khiếm khuyết trong quá trình sản xuất 43. Vấn đề nứt trở nên tồi tệ hơn khi độ dày của wafer giảm [4],
 [5]. Do 44 điều này, mặc dù tất cả các tế bào bị hỏng đều được phát hiện và loại bỏ khỏi quy trình sản xuất, nhưng

45 khó tránh hoàn toàn sự hình thành các vết nứt nhỏ và định lượng tác động lâu dài của nó đối với 46 hiệu suất của mô-đun PV. Các khuyết tật và vết nứt nhỏ hiện có từ quá trình sản xuất làm tăng nguy cơ vỡ 47 trong toàn bộ chu kỳ sản xuất vì chúng có thể lan truyền thêm do tải trọng trong quá trình vận chuyển, 48 xử lý và lắp đặt tại hiện trường [6]. Sự hình thành và lan truyền vết nứt cũng có thể xảy ra trong quá trình 49 vận hành khi tải trọng gió, tải trọng tuyết và chu kỳ nhiệt độ được áp dụng cho các mô-đun PV [7].

50 Các vết nứt thường vô hình với mắt thường và có thể dẫn đến các vùng ô bị ngắt kết nối điện, gây ra sự giảm tuyến tính trong dòng
51 điện ngắn mạch và điện trở nối tiếp cao hơn, do đó làm giảm công suất đầu ra của mô-đun 52 [8], [9]. Hơn nữa, các vết nứt nhỏ chủ yếu hoạt động như các trung tâm tái hợp với nhiệt độ cục bộ 53 tăng [10]–[12]. Nhìn chung, chiều dài, hướng và vị trí của các vết nứt nhỏ trong tấm bán dẫn Si ảnh hưởng 54 đến đầu ra của các ô silicon đa tinh thể (multi-c-Si) và đơn tinh thể (mono-c-Si). 55

Thông thường, tải trọng cơ học gây ra các vết nứt trong các tế bào quang điện dựa trên wafer, thường dẫn đến suy giảm công suất lên tới 2,5% 56 trong các mô-đun PV 60 cell, trong trường hợp các vết nứt không cô lập các khu vực cell [8]. Hơn nữa, các mô-đun PV 57 có thể xuất hiện các vết nứt gây ra các khu vực cell không hoạt động sau 15 năm hoạt động. Một khảo sát trên hơn 58.250 mô-đun PV đã báo cáo rằng tổn thất công suất lên tới 20% do các vết nứt cell kết hợp với hiện tượng nâu hóa và tách lớp của etylen vinyl 59 axetat (EVA) [13]. Kết quả thử nghiệm cho thấy vết nứt cell gây ra suy giảm công suất 60 là 4% và hệ số lấp đầy (FF) giảm 3% [14]. Kết quả từ một thử nghiệm tải trọng cơ học khác 61 cho biết công suất đầu ra tối đa (PMPP) và FF giảm lần lượt là 3,6% và 3% 62 [15]. Sau khi áp dụng 200 chu kỳ đóng băng độ ẩm (HF), các vết nứt hiện có đã lan truyền và mở rộng 63 các vùng bị cô lập về điện gây ra suy giảm công suất lên tới 10%. et al. [16] đã quan sát thấy công suất giảm 64 1,37% sau khi áp dụng tải động, điều này có thể chấp nhận được khi xét đến giới hạn 3% 65. Kajari-Schröder et al. [16] phát hiện ra rằng 7% các ô bị nứt đã phát triển một vùng không hoạt động và 66 29% trong số chúng đã bị suy thoái sau khi chịu tải cơ học và 200 chu kỳ HF. Morlier et al. [17] đã mô phỏng tác động 67 của các vết nứt ô lên công suất đầu ra của mô-đun PV, xét đến hình dạng của các ô bị vỡ và 68 vùng bị vỡ tương ứng. Họ đã báo cáo rằng có tới 19% các mô-đun bị mất hơn 20% công suất đầu ra của chúng. Các quan sát cho thấy rằng nếu một vết nứt cắt qua ngón tay đủ mở, ngón tay có thể bị hỏng 70 về độ căng và dòng điện đến thanh cái sẽ bị chặn. Người ta quan sát thấy rằng số lượng vết nứt và 71 sự suy giảm công suất không thể tương quan do các đặc điểm vết nứt khác nhau (ví dụ: hướng, vị trí, 72 chiều rộng, v.v.) [18]. Sự suy giảm công suất do các vết nứt này tăng theo thời gian và khi điện trở vết nứt 73 đạt giá trị trên 10 vùng không hoạt động cũng có thể phát triển [8], [17]. Do vùng 74 cell bị cô lập, cell bị đưa vào phân cực ngược và toàn bộ dòng điện chạy dọc theo đường dẫn cục bộ có thể dẫn đến 75 điểm nóng [19]. 76 Khi tỷ lệ diện tích cell bị ngắt kết nối lớn hơn 8%, tổn thất công suất liên quan gần như tỷ lệ thuận với diện tích cell bị ngắt kết nối trong khi đối với các mô-đun PV được kết nối nối tiếp, sự thay đổi của tổn thất công suất 78 là siêu tuyến tính. Đối với các mô-đun 60 cell thông thường, khi diện tích cell bị ngắt kết nối đạt khoảng 79 50%, điốt bỏ qua được kích hoạt gây mất khoảng một phần ba công suất mô-đun dẫn đến 80 mô-đun bị hỏng [18]. Mặc dù sự suy giảm công suất lâu dài do nứt cell có thể trở thành cơ chế hao mòn quan trọng, nhưng kiến thức và hiểu biết về hiện tượng này vẫn còn mơ hồ và không có 82 bộ thử nghiệm được xác định rõ ràng nào giải thích về nó trong IEC 61215 [20]. 83

Các vết nứt trong các mô-đun PV do tải nhiệt cơ học có thể phát triển đang được xem xét, vì chúng 84 có thể làm giảm hiệu quả và độ tin cậy của các mô-đun PV [21]. Tầm quan trọng của việc tiếp tục điều tra cơ chế hỏng hóc này 85 được chứng minh bằng số lượng ngày càng tăng các hoạt động và sáng kiến quốc tế do 86 Chương trình Hệ thống Điện PV (PVPS) của Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), 87 Phòng thí nghiệm Quốc gia Sandia (SNL) và Phòng thí nghiệm Năng lượng Tái tạo Quốc gia (NREL) thực hiện, để nêu tên một số ít. Một báo cáo từ 88 Nhiệm vụ PVPS 13 của IEA, mô tả các vết nứt là cơ chế hỏng hóc chủ yếu trong hai năm đầu tiên

89 hoạt động gây ra tỷ lệ suy thoái lên đến 3% mỗi năm ở tất cả các vùng khí hậu bên cạnh khí hậu lạnh và tuyết 90 nơi nó có thể đạt tới 8% mỗi năm [22]. Hơn nữa, tập đoàn Vật liệu mô-đun bền (DuraMat) 91 đang tiến hành nghiên cứu để phát triển các vật liệu cải tiến nhằm giảm thiểu các vết nứt ô 92 và các dạng suy thoái khác [23]. Mặc dù có sự quan tâm lớn đối với việc giảm thiểu và hiểu rõ hơn 93 về các vết nứt trong PV, không có nghiên cứu đánh giá nào có sẵn ngoài một số nghiên cứu chỉ liên quan đến các kỹ thuật phát hiện vết nứt 94 [21], [24]-[26]. Mặc dù một số lượng đáng kể các công trình liên quan đến sự khởi đầu 95 và tác động của các vết nứt trong các mô-đun PV đã được công bố, tại thời điểm viết bài báo này, theo hiểu biết tốt nhất của 96 tác giả, không có tài liệu hiện có nào tiến hành hoặc báo cáo một đánh giá toàn diện về 97 chủ đề mô phỏng thử nghiệm và số về các vết nứt trong các mô-đun PV. Kiến thức về mô phỏng 98 và các nghiên cứu thực nghiệm về vết nứt PV rất quan trọng để hiểu được tác động đầy đủ của chúng đối với sự suy giảm về mặt cơ học và điện của các mô-đun PV. 100

Nghiên cứu hiện tại phân tích và xác định nhiều khía cạnh khác nhau có thể hữu ích cho cộng đồng nghiên cứu và công nghiệp 101 để có được kiến thức chuyên sâu và có hệ thống về chủ đề vết nứt vi mô PV. 102 Thông tin liên quan đến vết nứt trong tấm bán dẫn silicon và mô-đun PV khá rải rác trong tài liệu; do đó, rất khó để xác định 103 vết nứt 1) nguồn gốc, 2) nguyên nhân gốc rễ và các yếu tố ảnh hưởng đến chúng, 3) phân loại 104 thành các loại, 4) cách chúng lan truyền và 5) các mô phỏng/thí nghiệm đã được thực hiện cho đến nay 105 về tác động của chúng đối với các đặc tính cơ học và điện của mô-đun PV. Do đó, công trình này 106 tìm cách cung cấp một cái nhìn tổng quan, phân tích và đánh giá một cách phê phán các nghiên cứu có sẵn được báo cáo trong 107 tài liệu, để hiểu rõ hơn về các thông số gây ra sự hình thành và 108 sự lan truyền của vết nứt vi mô PV và tác động của chúng đối với độ bền cấu trúc và công suất đầu ra.

109 2. Nguồn gốc của các vết

110 nứt nhỏ Có một số giai đoạn liên quan đến sự hình thành các vết nứt nhỏ: (i) quá trình cắt thái
111 hoặc thanh tinh thể, (ii) quá trình sản xuất pin hoặc mô-đun do các yếu tố bên ngoài, (iii) vận chuyển/
lắp đặt mô-đun 112 không đúng cách và (iv) thời gian vận hành nhà máy điện do các yếu tố môi trường bên ngoài
113 như tuyết, gió, v.v. [27]. Sự thay đổi của quy trình sản xuất có thể gây ra các vết nứt trong quá trình
sản xuất mô-đun PV 114 [18], có thể tránh được bằng cách cải thiện các quy trình sản xuất [28]. Các quy trình
cắt lát wafer, hàn pin 115 và cán mỏng trong quá trình chế tạo các pin và mô-đun Si gây ra thêm 116 vết nứt
và do đó tính toàn vẹn cơ học của cấu trúc sẽ bị giảm.

117 Hầu hết các chất nền Si trong các ứng dụng quang điện được sản xuất bằng cách đúc một thỏi Si tiếp theo là cơ a wafer 118. Cơ a này
[29], là bước đầu tiên trong quá trình xử lý một thỏi Si, dẫn đến hư hỏng gia công 119 như các vết nứt trên bề mặt hoặc bề mặt dư thừa của wafer
Si. Công nghệ cơ a dây kim cương (DWS) wafer 120, đã được sử dụng rộng rãi trong những năm gần đây, ít tốn kém hơn so với công nghệ cơ a dây bùn
121 (SWS) wafer thông thường. Mặc dù, wafer cắt DWS gây ra nhiều vết nứt 122 hơn so với wafer cắt SWS [30] trong khi độ sâu vết nứt dư thừa bề mặt
do SWS gây ra cao hơn độ sâu do DWS gây ra [31], [32]. Trong trường hợp SWS, các vết nứt có độ sâu điển hình từ 10-20 [33] đến 124 và sự phân bố
của chúng là ngẫu nhiên [34]. Do DWS, các vết nứt có thể được tìm thấy theo chu kỳ dọc theo hướng cơ a 125 [35] và độ sâu vết nứt điển hình là
2-13 [35]. Tuy nhiên, mối tương quan giữa hướng hạt 126 và độ sâu vết nứt vẫn còn gây tranh cãi [35], [36]. Độ bền hông của các tấm wafer dọc theo
hướng dây 127 giảm so với các tấm wafer cắt bằng bùn, nhưng tăng theo hướng vuông góc với dây 128 [37]. Watanabe và cộng sự đã báo cáo rằng độ
dày lớp bị hỏng có thể giảm từ 20 xuống 8 nếu SWS 129 được thay thế bằng DWS [38]. Việc tối ưu hóa các thông số như tốc độ nạp liệu [31], kích
thước hạt [39], tốc độ [31], [35], [40], lực căng 130, góc cung của cơ a dây [41] và loại nhựa [38] có thể làm giảm độ sâu vết nứt.

131 Độ sâu vết nứt vi mô dư ở bề mặt ban đầu trên bề mặt wafer càng cao thì vết nứt càng dễ hình thành 132. Do đó, việc loại bỏ vật liệu trong quá trình cơ a có thể được coi là nhiều vết lõm siêu nhỏ 133 gây ra các vết nứt siêu nhỏ, bề mặt gồ ghề và sự kết hợp lại các cặp lỗ electron, đòi hỏi phải loại bỏ bằng quy trình khắc hư hỏng bằng cơ a 134 [42]. Một số nghiên cứu đã báo cáo rằng các wafer cắt theo cách này kém ổn định hơn nhiều so với các wafer đã khắc [43]-[45]. Hơn nữa, mặc dù quy trình khắc tốn kém, nhưng nó nhằm mục đích giảm 136 lượng hư hỏng hoặc tránh hoàn toàn hư hỏng. 137

Một trong những bước xử lý quan trọng nhất trong quá trình sản xuất pin mặt trời in lưu ý là quá trình nung 138, trong đó nhôm in lưu ý và bột bạc được nung ở nhiệt độ cao để 139 tạo ra các tiếp điểm điện [46], [47]. Do tính chất nhiệt cơ học của các vật liệu khác nhau không khớp nhau, nên ứng suất dư được tạo ra bên trong pin mặt trời Si. Hiện tượng cong vênh của tấm bán dẫn xảy ra khi làm nguội, 141 có thể giảm bằng cách thay đổi lượng và tính chất hóa học của bột nhão và điều kiện nung [47]. Tuy nhiên, 142 có một giới hạn mà ở đó bột nhão nhôm in lưu ý sẽ tạo ra lớp trừ ở bề mặt sau không đồng nhất, 143 ảnh hưởng đến tính chất điện của pin [48], [49].

144 Ngoài ra, quá trình hàn là một bước quan trọng trong quá trình chế tạo các mô-đun PV silicon tinh thể 145, đặc biệt là trong những năm gần đây, khi độ dày của các tấm bán dẫn đã giảm mạnh trong khi diện tích ô 146 đã tăng lên. Do sự thay đổi của hệ số giãn nở nhiệt (CTE), ứng suất nhiệt cơ học lớn 147 được tạo ra trong quá trình hàn. Những ứng suất này có thể gây ra các vết nứt 148 có thể phát triển khi mô-đun PV tiếp xúc với chu kỳ nhiệt. Các vết nứt thường được tạo ra từ 149 tiếp xúc vật lý của các ô c-Si giòn khi sử dụng phương pháp gia nhiệt bằng sắt điện để hàn. Sau đó, công nghệ ánh sáng hồng ngoại 150 [50]-[52] và công nghệ gia nhiệt bằng laser [53]-[55] đã được giới thiệu để tránh tiếp xúc vật lý 151 và do đó, tránh bất kỳ sự hình thành vết nứt nào. Với sự tiến bộ của công nghệ, các phương pháp kết nối mới 152 đã được áp dụng trong ngành công nghiệp PV như gia nhiệt siêu âm [56], phun nhiệt [57], keo dẫn điện 153 [58]-[63] và hàn cảm ứng điện từ [64]. 154 Quá trình cán mỏng (đóng gói) rất quan trọng đối với tính toàn vẹn của các mô-đun PV trong khi trọng tâm 155 thường là đánh giá tác động của quá trình này đến chất lượng đóng gói của các mô-đun PV. 156 Mỗi quan hệ giữa độ tin cậy của mô-đun với chất lượng đóng gói vẫn chưa được giải quyết thỏa đáng trong 157 tài liệu [22]. Mặc dù vậy, một số lượng lớn các lỗi đã được báo cáo trong quá trình cán mỏng cho thấy 158 ứng suất dư cao trong các mô-đun PV có xu hướng tạo ra các vết nứt ô. Các nghiên cứu trước đây đã báo cáo rằng 159 ứng suất tối đa nằm gần mép của bộ kết nối bằng đồng và do đó các vết nứt 160 dự kiến sẽ bắt đầu ở khu vực này. Một nghiên cứu thực nghiệm khác cho thấy các vết nứt do cán mỏng thể hiện 161 hướng $\pm 45^\circ$ [65]. Thay đổi các đặc tính vật liệu như độ cứng của chất đóng gói [66], [67] và

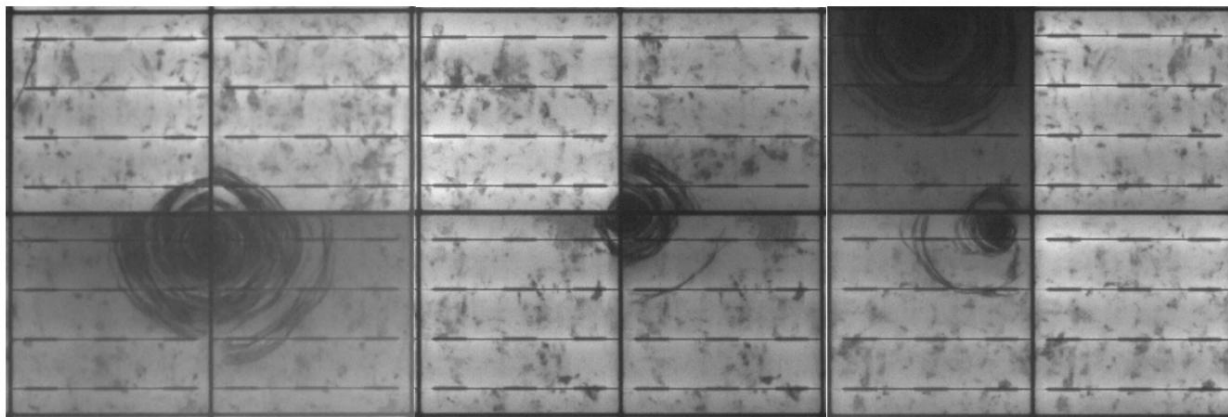
Độ dày kết nối 162 [65] có thể làm giảm khả năng nứt.

163 Bên cạnh các vết nứt gây ra trong quá trình sản xuất, rỉ ro cũng tồn tại trong quá trình đóng gói và vận chuyển các mô-đun PV 164 [68]. Hiện tại không có quy trình chuẩn nào về vận chuyển các mô-đun PV. Chỉ có một vài nghiên cứu 165 điều tra tác động của việc vận chuyển các mô-đun PV đến hành vi nứt và do đó, công suất PV 166. Các thử nghiệm mô phỏng vận chuyển cho thấy các vết nứt đơn lẻ có thể xuất hiện trong các mô-đun PV gây ra tổn thất công suất thấp hơn 1% [6], [68]. Vận chuyển và xử lý không đúng cách có thể được giảm thiểu bằng cách thiết kế lại bao bì 168 với lớp bảo vệ và đệm bổ sung. Có báo cáo rằng vận chuyển các mô-đun theo chiều dọc 169 có tác động thấp hơn đến các vết nứt ô so với các mô-đun xếp chồng theo chiều ngang [6]. Các ứng suất phát sinh trong quá trình 170 xử lý và vận chuyển, tập trung vào phương pháp xử lý wafer, được gọi là "kẹp Bernoulli", đã được 171 kiểm tra trong [69] cho thấy lưu lượng không khí, loại wafer và độ dày có thể ảnh hưởng đến phạm vi và 172 sự phân bố ứng suất phát sinh trong wafer. Mô phỏng vận chuyển trong 3 giờ đã tạo ra các vết nứt nhỏ đơn lẻ 173 trên các mô-đun được đóng gói dẫn đến tổn thất công suất tối đa là PMPP=-1,5%. [68]. Sau đó, 174 các mô-đun đã được tiếp xúc với các thử nghiệm môi trường khác nhau như chu kỳ nhiệt và gió động và

175 đã ghi lại mức mất điện tối đa là 2,8%. Để xác định hành vi điện và cơ học của 176 mô-đun PV, hình ảnh phát quang điện (EL) cũng như phép đo IV đã được chụp.

177 Cuối cùng, các mô-đun PV phải tiếp xúc với các điều kiện ngoài trời khắc nghiệt đôi khi được đặc trưng bởi các chu kỳ nhiệt sâu 178, tốc độ gió cao [70], tải trọng tuyết [8], [71], [72] và tác động của mưa đá [71], [73]-[75] có thể gây ra hư hỏng vĩnh viễn và/hoặc suy giảm công suất trong suốt vòng đời của hệ thống. Các điều kiện môi trường như vậy làm tăng ứng suất vượt quá ứng suất dư từ các quy trình sản xuất như cán mỏng và hàn. Do đó, các điều kiện khí hậu khắc nghiệt dẫn đến khả năng gây cao hơn và làm giảm độ tin cậy và hiệu quả của mô-đun PV 181 182 [3-5]. Tải trọng cơ học trên các mô-đun PV cũng có thể được tạo ra từ tuyết và 183 gió. Với mật độ từ 30-50 kg/m³ (tuyết tươi) đến 800-900 kg/m³ (tuyết đóng băng), tuyết gây ra 184 tải trọng tĩnh lớn lên toàn bộ mô-đun PV được xác định bởi chiều cao của tuyết [76]. Có thể quan sát thấy mẫu hình nứt chữ X trong trường hợp ML đồng nhất nặng như tuyết [18]. Hơn nữa, cần lưu ý rằng tuyết 186 và băng trong nhiều trường hợp khác nhau có thể gây ra cả bóng râm đồng đều và một phần và do đó, điều quan trọng là phải 187 kiểm tra hành vi và ảnh hưởng của tuyết và băng lên các mô-đun PV. Gió có thể tác động đều đặn và 188 tạm thời, tạo ra tải trọng tĩnh và động lên các mô-đun PV trong khi mưa đá gây ra ứng suất va chạm.

189 Tùy thuộc vào hướng gió, các ô có thể bị nén hoặc căng. Nếu các ô bị căng, vết nứt có thể hình thành. Tuy nhiên, khi tải được rút ra, các vết nứt có thể đóng lại dẫn đến sự phục hồi điện 191 [77]. Khi mưa đá tác động lên mô-đun PV bán dẫn hoạt động, tùy thuộc vào kích thước và vận tốc của chúng, 192 chúng có thể làm hỏng vật liệu che chắn phía trước hoặc các bộ phận hoạt động dẫn đến tác động cục bộ cao đến 193 hiệu suất của mô-đun PV. Trong trường hợp các mô-đun PV cứng, các vết nứt ô phụ thuộc vào độ dày kính, 194 đặc điểm mưa đá (kích thước và cường độ của mưa đá, tốc độ gió, v.v.), loại khung và giá đỡ [71]. Mô-đun PV thủy tinh-195 có thể chịu được tác động của mưa đá mà không bị nứt ô [71]. Tác động của mưa đá 196 đã được tái tạo bằng thực nghiệm với các thử nghiệm va chạm sử dụng súng khí nén trên PV bán dẫn hoạt động và được mô phỏng 197 bằng số theo hai phương pháp trong phần mềm FEAP của Corrado et al. [75]. Người ta đã chỉ ra rằng lớp phủ nhựa 198 thường không bị hư hại sau va chạm, trong khi các tế bào quang điện bị nứt, độ mở rộng của chúng 199 phụ thuộc vào độ cứng của chất nền. Hơn nữa, người ta đã báo cáo rằng chất nền càng cứng thì khả năng hư hỏng sẽ chỉ giới hạn ở một vùng nhỏ xung quanh điểm va chạm càng cao, 201 trở nên không hoạt động về mặt điện, trong khi khu vực bên ngoài hình thành một vài vết nứt xuyên tâm, như được mô tả trong Hình 202 1. Khi các tải trọng như vậy tác động lên một mô-đun, các tế bào quang điện sẽ uốn cong tùy thuộc vào cấu trúc của kính, khung và 203 các cấu trúc lắp. Tải trọng tuyết và gió là một trong năm nguyên nhân gây hư hỏng phổ biến nhất và chiếm 204 trong 10-30% các lỗi [78].



205

206 Hình 1. Hình ảnh EL cho thấy kết quả của tác động mưa đá mô phỏng thực nghiệm thu được tại Viện Công nghệ Áo (AIT). Một số vết nứt xuyên tâm hình thành xung quanh điểm va chạm xảy ra thiệt hại.

209 Mặc dù, các vết nứt là không thể tránh khỏi trong quá trình sản xuất hoặc tuổi thọ của các mô-đun PV, nhưng việc xác định các đặc điểm của vết nứt là rất quan trọng để giảm thiểu sự hình thành và lan truyền vết nứt. Các đặc điểm của vết nứt như các điểm quan trọng để hình thành vết nứt, kiểu mẫu, hướng, v.v. và các thông số ảnh hưởng đến chúng phụ thuộc rất nhiều vào giai đoạn hình thành vết nứt. Bảng 1 tóm tắt các đặc điểm của vết nứt dựa trên nguồn gốc của chúng.

214 Bảng 1. Tóm tắt đặc điểm vết nứt dựa trên nguồn gốc của chúng.

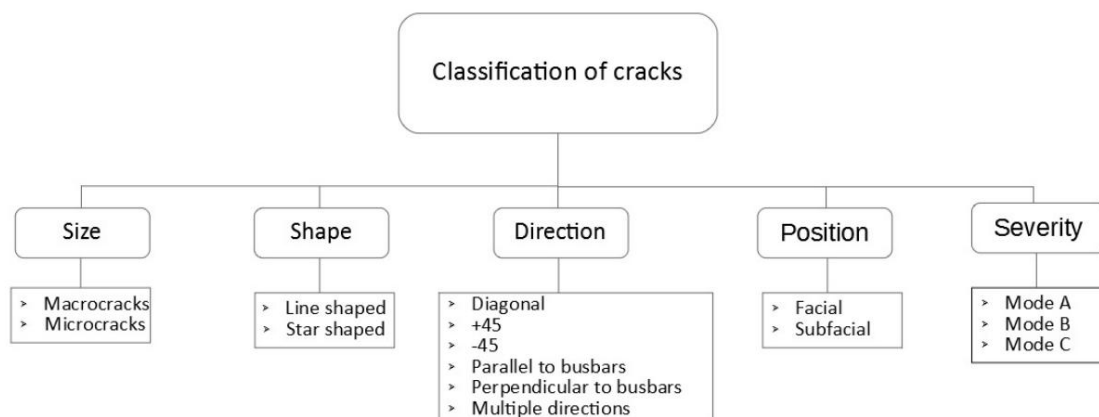
Nguồn gốc	Các vết nứt bắt đầu như thế nào	Phân phối vết nứt	Các thông số ảnh hưởng đến vết nứt	Bình luận
Cứ a dây bunn (SWS)	Hư hỏng do tương tác giữa các hạt cắt (hạt SiC), dây và tấm Si [29].	Phân phối vết nứt ngẫu nhiên trong Si wafer; độ sâu vết nứt điển hình, 10-20 [33].	Các hạt càng lớn thì các vết nứt càng dài [30].	Độ sâu vết nứt dư thừa bề mặt do SWS gây ra lớn hơn so với độ sâu do DWS gây ra [30]-[32], [79].
Dây kim cương cứng (DWS)	Các vết nứt xảy ra do lớp phủ Si bị trầy xước bởi các hạt kim cương cứng [31].	Theo hướng rãnh cứ a và xuất hiện định kỳ trong các tấm Si [35]; phạm vi độ sâu vết nứt điển hình nằm trong khoảng từ 2 đến 13 [35]. Mối tương quan có thể tranh cãi giữa hướng hạt và độ sâu vết nứt [35], [36].	Giảm tốc độ nạp liệu [31], kích thước hạt [39] và tăng tốc độ dây [31], [35], [40] có thể làm giảm độ sâu của vết nứt. Điều quan trọng là phải kiểm soát lực căng và góc cung của cứ a dây để tránh bất kỳ vết nứt bề mặt nào [41]. Nhựa được sử dụng làm vật liệu liên kết của hạt trên dây có thể làm giảm vết nứt vì nó hấp thụ rung động và các cú sốc trong quá trình cứ a dây [38].	Độ sâu vết nứt có thể giảm từ 20 xuống 8 m nếu SWS được thay thế bằng DWS [38]. Các tấm cắt DWS gây ra nhiều vết nứt hơn so với các tấm cắt SWS [30]. Độ bền hỏng của các tấm wafer dọc theo hướng dây trong DWS giảm so với các tấm wafer cắt bằng bunn, trong khi nó tăng theo hướng vuông góc với dây [37].
Bắn	Do ứng suất nhiệt cơ học được gây ra bởi nhiệt độ cao của quá trình tiếp xúc điện [46], [47].	Bắt đầu dọc theo thanh cái phía sau tại giao diện giữa thanh cái Al và Al/Ag [80] và lan truyền từ giao diện vào tấm bán dẫn silicon đã cắt [46], [47].	Hóa chất của keo dán và điều kiện nung có thể làm giảm độ cong của wafer và ứng suất dư [47].	In lưu ý và nung có thể làm tăng số lượng ô nứt khoảng 1% do lỗi lặp lại [81].
Hàn	Do ứng suất nhiệt cơ học trong các tế bào vì sự thay đổi CTE của các vật liệu khác nhau [82].	Vùng gần cuối dư thừa hàn trong lớp Si là vùng ứng suất nhiệt cơ học cao quan trọng [83], khu vực quá hạn đến cái [84]. Các vết nứt của ô bắt đầu chủ yếu ở rìa thanh cái phía trước [85] có hướng chéo hoặc $\pm 45^\circ$ [86].	Tăng tốc độ và giảm công suất của hệ thống hàn [84] và sử dụng điểm nóng chảy hàn thấp [87] sẽ làm giảm khả năng nứt.	Loại công nghệ kết nối ảnh hưởng đến tiếp xúc vật lý và do đó ảnh hưởng đến ứng suất cơ học phát sinh.
Cán màng	Quá trình cán màng của các tế bào Si tạo ra ứng suất dư trong Si wafer do nhiệt độ và áp suất cao [24].	Ứng suất tối đa xảy ra gần cạnh của bộ kết nối đồng [66], [88]-[91]. Các vết nứt có hướng $\pm 45^\circ$ [65].	Độ cứng của chất đóng gói cao hơn dẫn đến tải trọng gây thấp hơn [25], [31]. Ứng suất tăng lên khi các mối liên kết dày lên [30].	Quá trình cán màng là một hoạt động quan trọng trong chu trình sản xuất vì một số vết nứt mới xuất hiện sau bước này [89]. Các ô nằm gần khung chịu nhiều ứng suất và dịch chuyển hơn [83].
Vận chuyển Do rung động và va chạm [83].		Các thử nghiệm mô phỏng vận chuyển cho thấy các vết nứt ô đơn phân bố ngẫu nhiên dọc theo bề mặt mô-đun [6], [68].	Việc xếp chồng và vận chuyển các mô-đun PV theo chiều dọc có tác động thấp hơn đến các vết nứt của ô pin [33].	Các thử nghiệm mô phỏng vận chuyển cho thấy các vết nứt ảnh hưởng không đáng kể đến công suất đầu ra (tổn thất công suất thấp hơn 1%) [6], [68].

Tuyết	Trọng lượng của tuyết tích tụ trên các mô-đun PV có thể gây ra gãy vỡ ứng các tế bào thủy tinh và Si [72].	Các vết nứt ô có hướng song song với thanh cái và cũng có dạng đường chéo và dạng cây [18], [77]. Một mẫu vết nứt chữ X được quan sát thấy ở cấp độ mô-đun [18].	Tải trọng được áp dụng chịu ảnh hưởng bởi mật độ và chiều cao của tuyết [76], ví dụ: tuyết tư đi cao 1 m chịu tác dụng 500 Pa [77]. Loại keo dán giữa khung và kính ảnh hưởng đến độ bền của mô-đun [71].	Để mô phỏng tải trọng gió hoặc tuyết đồng nhất, một thử nghiệm SML với tải trọng 2400 Pa được áp dụng cho các mô-đun PV lắp theo chiều ngang. Tải trọng 5400 Pa được sử dụng để thử nghiệm đường hợp tải trọng nặng [83]. Các mô-đun PV nghiêng được lắp đặt tại hiện trường chịu tải trọng tuyết không đồng nhất với các đặc điểm tải trọng hoàn toàn khác nhau [92].
Gió	Áp suất gió có thể làm tăng ứng suất vượt quá ứng suất dự dẫn đến gãy vỡ tế bào năng lượng mặt trời [18].	Mẫu vết nứt tương tự như trường hợp tải tuyết [18].	Khi áp suất hút gió được áp dụng, các tế bào năng lượng mặt trời chịu ứng suất nén và các vết nứt không được hình thành [77]. Nếu áp suất thấp (tương tự như áp suất gió hoặc tải trọng tuyết) được áp dụng, các tế bào chịu lực căng và các vết nứt bắt đầu/lan truyền.	Gió được coi là tĩnh trong IEC 61215 [20]. Tuy nhiên, gió có thể tác động liên tục hoặc liên tục, tạo ra tải trọng cơ học tĩnh/động lên các mô-đun PV. Các vết nứt hở có thể đóng lại khi tải được rút ra dẫn đến sự phục hồi điện [77]. Do đó, các mô-đun PV trong lĩnh vực này có thể hoạt động gần như không bị xáo trộn sau những sự kiện cực đoan.
Kêu	Do tác động của mưa đá, đặc biệt là trong các mô-đun PV bán linh hoạt [73].	Các vết nứt hình sao trong các mô-đun cứng và các vết nứt hình sao và hình bán kính trong các mô-đun bán linh hoạt mô-đun [74], [75]. Trong các mô-đun PV bán linh hoạt với độ cứng nền, các vết nứt có xu hướng tập trung gần điểm va chạm và có thể tạo ra một vùng cách điện. Trong nền mềm, một kiểu vết nứt rộng hơn nhiều xảy ra nhưng hầu hết các vết nứt vẫn dẫn điện [75].	Trong trường hợp PV cứng, các vết nứt của ô phụ thuộc vào độ dày của kính, đặc điểm của mưa đá (kích thước và cường độ của đá mưa đá, tốc độ gió, v.v.), loại khung và giá đỡ [71]. Đối với PV bán linh hoạt, kiểu vết nứt phụ thuộc vào kích thước và vận tốc va chạm cũng như độ cứng của nền [75].	Mô-đun PV thủy tinh-kính có thể chịu được tác động của mưa đá mà không bị nứt tế bào [71]. Tác động của mưa đá được kiểm tra trong IEC 61215. Trong quá trình thử nghiệm này, các viên bi nhựa có đường kính tối thiểu là 25 mm và vận tốc tối thiểu là 23 m/giây được đẩy trên mô-đun PV thông qua một bộ phóng khí nén [20].

3. Phân loại vết nứt

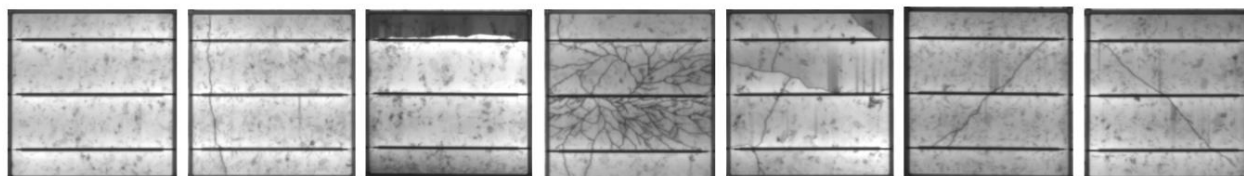
Các vết nứt có thể được phân loại dựa trên kích thước, hình dạng, vị trí, hướng [93] và mức độ nghiêm trọng [8]. Có 218 nhiều hình dạng và kích thước của các vết nứt nhỏ trong một ô Si dựa trên cách chúng được tạo ra. Một vết nứt hình chữ nhật 219 là do trầy xước và nó thường bắt đầu do cơ cấu wafer hoặc cắt laser [94]. Các vết nứt hình ngôi sao 220 bắt đầu do tác động điểm gây ra một số vết nứt chữ nhật có xu hướng cắt nhau 221 [95].

Các vết nứt có thể được phân loại thành vết nứt vĩ mô hoặc vi mô (-crack) dựa trên kích thước chiều rộng của chúng. Một vết nứt 223 có chiều rộng nhỏ hơn 30 μm được gọi là vết nứt vi mô [21]. Các vết nứt cũng có thể được phân loại dựa trên 224 vị trí của chúng. Theo tài liệu, các vết nứt xảy ra trên bề mặt của một tấm bán dẫn silicon được gọi là vết nứt mặt hoặc có thể nhìn thấy hoặc vết nứt cạnh [96]. Các vết nứt nằm bên dưới bề mặt tấm bán dẫn hoặc bắt đầu trên 226 bề mặt và lan truyền theo hướng chiều sâu được gọi là vết nứt dưới bề mặt hoặc không nhìn thấy hoặc vết nứt bên trong. Các vết nứt mặt 227 thường được tạo ra do tải trọng tác động trực tiếp lên các cạnh của tấm bán dẫn [97], ảnh hưởng 228 đáng kể đến độ bền gãy trong quá trình thử xoắn [98]. Một vết nứt mặt có chiều dài gần 2 mm 229 luôn dẫn đến gãy trong thử nghiệm xoắn cơ học, nhưng một vết nứt dưới bề mặt có cùng chiều dài có thể vượt qua 230 thử nghiệm [96]. Sơ đồ phân loại được thể hiện trong Hình 2.



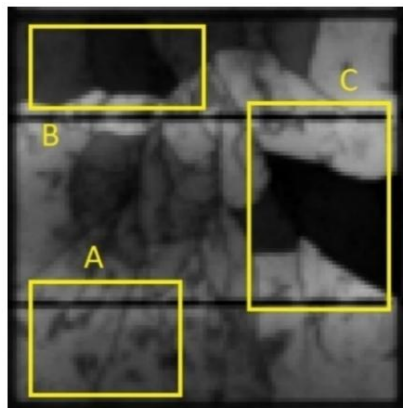
Hình 2. Phân loại vết nứt theo kích thước, hình dạng, hướng, vị trí và mức độ nghiêm trọng.

Về hướng vết nứt, có nhiều loại vết nứt khác nhau có thể hình thành trong các ô Si: vết nứt chéo 234, song song với thanh cái, vuông góc với thanh cái, $+45^\circ$, -45° và vết nứt nhiều hướng. Phân loại 235 vết nứt ô dựa trên hướng của chúng được thể hiện trong Hình 3. Sự suy giảm công suất đáng kể 236 đã được quan sát thấy trong trường hợp vết nứt chéo và nhiều hướng [99].



Hình 3. Phân loại vết nứt dựa trên hướng của chúng trong các tế bào năng lượng mặt trời silicon. Các loại vết nứt tế bào từ 239 trái sang phải: không có vết nứt, vuông góc, song song, dạng cây, nhiều hướng, $+45^\circ$, -45° (hình ảnh thu được 240 từ Viện Công nghệ Áo).

241 Các vết nứt có thể được phân loại dựa trên mức độ nghiêm trọng của chúng thành chế độ A, B và C (xem thêm Hình 4). Các
vết nứt được xác định 242 là chế độ A [8] không tạo ra các vùng ô bị ngắt kết nối và không hiển thị các vùng tối trong hình ảnh EL.
243 Do đó, các vết nứt chế độ A không gây ra tổn thất điện năng đáng kể. Ngược lại, một số vùng của các ô Si 244
bị ảnh hưởng có thể bị gãy và bị cô lập một phần (vết nứt chế độ B) hoặc hoàn toàn (vết nứt chế độ C) khỏi mạch
điện còn lại 245, gây suy giảm điện năng và trong một số trường hợp dẫn đến phân cực ngược của các ô Si 246 tạo
thành các điểm nóng [100]. Các vết nứt loại B cho thấy các vùng tối hơn trong các hình ảnh EL dòng điện cao như ng
các vùng tối 247 biến mất trong các hình ảnh EL dòng điện thấp, cho thấy vẫn còn kết nối điện tại các vị trí vết nứt.
248 Vết nứt loại C xuất hiện khi một số khu vực bị cô lập hoàn toàn về điện với phần mạch điện còn lại và chúng
xuất hiện tối trong hình ảnh EL.



250
251 Hình 4. Hình ảnh phát quang điện minh họa chế độ nứt A, B và C (hình ảnh thu được từ Phòng thí nghiệm Công
nghệ PV 252 của Đại học Síp).

253 4. Ảnh hưởng của tính chất cơ học đến vết nứt tế bào

254 Để cải thiện độ tin cậy của các mô-đun PV, điều quan trọng là phải nghiên cứu các yếu tố dẫn đến 255 sự khởi đầu và lan truyền của các vết
nứt vì chúng có thể gây ra sự sụt giảm đáng kể trong sản lượng điện PV 256 [1,2]. Một trong những yếu tố chính ảnh hưởng đến các vết nứt của ô
là các đặc tính cơ học của vật liệu mô-đun PV 257. Việc đánh giá các đặc tính cơ học là vô cùng quan trọng, vì độ cứng 258 và độ bền của vật liệu
phụ thuộc vào quy trình chế tạo.

259 4.1. Tính chất của silic

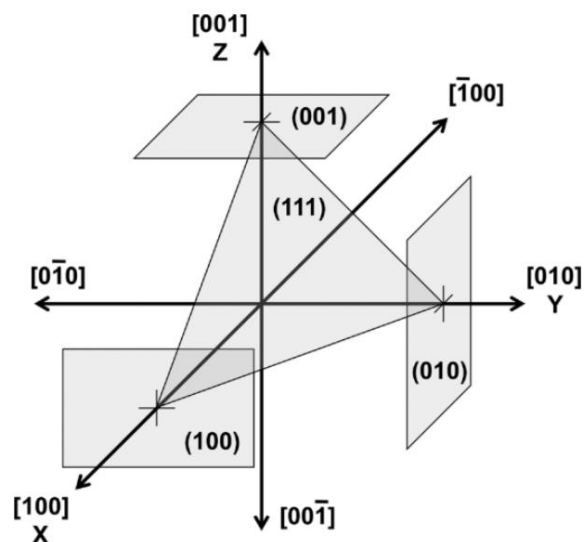
260 Silic giòn ở nhiệt độ phòng và do đó dễ bị các khuyết tật như nứt.

261 Do đó, gần các khuyết tật này, ứng suất có thể cao hơn nhiều so với ứng suất vĩ mô được áp dụng 262 cho một
mẫu và giá trị $\sigma_{max}/\sigma_{applied}$ đạt đến vô cực đối với một vết nứt. Do tính giòn của silicon, ứng suất 263 tại đầu
vết nứt không thể được giải phóng và nếu ứng suất vượt quá ứng suất tới hạn, vết nứt sẽ lan rộng [102].

264 Các điều kiện để vết nứt lan truyền phụ thuộc vào sự tập trung ứng suất trong khu vực đầu vết nứt và vào 265 các yếu tố vĩ mô như hình học
và kích thước của mẫu [103]. Tuy nhiên, sự lan truyền vết nứt 266 hoàn toàn được xác định bởi các hiện tượng ở quy mô nguyên tử [104], [105].

267 Người ta biết rằng các vết nứt xảy ra trên các mặt phẳng tinh thể $\{1\ 1\ 0\}$ [21], [106], [107] và $\{1\ 1\ 1\}$

268 [93], [108]–[110], vì nó đã được nghiên cứu thông qua mô phỏng [93], [109], [111] và thực nghiệm [109], [110], 269 [112], [113]. Một số nhà
nghiên cứu đã sử dụng Phân tích phần tử hữu hạn (FEA), động lực học phân tử và phương pháp cơ học lượng tử 270 để phát triển các mô hình nhằm
xác định hướng và tốc độ của các vết nứt trong tấm wafer mono-c-Si 271 [114]–[117]. Chỉ số Miller là hệ thống ký hiệu cho các mặt phẳng trong
tinh thể được mô tả trong Hình 5.



273

274 Hình 5. Chỉ số Miller trong tinh thể khối lập phương. Các hướng $[1\ 0\ 0]$, $[0\ 1\ 0]$ và $[0\ 0\ 1]$ là các trục XYZ Descartes trừ khi có quy định khác [118].

276 Silic là vật liệu dị hướng và các tính chất của nó phụ thuộc mạnh vào hướng tinh thể [118]. Trong vật liệu dị hướng, định luật Hooke liên quan đến tenxơ bậc bốn để mô tả mối quan hệ đàn hồi giữa tenxơ ứng suất σ và tenxơ biến dạng ε theo độ cứng C.

$$= \quad (1)$$

279

280 Silic đơn tinh thể được đặc trưng bởi ba tham số độc lập do tính đối xứng khối của 281 nguyên tử trong tinh thể [9,13]. Các giá trị chính xác nhất trong tài liệu về tenxơ cấu thành dọc theo mặt phẳng 282 $[1\ 0\ 0]$ đã được Hall [120] báo cáo, như trình bày dưới đây:

100

= [

165,7	63,9	63,9	0
63,9	165,7	63,9	(
63,9	63,9	165,7	0 2
			0
			79.6)
0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0

]

283

284 Trong trường hợp vật liệu đẳng hướng, độ cứng C có thể được biểu diễn bằng một giá trị duy nhất cho Mô đun Young
285 E đặc trưng cho độ cứng của vật liệu đàn hồi và được tính toán từ đờng cong ứng suất-biến dạng đàn hồi

Độ dốc 286. Đối với các vật liệu trục hướng, chẳng hạn như silicon, các tính chất đàn hồi có thể được xác định từ mô đun
Young 287 E , tỷ số Poisson ν và mô đun cắt G [119]. Giá trị cực đại của mô đun Young 288 đối với mono-c-Si là 187,8 GPa và xảy
ra theo hướng tinh thể $[1\ 1\ 1]$, trong khi giá trị cực tiểu của mô đun Young 289 là 130,1 GPa và xảy ra theo hướng $[1\ 0\ 0]$.
Các giá trị riêng và mô đun Young 290 đối với $[1\ 0\ 0]$, $[1\ 1\ 0]$ và $[1\ 1\ 1]$ được tính toán trong [121] được đưa ra trong Bảng
2.

Journal Pre-proof

291 Bảng 2. Giá trị riêng của tenxơ cấu thành và Mô đun Young, E, dựa trên các hướng tinh thể.

Hướng	λ_1 (GPa)	λ_2 (GPa)	λ_3 (GPa)	E (GPa)
[100]	180,3	101,8	79,6	130,1
[110]	226,3	143,6	62,1	169,1
[111]	194,4	146,8	57,1	187,8

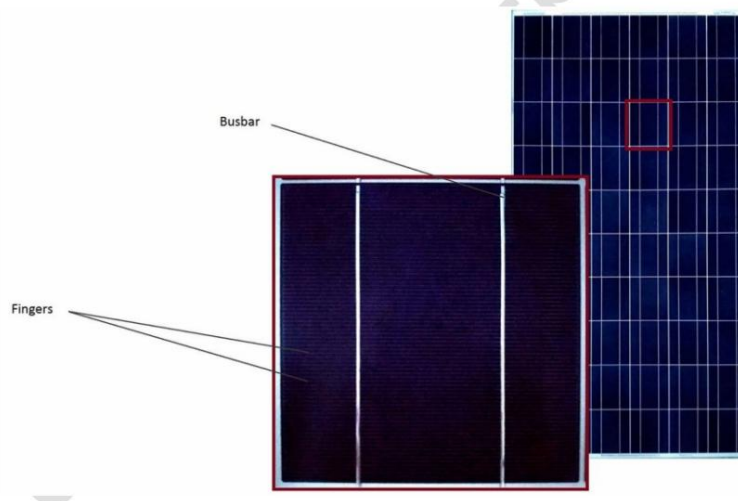
292

293 Sự gãy của multi-c-Si có thể xảy ra do nứt xuyên hạt và/hoặc nứt liên hạt. Hướng hạt 294 ảnh hưởng đến độ cứng của multi-c-Si và Mô đun Young là 130,1- 187,8 GPa. Nếu kích thước mẫu 295 cao hơn nhiều so với kích thước hạt, multi-c-Si có thể được coi là vật liệu đẳng hướng 296 chỉ có hai hằng số đàn hồi, ví dụ E và ν .

297 Nhiệt độ cũng ảnh hưởng đến các tính chất cơ học của Si [8,9]. Ở nhiệt độ phòng, Si có tính đàn hồi 298 và không có biến dạng dẻo [123]. Cả mono-c-Si và multi-c-Si đều giòn ở nhiệt độ môi trường 299 và có sự chuyển đổi giòn-dẻo ở nhiệt độ gần 600°C [124].

300 4.2. Sự giãn nở và co lại của vật liệu

301 Mô-đun PV thông thường nhất bao gồm một tấm kính, một chất đóng gói polyme bao quanh các ô năng lượng mặt trời silicon 302 và một tấm nền polyme. Các ngón tay là các dây dẫn rất mỏng, thu thập các electron được tạo ra 303 từ bề mặt ô đến thanh cái (xem Hình 6).



304

305 Hình 6. Bản phác thảo mô-đun PV và pin Si cho thấy thanh cái và ngón tay trên pin mặt trời silicon 306 (Hình ảnh lấy từ Phòng thí nghiệm Công nghệ PV của Đại học Síp).

307 Trong quá trình sản xuất và vận hành, các vật liệu tạo nên mô-đun PV giãn nở và co lại do 308 sự không phù hợp của CTE của chúng [125]. Bảng 3 so sánh các giá trị CTE của các vật liệu được sử dụng trong mô-đun PV.

309 Sự thay đổi CTE này của các vật liệu liên kết gây ra biến dạng nhiệt cơ học của mô-đun PV 310. Ứng suất nhiệt xảy ra bất cứ khi nào có sự thay đổi nhiệt độ của mô-đun PV, bắt đầu từ 311 các quy trình sản xuất và tiếp tục đến các chu kỳ nhiệt độ hàng ngày và hàng năm. Việc lựa chọn chất đóng gói thích hợp 312 có thể làm giảm các kết nối bị hỏng và các vết nứt ô [125]-[127].

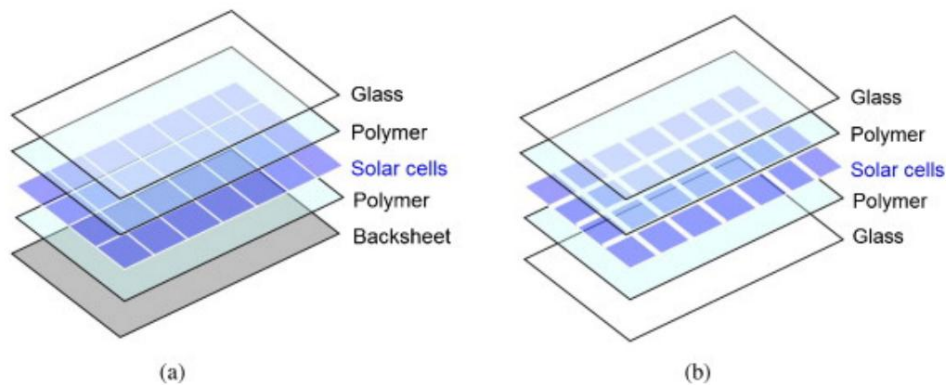
313 Bảng 3. Danh sách các giá trị CTE cho vật liệu được sử dụng trong mô-đun PV.

Vật liệu CTE (10 ⁻⁶ /K)		Tham quyền giải quyết
Thủy tinh	8	[91], [128]–[130]
EVA	270	[91], [128], [129]
Silic	1,72 (T = 220K)	[91], [128], [131]
	2,23 (T = 260K)	
	2,61 (T = 300K)	
	2,92 (T = 340K)	
	3,34 (T = 420K)	
Mặt sau	50,4	[129]
	88	[72], [91]
Nhôm	23,1–23,9	[72][84], [132], [133]
Hàn	21–23,5	[84], [128], [132]
Đồng	16,5–17	[64], [82], [84], [132]–[134]
Bạc	9.8	[135]

314 4.3.Loại bìa sau

315 Một phần quan trọng của cấu trúc quang điện là tấm nền có vai trò giải quyết và giảm thiểu 316 ứng suất môi trường và cung cấp độ tin cậy cho các mô-đun PV [136]. Các kết quả thử nghiệm đã chỉ ra rằng 317 tổn thất công suất của một tấm PV nhiều lớp có tấm nền lên tới 2,2% trong khi các tấm PV nhiều lớp không có tấm nền mất 318 10,3% công suất ban đầu [137]. Hơn nữa, Haase et al. [138] đã báo cáo rằng sự tồn tại của tấm nền 319 làm giảm 30% chiều rộng vết nứt so với các trường hợp không có tấm nền. Trong các mô-đun PV thông thường, polyme 320 được sử dụng làm vật liệu tấm nền, nhưng có một số trường hợp kính được ưu tiên, như được mô tả trong Hình 7.

321 Nếu một mô-đun có tấm nền polyme được tải từ phía trước thì các ô sẽ nằm trong vùng chịu kéo 322 và do đó chúng sẽ chịu ứng suất lớn. Nhưng trong trường hợp sử dụng kính làm tấm nền thì toàn bộ cấu trúc 323 cứng hơn và ít bị lệch hơn đối với một tải trọng nhất định [139], [140]. Do đó, các ô sẽ ở trục trung tính 324 và tác động của tải trọng sẽ ít hơn nhiều. Mặc dù thiết kế mô-đun PV kính trên kính mang lại độ tin cậy cao hơn 325 và độ bền lâu hơn so với thiết kế polyme truyền thống, nhưng cần phải tính đến các cân nhắc về trọng lượng 326 và các vấn đề về an toàn [141].



327

328 Hình 7. Hai ngăn xếp điển hình của mô-đun PV: a) Mô-đun PV có khung với tấm nền polyme và b) mô-đun PV kính trên kính [142].

330 4.4. Loại vật liệu đóng gói

331 Polymer thường được sử dụng để đóng gói các tế bào quang điện silicon và bảo vệ chúng khỏi các tác động của môi trường như tải trọng cơ học hoặc độ ẩm và để giảm ứng suất nhiệt cơ học từ sự khác biệt của CTE giữa kính-silicon và tấm nền silicon. Các vật liệu như Ethylene Vinyl acetate (EVA), Polyvinylbutyral (PVB), Polyethylene (PE) hoặc Thermoplastic silicon elastomer (TPSE) là các loại polymer phổ biến được sử dụng để nhúng tế bào quang điện [143]. EVA là vật liệu đóng gói phổ biến nhất trong ngành công nghiệp PV vì nó cho thấy khả năng chống chịu thời tiết tốt, các đặc tính điện và cơ học [2], [125]. Độ cứng của chất đóng gói phụ thuộc vào nhiệt độ là một yếu tố chính quyết định các biến dạng sẽ được truyền từ kính sang tế bào quang điện silicon [66].

339 Độ bền gãy phụ thuộc mạnh vào mô đun Young và độ dày của chất đóng gói [67], [144]. Dietrich và cộng sự [19] đã báo cáo rằng có sự phụ thuộc lẫn nhau giữa loại và độ dày của chất đóng gói về mặt tải trọng được áp dụng cho các tế bào năng lượng mặt trời. Sự kết hợp giữa các chất đóng gói cứng-mỏng và mềm-dày là những chất làm tăng độ tin cậy. Rowell và cộng sự [145] đã thực hiện các thử nghiệm tải trọng cơ học và TC và báo cáo rằng tải trọng gãy có thể tăng 80% khi độ dày của chất đóng gói gấp đôi. Hơn nữa, có báo cáo rằng độ bền gãy giảm khi mô đun Young tăng. Sander và cộng sự [52] đã mô tả bằng thực nghiệm độ bền gãy trong mặt phẳng của một mô-đun PV được trang bị hai vật liệu đóng gói EVA có các đặc tính độ cứng khác nhau. Kết quả chứng minh rằng EVA cứng hơn gây ra các vết nứt ô trên mô-đun PV ở tải trọng thấp hơn. Ảnh hưởng của độ cứng bao bọc trong điều kiện môi trường lạnh đến xu hướng gãy trong mô-đun PV đã được nghiên cứu trong [144].

349 5. Ảnh hưởng của các đặc tính hình học của mô-đun đến các vết nứt của ô

350 Một yếu tố khác ảnh hưởng đến sự hình thành các vết nứt tế bào là hình dạng của mô-đun tương ứng. 351 Độ dày và vị trí của từng vật liệu trong mô-đun PV rất quan trọng đối với độ tin cậy của cấu trúc.

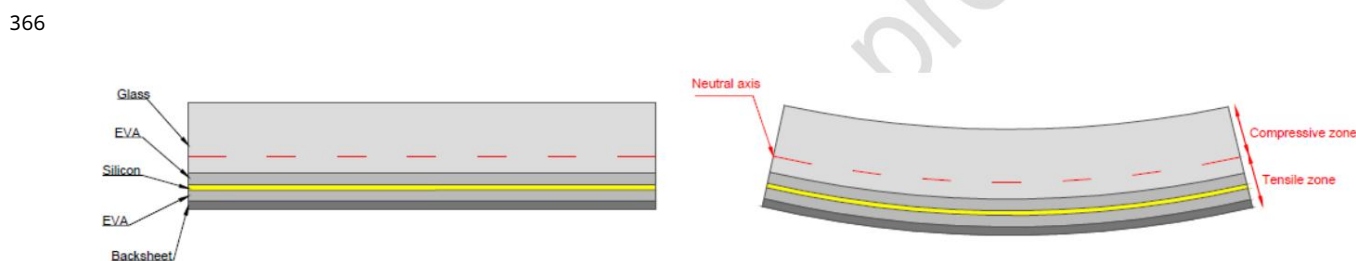
352 5.1. Sự bất đối xứng của mô-đun PV

353 Kính dày hơn nhiều so với lớp xếp chồng của tế bào quang điện, vật liệu bao bọc và tấm nền. Do đó, có sự tích tụ/cài đặt không đối xứng. Độ dày điển hình của vật liệu mô-đun PV dựa trên các giá trị có trong tài liệu được liệt kê trong Bảng 4 [146].

Bảng 4. Độ dày điển hình của vật liệu tạo nên mô-đun PV.

Vật liệu	Độ dày điển hình (m)
Thủy tinh	2000-4000
EVA	350-500
Silic	120-200
Mặt sau	250-400

Mặt phẳng trung tính, nơi ứng suất pháp tuyến trên mặt cắt ngang bằng không, luôn được định vị trong kính 359, tạo nên 70% độ dày của mô-đun, như được thể hiện về mặt định tính trong Hình 8. Nếu các mô-đun PV được tải 360 từ EVA mặt trước, các ô và tấm nền nằm trong vùng chịu kéo. Nếu ứng suất của ô cao hơn 361 độ bền kéo, các ô sẽ nứt [5]. Trong khi chịu ứng suất kéo, các vết nứt của ô có xu hướng mở rộng, 362 ảnh hưởng đến các đặc tính dẫn điện của thiết bị. Điều này có thể dẫn đến việc cô lập các vùng ô. Tuy nhiên, 363 khi ứng suất kéo được loại bỏ, các vết nứt trở lại trạng thái gần như đóng và các đặc tính dẫn điện 364 được khôi phục. Cái gọi là "sự chữa lành" vết nứt này đã được Paggi et al. [101] báo cáo. Mặc dù xu hướng 365 rõ ràng là khi áp suất mặt trước giảm thì nhiều vết nứt hơn sẽ đóng lại, đôi khi hiệu ứng ngược lại ngẫu nhiên.



Hình 8. Cấu trúc lớp của mô-đun PV tiêu chuẩn (bên trái). Nếu mô-đun PV được tải từ mặt trước 369 (phía trên), các tế bào quang điện silicon luôn ở trong vùng chịu kéo và chúng có xu hướng giãn ra (bên phải).

5.2. Độ dày của silicon

Nhu cầu giảm chi phí sản xuất PV và tình trạng thiếu Si đang dẫn đến việc giảm độ dày của wafer 372. Trong những năm gần đây, độ dày của wafer đã giảm từ khoảng 300 xuống 150 μm và các ô 373 dễ bị hư hỏng cơ học hơn [147]. Gần đây hơn, wafer có độ dày 374 100 μm đã được sử dụng [148]. Việc giảm độ dày mà không điều chỉnh tất cả các bước trong quá trình xử lý 375 dẫn đến lực phá vỡ thấp hơn ở cấp độ ô và do đó làm tăng tỷ lệ phá vỡ và làm giảm 376 tính toàn vẹn cơ học của mô-đun PV. Việc giảm độ dày wafer dẫn đến năng suất sản xuất thấp hơn và 377 do đó làm tăng độ nhạy của pin mặt trời đối với tải trọng cơ học [4], [149]. Hơn nữa, các vết nứt nhỏ 378 ít có khả năng lan truyền trong các wafer dày hơn. Theo lý thuyết cơ học gãy tuyến tính, dưới cùng một lực uốn, chiều dài vết nứt quan trọng L_c tỷ lệ thuận với lũy thừa thứ tư của độ dày wafer t

[150].

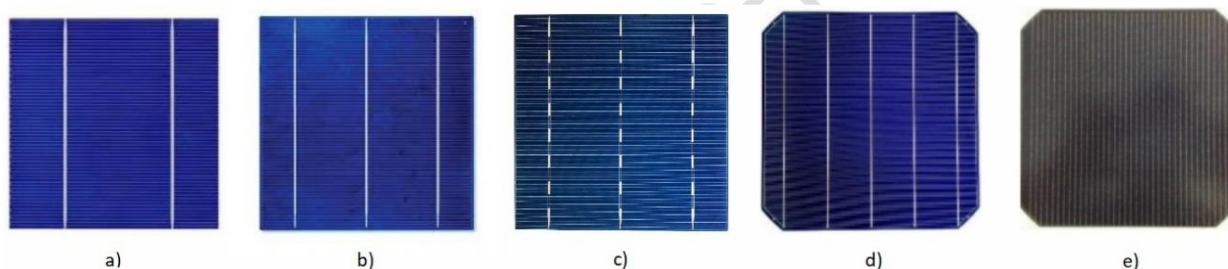
5.3. Loại công nghệ kết nối Trong vài năm

qua, nhiều công nghệ kết nối khác nhau đã được phát triển nhằm đạt được độ tin cậy cao 383, giảm thiểu hiện tượng đổ bóng, giảm điện trở nối tiếp và lưu ý tiêu thụ keo bạc.

384 Một cách tiếp cận là thiết kế thanh cái ô gạch nối có thể được sử dụng thay cho kiểu 385 toàn dòng truyền thống, giúp giảm lưu lượng keo bạc được sử dụng [151]. Có nhiều loại thanh cái gạch nối, chẳng hạn như thanh cái 386 3,5,6 và 8 gạch nối. Mặc dù thiết kế gạch nối có thể đạt được mục tiêu hiệu suất ô cao, nhưng độ tin cậy 387 của mô-đun vẫn đang bị nghi ngờ. Chen et al. [152] đã báo cáo rằng nguy cơ hình thành vết nứt và mất công suất 388 tăng lên khi tăng số gạch nối của kiểu thanh cái.

389 Công nghệ thanh cái đa năng (MBB) xuất hiện như một công nghệ kết nối ô mới lạ khác để 390 tăng công suất mô-đun [153], [154]. Trong công nghệ MBB, 12-15 thanh cái [155]–[157] được sử dụng, thay vì 391 kết nối dựa trên ruy băng với 3-5 thanh cái [158]. Khi số lưu lượng thanh cái tăng lên, 392 yêu cầu về vận chuyển ngang giảm đi, dẫn đến điện trở nối tiếp thấp hơn [159]. Đồng thời, 393 số lưu lượng thanh cái tăng lên dẫn đến giảm diện tích có thể bị cô lập ở các cạnh của 394 ô do vết nứt [5]. Walter et al. [160] đã báo cáo một hành vi cơ học vượt trội trong quá trình lão hóa gia tốc 395 đối với kết nối thanh cái đa năng (MBB) so với công nghệ kết nối 3 thanh cái (3BB) 396 thông thường.

397 Một cách tiếp cận khác là công nghệ liên kết dây được gọi là Công nghệ tiếp xúc SmartWire 398 (SWCT) và được áp dụng cho các ô có lớp kim loại hóa phía trước và chỉ bao gồm các dây đồng (không sử dụng thanh cái 399) [161], [162]. Công nghệ này yêu cầu kết hợp cán mỏng và kết nối thành một bước cán mỏng đơn 400 có nhiệt độ được giữ dưới 160 °C và do đó khả năng gây wafer 401 ít hơn so với các bước xử lý sản xuất truyền thống [163]. Hơn nữa, SWCT làm giảm 402 tác động của việc vỡ ô do số lưu lượng dư thừa dẫn thu thập dòng điện tăng lên [164].



403 a) b) c) d) e)

404 Hình 9. Các công nghệ kết nối khác nhau. a) 2BB b) 3BB c) 3BB có hoa văn dạng gạch ngang d) 5BB e) 405 nhiều dây không có thanh cái.

406 5.4. Khung và thanh đỡ lưu lượng

407 Khung cứng hơn và/hoặc khung có các thành phần gia cố bổ sung như thanh ray sau hoạt động tốt hơn 408 cấu trúc PV thông thường [165], [166]. Mặc dù hỗ trợ bổ sung làm cứng mô-đun và làm giảm hiệu quả 409 độ võng, nhưng nó làm tăng chi phí vật liệu và vận chuyển. Độ cứng cơ học được xác định bởi 410 lưu lượng, mặt cắt ngang và hướng của các thành phần hỗ trợ. Để tăng độ cứng 411 của mô-đun, Nussbaumer et al. [167] đã đề xuất một cấu trúc cứng cho mặt sau của mô-đun hoặc 412 phân chia mô-đun thành các phần nhỏ hơn. Cấu trúc sau được gọi là mô-đun Hợp chất Đơn vị Nhỏ 413 (SUC) cũng có thể được sử dụng để lắp mô-đun. Beinert et al. [146] đã thực hiện 414 thử nghiệm tải cơ học trên các mô-đun PV có và không có khung và báo cáo rằng sự tồn tại của khung làm tăng 415 độ bền gãy và giảm khả năng hình thành vết nứt.

416 Độ cứng của mô-đun c-Si điển hình phụ thuộc vào khung và kính phía trước. Giảm kích thước 417 và trọng lượng của khung hoặc kính dẫn đến tính toàn vẹn cơ học của cấu trúc thấp hơn. Các mô-đun kính/tấm nền tiêu chuẩn 418 với khung chu vi có vùng nhiều lớp trung tâm không được hỗ trợ lớn, 419 có thể dẫn đến hư hỏng mô-đun [167]. Các cấu trúc kính trên kính rất cứng và hầu như không có

Độ lệch 420. Do đó, chúng có thể được lắp mà không cần khung bổ sung nếu độ dày và/hoặc Mô đun Young 421 của kính đủ lớn.

422 6. Mô hình hóa các vết nứt nhỏ trong các mô-đun PV

423 Mô hình hóa và mô phỏng các vết nứt trong các mô-đun PV có thể cung cấp thêm những hiểu biết sâu sắc mà
thường không thể khám phá được thông qua phân tích thực nghiệm và lý thuyết. Nhiều nhà nghiên cứu đã triển khai
Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) để mô phỏng ứng suất và độ võng của các mô-đun PV trong quá trình sản xuất và cả
trong quá trình vận hành. Một số nghiên cứu tập trung vào mô phỏng ứng suất nhiệt cơ học phát sinh trong mô-đun PV
trong quá trình sản xuất hoặc tại hiện trường và một số nghiên cứu khác đã điều tra tác động của vết nứt lên các
đặc tính điện của mô-đun PV.

429 6.1. Mô phỏng ứng suất trong quá trình sản xuất

430 Cần có chiến lược nghiên cứu và phát triển nghiêm ngặt để tối ưu hóa các thông số liên quan 431 trong quá trình sản xuất các mô-đun PV nhằm
cải thiện độ tin cậy của chúng. Việc áp dụng FEA trong thiết kế 432 các mô-đun PV có khả năng xác định các vấn đề với ứng suất dư tiềm ẩn từ quá
trình hàn và 433 cán mỏng và phản ứng của cấu trúc đối với ứng suất nhiệt cơ học tĩnh và động và 434 biến dạng. Các kỹ thuật trên có thể được sử
dụng để tối ưu hóa cài đặt thông số cho các yếu tố kiểm soát trong dây chuyền lắp ráp mô-đun 435, cho phép xác định cài đặt thông số tối ưu để
cải thiện độ bền của các mô-đun PV 436. Sự vỡ wafer trong quá trình chế tạo phụ thuộc vào các khuyết tật về cấu trúc như vết nứt, ứng suất 437
tác dụng lên wafer trong quá trình xử lý và ứng suất dư phát triển trong wafer trong các bước xử lý trước đó 438 và các khuyết tật như vết nứt
[69]. 439 Đã có nhiều nghiên cứu điều tra ứng suất dư từ quá trình hàn, tuy nhiên 440 các nghiên cứu này đã không xem xét đến ứng suất sau khi
cán mỏng. Gabor et al. [82] cho thấy rằng hư hỏng do hàn gây ra là do CTE khác nhau của đồng và silic và nó dẫn đến sự khởi đầu và/hoặc lan
truyền 442 các vết nứt. Kraemer và cộng sự [85] đã phát
triển một mô hình FEA 3D và phân tích các ứng suất nhiệt cơ học sau khi hàn 443 được tạo ra trong các ô. Các ứng suất dư được tạo ra khi chất hàn
đông đặc và nguội 444 xuống nhiệt độ phòng. Kết quả mô phỏng FEA cho thấy ứng suất nén cao trong Si bên dưới các kết nối đồng 445 do CTE cao hơn
của các dải đồng. Những kết quả này chỉ ra rằng các vết nứt đầu tiên 446 có thể xuất hiện ở rìa của lớp hàn. Dietrich và cộng sự [168] đã sử dụng
các mô phỏng FEA và các thử nghiệm uốn trên các mô-đun PV để nghiên cứu tác động của các cấu trúc kim loại hóa khác nhau lên ứng suất của ô. Các
kết quả 448 cho thấy rằng việc không tính đến ứng suất do hàn gây ra dẫn đến đánh giá gây không đầy đủ 449 các ô Si. Nasr Esfahani và cộng sự
[84] đã phát triển một mô hình FE để mô phỏng quá trình hàn của 450 ô Si nhằm nghiên cứu sự phân bố nhiệt độ và ứng suất trong vật liệu ô. Các
phát hiện kết luận rằng các điểm cuối cùng trong dư thừa hàn của lớp Si có thể được coi là một khu vực quan trọng do ứng suất cơ nhiệt cao hơn.
Xiong và cộng sự [64] đã nghiên cứu sự khởi đầu và phân bố định hướng của các vết nứt do hàn cảm ứng điện từ gây ra. Số lượng ô bị nứt đã được
ghi lại và các loại vết nứt khác nhau đã được phân tích. Chen và cộng sự [132] đã mô phỏng ứng suất dư và độ cong của ô 455 do hàn và chỉ ra
rằng các ô mỏng hơn bị nứt do ứng suất cao trong quá trình hàn. Wiese và cộng sự [169] đã nghiên cứu tác động của Mô đun Young, ứng suất chảy và
kích thước của dây đồng đối với các ứng suất chính gây ra trong lớp silicon trong quá trình sản xuất. Các phát hiện chỉ ra rằng việc tăng Mô đun
Young và ứng suất chảy sẽ tạo ra ứng suất cao hơn trong tấm wafer silicon. Lai et al. 459 [133] chỉ ra rằng ứng suất tối đa phát triển trong lớp
Si trong quá trình hàn xảy ra tại 460 nơi dây và silicon gặp nhau. Hơn nữa, họ báo cáo rằng khi độ dày của wafer và tỷ lệ khía cạnh của que hàn
461 giảm, ứng suất dư tăng lên.

462 Nhiều nhà nghiên cứu đã tính toán ứng suất cơ nhiệt sau khi cán mỏng trong các mô-đun PV mà không tính đến ứng suất sau khi hàn còn lại. Lee và Tay [72] đã thực hiện mô phỏng FEA 3D 464 của một tấm PV nhiều lớp để tính ứng suất cơ nhiệt sau khi cán mỏng. Sau đó, họ tính toán sự phân bố lại ứng suất 465 bên trong tấm khi nó được đóng khung, lắp đặt và tiếp xúc với tải trọng đồng đều 5400 Pa.

466 Họ phát hiện ra rằng ứng suất chính cực đại lớn nhất xảy ra ở các cạnh của khung kính, có thể khiến kính bị vỡ. Các ô chịu lực căng, nhưng điều này không quan trọng vì ứng suất thấp hơn nhiều so với ứng suất hông của các ô silicon. Zhang và cộng sự [88] cũng đã triển khai các mô phỏng tự động về quy trình làm mát sau khi cán mỏng 469 để tìm ứng suất dư trong tấm PV nhiều lớp. Mặc dù họ đã sử dụng phương pháp mô hình hóa phụ 470 để đưa các mối nối đồng hàn vào nghiên cứu của mình, nhưng ứng suất hàn thực tế sau 471 trong tấm PV nhiều lớp không thể được biểu diễn vì họ cho rằng ứng suất ban đầu ở nhiệt độ cán mỏng 472 trong tấm là 0. Các phát hiện cho thấy ứng suất ô cực đại 473 nằm gần các mối nối đồng, điều này có nghĩa là các vết nứt và sự tách lớp của dải hàn 474 rất có thể xảy ra gần dải kết nối, điều này đã được xác minh bằng thực nghiệm [89], [90].

475 Sun et al. [170] đã sử dụng mô hình phân tích để tính ứng suất do quá trình cán mỏng và tải nhiệt nhưng 476 mô hình này không tính đến ứng suất/vòm tế bào do hàn. 477

Ứng suất dư trong tấm PV là kết quả của sự tích tụ ứng suất dư từ mỗi

478 quy trình sản xuất. Dietrich et al. [171] đã tính toán ứng suất làm nguội sau khi cán mỏng và cán mỏng, sau đó họ sử dụng chồng chất tuyến tính với ứng suất sau khi hàn để tính ứng suất tích lũy trong ô 480 trong tấm nhiều lớp. Việc sử dụng chồng chất tuyến tính còn đang gây tranh cãi, do biến dạng dẻo của chất hàn và đồng 481. Ứng suất sau khi hàn, cán mỏng và làm nguội sau khi cán mỏng đã được mô phỏng bằng số 482 và được xác nhận bằng thực nghiệm trong [128]. Song et al. [91] đã mô phỏng sự phát triển của ứng suất trong các ô Si của tấm nhiều lớp PV 483 sau các bước sản xuất khác nhau của quá trình hàn các dải liên kết vào các ô wafer 484, cán mỏng và làm nguội sau khi cán mỏng. Người ta quan sát thấy rằng ứng suất cao nhất trong chu trình sản xuất tấm nhiều lớp PV 485 đã sửa đổi là ứng suất trong quá trình cán mỏng và phần lớn các vết nứt nằm ở vị trí 486 dọc theo ô gần mép của các liên kết đồng. Hơn nữa, họ báo cáo rằng ứng suất dư tích lũy cuối cùng 487 bao gồm ứng suất sau khi hàn, cán mỏng và ứng suất nhiệt sau khi cán mỏng 488 được phát hiện cao hơn khoảng 20% so với ứng suất dư báo cáo ở nơi khác [88], [172]. Li et al. [83]

489 đã thực hiện FEA để nghiên cứu hành vi nhiệt cơ học của SWCT và mô-đun PV thành cái trong quá trình sản xuất, vận chuyển và tải nhiệt cơ học tiếp theo theo từng bước liên tiếp.

491 Kết quả cho thấy ứng suất cao hơn được tạo ra trong trụ hợp thành cái PV so với kết nối SWCT 492 và khu vực quan trọng để gây gần các cạnh thành cái. Bảng 5 hiển thị danh sách 493 nghiên cứu số đánh giá ứng suất nhiệt cơ học còn lại do hàn, cán mỏng và 494 tải trọng vận hành với các kết quả và nhận xét chính. Một bản tóm tắt mở rộng về một số mô hình số 495 được báo cáo trong tài liệu được đưa ra trong Bảng 4. Từ Bảng này, rõ ràng là các mô hình khác nhau đã được áp dụng 496 ở các giai đoạn khác nhau của dây chuyền sản xuất. Cũng đáng chú ý là phần lớn các mô hình này không được xác nhận 497 bằng thực nghiệm.

498 Bảng 5. Tóm tắt các mô hình số đánh giá ứng suất nhiệt dư do hàn, 499 cán mỏng và các ứng suất khác do tải trọng vận hành.

Ứng suất dư trong							
Thẩm quyền giải quyết	Bản	Bư u kiện hàn	Cán màng	Sau khi cán màng- làm mát	Căng thẳng từ trọng tải	Xác thực	Nhận xét
Lai và cộng sự [133]	-		-	-	-	-	Crack đã đư ợc giới thiệu trong mô hình. Ứng suất dư của tế bào tăng lên khi tế bào độ dày giảm đi.
van Amstel và cộng sự [173]		-	-	-	-		Không quan sát thấy vết nứt nào.
Gabor và cộng sự [82]			-	-			Các ứng suất dư có thể gây ra các vết nứt hoặc gây tế bào do sự lan truyền của các tế bào hiện có vết nứt.
Chen và cộng sự [132]	-		-	-	-	-	Không quan sát thấy vết nứt. Ứng suất dư tăng có thể gây hư hỏng ở vùng wafer gần điện cực.
Dietrich và cộng sự [171]	-		-	-			Việc bỏ qua các ứng suất nội tại do hàn gây ra dẫn đến việc giải thích không đầy đủ về đặc điểm gãy và gãy
El Esfahani và cộng sự [84]	-		-	-	-	-	tốc độ đóng gói của các tế bào năng lượng mặt trời. Các điểm giữa mối hàn và Si có thể đư ợc coi là khu vực quan trọng đo chúng nhiệt độ cao hơn và nhiệt cơ học căng thẳng
Wiese và cộng sự [169]	-		-	-	-	-	Không quan sát thấy vết nứt nào.
Song và cộng sự [91]	-				-		Phần lớn các vết nứt nằm dọc theo ô tiếp giáp với mép của đồng kết nối với nhau.
Kraemer và cộng sự [85]	-		-	-	-	-	Các vết nứt đầu tiên có thể xuất hiện ngay tại rìa của lớp hàn.
Zhang và cộng sự [88]	-	-	-		-	-	Các vết nứt tế bào và sự tách lớp của ruy băng hàn có thể xảy ra gần dải kết nối.
Lee & Tay và cộng sự [72]	-	-	-			-	Trong quá trình thử nghiệm, các tế bào trải qua ứng suất kéo không quan trọng như ứng suất phá hủy của silicon không đư ợc tiếp cận.
Tippabhotla và cộng sự [128]	-				-		Không quan sát thấy vết nứt nào.
Li và cộng sự [83]	-					-	Các khu vực gần mép thanh cái là những điểm dễ bị nứt.

500

501

6.2. Mô phỏng ứng suất trong quá trình vận hành 502 Weiss et

al. [70] đã nghiên cứu độ lệch động của các mô-đun PV trong điều kiện thử nghiệm trong nhà và ngoài trời 503 và so sánh kết quả với kết quả mô phỏng FEA. Thiết lập đo lường ngoài trời bao gồm 504 máy đo gió siêu âm để đo vận tốc gió và cảm biến khoảng cách laser để đo độ lệch 505 tại điểm giữa mặt sau của mô-đun PV. Mặc dù không thể xác định được mối tương quan trực tiếp giữa vận tốc gió 506 và độ lệch mô-đun tại hiện trường, nhưng có thể đo được mối tương quan giữa áp suất và độ lệch mô-đun 507 trong phòng thí nghiệm. Mối tương quan giữa áp suất p tác động lên mô-đun 508 và độ lệch y giữa -10 và +10 mm có thể được mô tả như sau:

$$= -62,689 - 0,21895 \quad 2 - 0,1127 \quad 3 \quad (3)$$

509 Dong et al. [174] đã trình bày một mô phỏng số dựa trên hành vi cơ học của một mô-đun PV kính đôi siêu mỏng 510 trong điều kiện tải tĩnh và động. Các phân tích động trạng thái ổn định dựa trên chế độ tĩnh, chế độ và chế độ đã được tiến hành dựa trên FEA cho ba cấu hình lắp đặt 512 được sử dụng phổ biến nhất (bốn cạnh cố định, sáu kẹp cố định, bốn góc cố định). Kết quả cho thấy rằng các cấu hình lắp đặt 513 tác động đến cả hiệu suất tĩnh (độ bền và biến dạng) và hiệu suất động (các đặc điểm và phản ứng động 514). Hơn nữa, biến dạng và ứng suất quan sát được đủ lớn để 515 gây ra các vết nứt hoặc gãy trong lớp tế bào quang điện, hoặc thậm chí làm hỏng toàn bộ mô-đun PV. et al. 516 [175] đã thực hiện một phân tích FEA đã được xác nhận bằng thực nghiệm để đánh giá các tần số cộng hưởng có thể có của các mô-đun PV và phản ứng của chúng trong các điều kiện thời tiết khác nhau. Năm tần số cộng hưởng 518 và các điểm dịch chuyển tương ứng của chúng đã được xác định trong khi các mô-đun PV được cố định 519 theo chu vi. Trong quá trình thử nghiệm, một mô-đun PV đã chịu tải cơ học tuần hoàn và Phân tích mô thức hoạt động (OMA) 520 đã được sử dụng để xác định các đặc tính mô thức của mô-đun. Những thay đổi trên 521 về tần số dao động và biên độ trung (0-40 Hz) cho phép mô phỏng các tải cơ học động 522 tương ứng với mọi điều kiện thời tiết khắc nghiệt có thể xảy ra như gió hoặc tuyết. Kết quả thử nghiệm 523 cho thấy một số vết nứt đã hình thành dẫn đến giảm công suất 1,37%.

524 6.3. Sự lan truyền của vết nứt và phản ứng điện

525 Một mô hình tính toán để mô phỏng nứt liên hạt và xuyên hạt trong các ô đa c-Si 526 đã được Infuso và cộng sự phát triển [142]. Một bộ xử lý trước và một phương pháp phân tích hình ảnh đã được sử dụng để tạo lưới 527 FE với các phần tử giao diện nhúng và một phương pháp Mô hình vùng kết dính (CZM) đã được sửa đổi 528 đã được triển khai để tránh sự phụ thuộc vào lưới. Một phương pháp khác do Paggi và Reinoso [176] trình bày là 529 có thể kết hợp cả hai chế độ gãy và mô phỏng các mẫu nứt phức tạp trong các vi cấu trúc đa c-Si dị hướng có và không có khuyết tật ban đầu [121]. Phương pháp xử lý pha đã được sử dụng cho nứt xuyên hạt 531 và CZM cho hỏng liên hạt. Các giá trị khác nhau của độ dẻo dai gãy của ranh giới hạt 532 đến độ dẻo dai gãy của hạt đã được sử dụng trong các mô hình đẳng hướng và dị hướng để 533 xác định mẫu nứt trong từng trường hợp.

534 Trong một nghiên cứu khác và theo giả định về xử lý hợp xấu nhất, các vết nứt được coi là 535 khuyết tật làm gián đoạn các ngón tay và dẫn đến các khu vực bị ngắt kết nối của một tế bào quang điện Si [8]. Trong mô hình đó, 536 vị trí và hướng của các vết nứt liên quan đến thanh cái được tìm thấy là các thông số chính, vì chúng 537 ảnh hưởng đến hiệu suất điện theo những cách khác nhau liên quan đến khu vực cách điện của tế bào Si. Dựa trên 538 sự đơn giản hóa ở trên trong đó tất cả các vết nứt đều cách điện và do đó chúng hoạt động như chế độ C 539 mô hình tính toán đa vật lý và tỷ lệ cho một tấm PV nhiều lớp, dựa trên cơ học gãy phi tuyến tính 540 mô hình vùng kết dính để mô phỏng vết nứt, một đa trong đa c-Si đã được phát triển trong [177]. Mô hình 541 kết hợp các xử lý điện và đàn hồi và coi ranh giới hạt là nguồn gây ra vết nứt vi mô.

542 Paggi và cộng sự [178] đã đề xuất một cải tiến của mô hình trước đó, bao gồm một mô hình điện chính xác hơn cho mỗi ngón tay với điện trở cục bộ phụ thuộc vào độ mở của vết nứt và ước tính tác động của các vết nứt nhỏ và sự suy giảm công suất trong các mô-đun PV dựa trên phương pháp tiếp cận đa vật lý cục bộ-toàn cục. Một CZM nhiệt đàn hồi để mô phỏng các vấn đề nhiệt cơ học trong các ô Si trong quá trình làm mát sau khi cán mỏng, xem xét dẫn nhiệt một phần qua bề mặt vết nứt, tùy thuộc vào độ mở của chúng đã được Sapora và Paggi [179] đề xuất. Berardone và cộng sự [180] đã tổng quát hóa mô hình một chiều của Breitenstein và Rissland [181], để mô phỏng sự phân bố dòng điện trong các ô Si, tính đến điện trở nối tiếp phân tán đối với sự hiện diện của các vết nứt dẫn điện một phần. Trong các ô đơn-c-Si, tác động

550 của việc mở vết nứt trên phản ứng điện là rõ ràng, do sự gia tăng điện trở quan trọng bằng cách uốn cong mô-đun 551. Tuy nhiên, trong trường hợp của multi-c-Si, sự hiện diện của các khuyết tật, ranh giới hạt và các khuyết tật 552 làm cho mô hình phức tạp hơn và kết quả không rõ ràng.

553 7. Nghiên cứu thực nghiệm về các vết nứt nhỏ của mô-đun PV

554 Một số lưu ý hạn chế các nghiên cứu có sẵn liên quan đến các kỹ thuật đo lường và tiếp xúc ngoài trời của các vết nứt nhỏ 555. Như đã đề cập trước đó, nứt cell là cơ chế hỏng hóc chủ yếu trong hai năm đầu tiên 556 hoạt động với tốc độ suy thoái lên tới 3% mỗi năm [22]. Các nghiên cứu trước đây cho thấy rằng sự suy thoái điện 557 do các vết nứt cell phụ thuộc vào đặc điểm khí hậu của vị trí lắp đặt các mô-đun PV 558 [22]. Tổn thất điện năng do các vết nứt cell ở vùng khí hậu lạnh và tuyết cao hơn khoảng 3% 559 mỗi năm so với vùng khí hậu ôn hòa và cao hơn 6% mỗi năm so với vùng khí hậu nóng và khô.

560 Sander et al. [52] đã báo cáo rằng sau 4 tháng tiếp xúc ngoài trời, không thể đo được sự thay đổi đáng kể nào về cường độ đặc trưng. Những phát hiện trên phù hợp với một nghiên cứu khác trong đó 20 mô-đun PV được đánh giá công suất 561 562 trong phòng thí nghiệm sau khi tiếp xúc ngoài trời và không có mô-đun nào trong số chúng cho thấy mất công suất đáng kể và không có vết nứt bổ sung nào 563 xuất hiện hoặc vết nứt hiện có nào mở rộng trong thời gian tiếp xúc ngoài trời 6 tháng [175]. Hơn nữa, 564 Buerhop et al. [182] đã tiếp xúc ngoài trời 54 các mô-đun đã nứt trước (một số trong số chúng đã được ứng suất nhân tạo) 565 trong thời gian 1 năm. Mặc dù không quan sát thấy sự thay đổi nào về đặc tính điện và trong hình ảnh EL 566 sau khi tiếp xúc ngoài trời, các thử nghiệm tải tĩnh tăng tốc chỉ ra rằng trên một giới hạn nhất định, các vết nứt 567 sẽ phát triển. Wohlgemuth và Cunningham [183] đã báo cáo rằng sự vỡ tế bào trong quá trình vận hành là do các tế bào bị hỏng trước 568 trong quá trình hàn. [184] đã báo cáo sự tồn tại của các vết nứt nhỏ và 569 lỗi khác có thể phát hiện được của các trường mono-c-Si và multi-c-Si trong môi trường Sahara (URERMS). Ngược lại, 570 Chandel et al. [185] và Sharma và Chandel [186] đã thực hiện một nghiên cứu thực địa về các mô-đun PV mono-c-Si và multi-c-Si 571 đã được tiếp xúc trong điều kiện vận hành thực tế trong 28 năm tại Ấn Độ và không phát hiện 572 bất kỳ vết nứt nhỏ nào. Dolara et al. [187] đã thực hiện phân tích thử nghiệm trên các mô-đun PV multi-c-Si để đánh giá 573 ảnh hưởng của các vết ố sên đến hiệu suất của các mô-đun PV trong điều kiện thực tế. Các phát hiện chỉ ra 574 rằng việc giảm hiệu suất có nhiều khả năng là do các vết nứt ô hơn là các vết ố sên. Nhiều 575 nhà nghiên cứu đã sử dụng các thiết lập thử nghiệm trong nhà và nghiên cứu độ bền gãy và do đó sự hình thành 576 vết nứt, các đặc điểm vết nứt và tác động của chúng đến các đặc tính điện của mô-đun PV.

577 7.1. Nghiên cứu về sức mạnh

578 Các vết nứt gây ra tổn thất về vật liệu, năng lượng và do đó là tổn thất kinh tế trong quá trình sản xuất 579. Do đó, bên cạnh các đặc tính điện, điều quan trọng không kém là phải nghiên cứu các đặc tính cơ học 580 và nhiệt vật lý và đặc biệt là độ bền của vật liệu. Các mô-đun PV trên thị trường hiện nay cung cấp 581 chế độ bảo hành 25 năm và độ tin cậy cũng như độ bền của chúng trong khoảng thời gian này được coi là đã được chứng minh. Tuy nhiên, trong 582 thực tế, hiện không có thông số nào có sẵn mô tả độ bền cơ học của các ô và 583 tấm wafer, đảm bảo độ tin cậy của một mô-đun cụ thể. Mặc dù nhiều thiết kế mô-đun khác nhau đã được 584 phát triển để giải quyết các thách thức đã đề cập ở trên, nhưng không có thiết kế nào giải quyết được tất cả 585 thách thức.

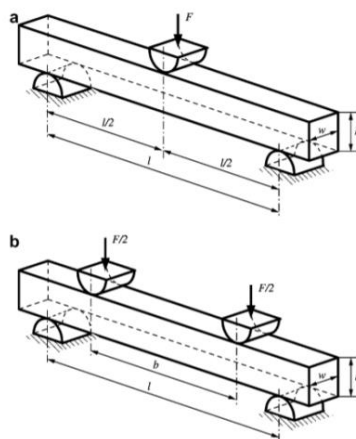
586 7.1.1. Bối cảnh lý thuyết Độ bền

587 gây bị giới hạn bởi các khuyết tật về cấu trúc, có thể hoạt động như các bộ tập trung ứng suất [188], [189]. 588 Đối với các tấm wafer silicon, các vết nứt nhỏ là tác nhân gây ứng suất phổ biến nhất và độ bền gãy silicon 589 phụ thuộc vào số lượng và kích thước của các vết nứt nhỏ [3]. Sự gãy bắt đầu tại các vết nứt này nếu ứng suất 590 trở nên đủ cao [43]. Độ bền gãy biểu thị khả năng của một vật liệu nhất định chống lại sự lan truyền vết nứt 591 và được định nghĩa là giới hạn năng lượng trước khi hai nguyên tử đơn lẻ tách ra. Do

592 tính dị hướng của mono-c-Si, giá trị độ bền gãy của các tấm Si theo các hướng vật liệu khác nhau 593 thay đổi. Giá trị thực tế của độ bền vật liệu thấp hơn giá trị lý thuyết do nhiều 594 khuyết tật khác nhau [111], [190]. 595 Có nhiều phương pháp thử nghiệm khác nhau để mô tả độ bền của các vật liệu giòn như tấm

silicon. Trong 596 ngành công nghiệp PV, thử nghiệm xoắn và các phương pháp thử nghiệm khác như thử nghiệm uốn đơn trục và uốn hai trục thường được sử dụng 597 và được thảo luận [189], [191]–[193]. Các thử nghiệm uốn đơn trục như uốn ba điểm (3PB) và uốn bốn điểm 598 (4PB) là các thiết lập phổ biến nhất để xác định độ bền gãy của vật liệu (Hình 10).

599 Các thử nghiệm này áp đặt ứng suất kéo cao tại tâm của các cạnh dư ở nơi vết nứt bắt đầu và 600 lan truyền. Sự phân bố ứng suất dọc theo mẫu có thể được tính toán phân tích cho dầm hoặc tấm liên khối 601. Thử nghiệm uốn hai trục như thử nghiệm vòng trên vòng và thử nghiệm bi trên vòng dẫn đến trạng ứng suất hai trục tại tâm mẫu 602 tại vùng chịu kéo, do đó, các khuyết tật ở cạnh bị loại trừ [194]. Do độ lệch lớn 603 nên không có giải pháp phân tích nào để tính ứng suất từ lực đo được và do đó cần triển khai các phép tính FEA 604 để có được ứng suất gãy chính xác.



605

606 Hình 10. Sơ đồ bản vẽ của (a) thử nghiệm uốn 3 điểm và (b) thử nghiệm uốn 4 điểm [190]. Mẫu thử nghiệm 607 được hỗ trợ bởi hai con lăn ở phía dư ở và được tải bởi một con lăn (uốn 3 điểm) hoặc bởi hai con lăn 608 (uốn 4 điểm) ở phía trên.

609 Do bản chất giòn của silicon, dữ liệu về độ bền bị phân tán và rất khó để tìm ra một giá trị duy nhất của độ bền gãy 610. Do đó, một phương pháp thống kê sử dụng phân tích Weibull thường được áp dụng trong nhiều nghiên cứu 611 để xác định độ bền gãy của các tấm wafer [195]–[197]. Độ bền đặc trưng σ_0 và mô đun Weibull 612 m là hai tham số được xác định bằng đánh giá Weibull. Xác suất 613 hỏng P_f biểu thị xác suất mẫu vật gãy ở ứng suất cụ thể σ .

$$P_f = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (4)$$

614 trong đó σ_0 là cường độ đặc trưng mô tả ứng suất cho xác suất hỏng hóc bằng 63,2% 615 và m là mô đun Weibull mô tả sự phân tán của ứng suất gãy (các giá trị nhỏ của m 616 cho thấy sự phân tán lớn về cường độ).

617 7.1.2. Nghiên cứu thực nghiệm ở cấp độ wafer

618 Một vết nứt nhỏ còn sót lại trong tấm wafer sau khi cơ a là nguồn chính gây ra sự phá vỡ trong các chất nền silicon PV 619 [43]. Một vết nứt nhỏ hoạt động giống như một bộ tập trung ứng suất, có thể gây ra sự lan truyền không ổn định, ngay cả ở 620 tải nhỏ, đặc biệt là trong quá trình xử lý và chế biến các tấm wafer Si mỏng. Độ bền gãy của các tấm wafer Si đa c-621 phụ thuộc vào cả các đặc tính vật liệu như kích thước hạt và hướng cũng như các khuyết tật như 622 vết nứt nhỏ [198]. Các vết nứt nhỏ ở cạnh là nguyên nhân quan trọng nhất gây ra sự suy giảm độ bền cơ học. 623 Giảm sự khởi đầu của các vết nứt nhỏ trong các ô Si sẽ làm tăng cường độ gãy [199]. Funke et al. [44] 624 đã triển khai các thử nghiệm hai trục để nghiên cứu hành vi của các loại wafer khác nhau và phân tích phần tử hữu hạn để 625 tính toán ứng suất gãy. Người ta đã chỉ ra rằng sự phân bố của cường độ gãy phụ thuộc vào 626 cách chuẩn bị bề mặt của wafer. Độ sâu vết nứt điển hình trong wafer đối với quy trình cơ a bìn nhiều đây là 10-20 627 [33]. Sau khi loại bỏ 10 m của mỗi bề mặt bằng cách khắc, ứng suất gãy tăng lên và sau khi khắc 628 20 m bề mặt mẫu vật, ứng suất gãy tăng lên nhiều hơn nữa. Coletti et al. [200] đã sử dụng máy kiểm tra uốn vòng-trên-629 để xác định ảnh hưởng của hư hỏng do cơ a cũng như xử lý khắc đối với 630 độ bền cơ học độc lập với hư hỏng cạnh. Người ta kết luận rằng hư hỏng do cơ a 631 ảnh hưởng đáng kể đến tính toàn vẹn cơ học của các tấm wafer cắt sẵn và ứng suất gãy quan trọng có thể giảm 60% 632 so với các tấm wafer được khắc. Một nghiên cứu thực nghiệm khác với thử nghiệm uốn 4 điểm cho thấy đánh bóng 633 hoặc khắc wafer silicon có thể làm tăng độ bền lên 33% so với các tấm wafer cắt sẵn [201]. Schneider 634 et al. [202] đã thực hiện các thử nghiệm xoắn trên các ô silicon đa tinh thể để nghiên cứu ảnh hưởng của độ dày wafer 635 đến lực gãy. Kết quả cho thấy độ ổn định giảm mạnh đối với vật liệu wafer mỏng hơn.

636 Khắc kiểm và ứng dụng kết cấu đẳng hướng làm tăng độ ổn định trong phạm vi 10-50% cho 637 độ dày khác nhau. Popovich [199] đã nghiên cứu tác động của các thông số xử lý và báo cáo rằng 638 cường độ của tấm silicon đa tinh thể tăng khoảng 50% sau khi cơ a hư hỏng 639 khắc. Coletti và cộng sự [123] đã báo cáo mối quan hệ tuyến tính giữa tải trọng gãy và độ dày tấm.

640 Những phát hiện này cho thấy các vết nứt nhỏ sẽ quan trọng hơn khi độ dày của tấm wafer giảm. Klute et al. 641 [203] đã nghiên cứu quá trình bắt đầu gãy đối với các tấm wafer mono-c-Si cắt sẵn bằng phương pháp phân tích gãy. Vết nứt ban đầu được 642 định vị theo hướng {100} và hướng thay đổi khi bắt đầu gãy theo hướng lan truyền vết nứt {110} 643. Kết quả cho thấy tất cả các tấm wafer silicon có ứng suất gãy cao và thấp đều tuân theo 644 cùng một cơ chế gãy, chỉ ra cùng một nguyên nhân gốc rễ gây ra hỏng hóc. Popovich et al. [204], [205] 645 đã nhấn mạnh tác động của độ kết tinh đến độ bền của tấm wafer với các thử nghiệm 4PB. Độ bền cao hơn được tìm thấy ở 646 mẫu vật có hạt lớn ở giữa so với các mẫu vật có nhiều hạt nhỏ. Để loại trừ 647 tác động của các khuyết tật cạnh xuất hiện trong các thử nghiệm uốn 4 điểm, thử nghiệm hai trục (vòng trên vòng) đã được 648 Popovich et al. [206]. Người ta thấy rằng độ kết tinh silicon và vị trí mà wafer được chiết xuất 649 từ thời Si đúc có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ bền. Nói cách khác, các wafer lấy từ đỉnh của thời 650 yếu hơn 30% so với các wafer lấy từ đỉnh. Gustafsson et al. [96] đã thực hiện các thử nghiệm xoắn 651 để nghiên cứu mối quan hệ giữa độ bền cơ học và vết nứt. Họ quan sát thấy rằng lực phá vỡ phụ thuộc 652 vào hình dạng và vị trí vết nứt. Các vết nứt nhỏ nằm ở rìa của wafer Si gây ra 653 sự phá vỡ ở các lực thấp hơn so với các vết nứt nhỏ nằm ở bên trong.

654 7.1.3. Nghiên cứu thực nghiệm về pin mặt trời silic

655 Độ dẻo dai gãy trong một ô mono-c-Si có vết lõm độ cứng vì mô Vickers đã được 656 nghiên cứu trong [108]. Độ bền cơ học của các ô mặt trời mono-c-Si với các cấu hình tải khác nhau so với thanh cái đã được Kaule và cộng sự nghiên cứu [207]. Các tác giả đã thực hiện các thử nghiệm uốn 4 điểm 658 đối với 200 ô mặt trời mono-c-Si và phân tích cho thấy độ bền của ô phụ thuộc vào 659 hướng tải. Popovich và cộng sự [208] đã thực hiện các thử nghiệm 4PB trên các ô mặt trời Si và báo cáo rằng cao hơn

660 sấy khô và nhiệt độ nung thấp hơn làm giảm độ bền của tế bào trong ứng suất kéo. Kohn et al. [80], [209] 661 đã thực hiện các thử nghiệm vòng trên vòng và cho thấy rằng quá trình nung đối với nhiều vật liệu dạng sệt (AgAl và Al) 662 có thể làm giảm độ bền của tế bào. Ngươi ta cũng lưu ý rằng trong các thử nghiệm gãy, các vết nứt ở vùng chồng AgAl/Al 663 hoạt động như tác nhân tăng ứng suất và có thể dẫn đến gãy ở ứng suất thấp hơn.

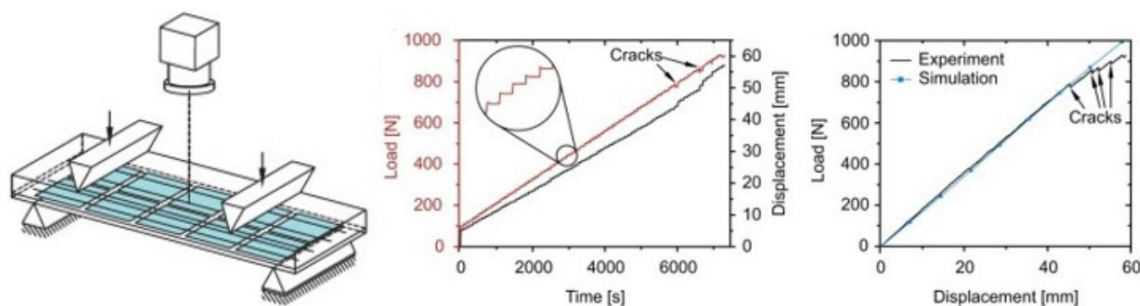
664 7.2. Nghiên cứu đặc điểm vết nứt

665 Sự hình thành vết nứt do ứng dụng SML đồng nhất đã được phân tích bởi Kajari-Schröder và cộng sự.

666 [99]. Trong nghiên cứu này, tính quan trọng của hư hỏng nứt đã được nghiên cứu bằng cách kiểm tra vùng ô tối đa 667 có thể bị tách biệt bởi một vết nứt duy nhất theo một hướng nhất định. Ngươi ta quan sát thấy rằng các hư hỏng nứt khác nhau 668 có thể có tác động khác nhau đến sản lượng điện PV.

669 Mẫu vết nứt trong các tế bào quang điện Si được đóng gói dựa trên các thử nghiệm 4PB đã được Sander và cộng sự nghiên cứu.

670 [210]. Kết quả cho thấy tải song song với thanh cái quan trọng hơn tải vuông góc, đặc biệt là 671 đối với các ô đa c-Si. Đường cong tải-biến dạng thu được từ thử nghiệm này được thể hiện trong Hình 11, trong đó 672 gãy giòn ngay khi vết nứt lan truyền được thể hiện. Ảnh hưởng của cấu hình lắp đặt đối với 673 hiệu suất tính và động của các mô-đun PV cũng đã được nghiên cứu bằng mô phỏng số 674 của Dong et al. [174].



675

676 Hình 11. Thiết lập thử nghiệm 4PB để phân tích thực nghiệm tác động của tải trọng cơ học lên các mô-đun mini 677 (trái); Đường cong tải trọng và chuyển dịch theo thời gian của mẫu thử nghiệm (ở giữa); Đường cong tải trọng trên chuyển dịch được đo và mô phỏng (phải) [210].

679 Gabor et al. [140] đã thực hiện một nghiên cứu thực nghiệm trên một mô-đun đa c-Si. Mô-đun được thử nghiệm với 680 Loadspot dưới tải tăng và giảm đều đặn trong khi chụp ảnh EL ở mọi giai đoạn. Họ đã 681 báo cáo rằng không có vết nứt nào được quan sát thấy khi bắt đầu các thử nghiệm, nhưng các vết nứt mới đã được tạo ra ở 1200 682 Pa. Khi loại bỏ áp suất, các vết nứt đã đóng hoàn toàn và trở nên vô hình.

683 Mặc dù các mô-đun PV hoạt động trong môi trường động, các chứng nhận chung của PV chỉ bao gồm 684 các thử nghiệm tĩnh [20], [211]. Một số nhà nghiên cứu đã thực hiện các thí nghiệm và mô phỏng để nghiên cứu 685 tác động của tải trọng động lên các mô-đun PV. Mülhölfer và cộng sự [212] đã thực hiện các thử nghiệm ML 686 tuần hoàn và tĩnh ở 25, -20, -40 °C. Kết quả cho thấy mối tương quan giữa sự xuất hiện của các vết nứt ô và nhiệt độ 687 mà ML được áp dụng. Schneller và cộng sự [166] đã nghiên cứu các vết nứt phản ứng với số lượng 688 chu kỳ đóng và mở cao. Ngươi ta quan sát thấy rằng các mô-đun có hỗ trợ bổ sung dưới dạng 689 thanh ray phía sau, hoạt động tốt hơn so với các mô-đun không có hỗ trợ như vậy. Ngươi ta cũng quan sát thấy rằng hư hỏng 690 nghiêm trọng hơn ở các mô-đun đơn tinh thể ở mức tải tương tự. Borri và cộng sự [213] đã thực hiện các thử nghiệm biến dạng trục tuần hoàn 691 và uốn tuần hoàn trên các mô-đun PV mini đa c-Si linh hoạt và định lượng sự lan truyền vết nứt 692.

693 Hiệu ứng của ứng suất cơ học lên sự xuất hiện của các vết nứt nhỏ trong các mô-đun PV trong điều kiện động mô phỏng 694 đã được trình bày bởi Novickij et al. [214], trong đó hai tần số cộng hưởng của rung động 695 (9,8 Hz và 17,5 Hz) gây ra sự xuất hiện của các vết nứt nhỏ. Các vết nứt đã được phân tích định tính bằng kỹ thuật phát quang điện 696. Các tác giả kết luận rằng tải trọng cơ học tần số thấp mô phỏng 697 điều kiện gió có thể gây ra thiệt hại đáng kể cho ô Si và do đó làm giảm hiệu suất của mô-đun PV 698.

699 7.3. Tác động của nứt đến đặc tính điện

700 Nhiều nhà nghiên cứu đã thực hiện các thử nghiệm lão hóa tĩnh, động và tăng tốc để nghiên cứu 701 tác động của các vết nứt ô lên các đặc tính điện của các mô-đun PV. Dòng điện do một ô mặt trời tạo ra 702 tỷ lệ thuận với diện tích hoạt động của ô. Diện tích không hoạt động có thể được phân loại theo việc dòng điện 703 thu thập từ ngón tay đến thanh cái có bị chặn hay không. Người ta quan sát thấy rằng nếu các vết nứt nhỏ gây ra các vùng ô 704 bị ngắt kết nối, chúng sẽ làm giảm hiệu suất điện cũng như tính toàn vẹn cơ học của các ô này. Grunow 705 và cộng sự [57] đã báo cáo rằng khi các vết nứt song song và nằm giữa các thanh cái, đã xảy ra tình trạng mất điện lên tới 706 4%. Tuy nhiên, nếu các vết nứt song song ở cả hai bên của cả hai thanh cái, đã xảy ra tình trạng mất điện 60% 707. Do đó, cần phải hiểu được ảnh hưởng của các vết nứt nhỏ đến đặc tính điện 708 và có thể định lượng được rủi ro mất điện trong các mô-đun PV có cell bị nứt để đảm bảo 709 công suất đầu ra của chúng trong suốt vòng đời sử dụng.

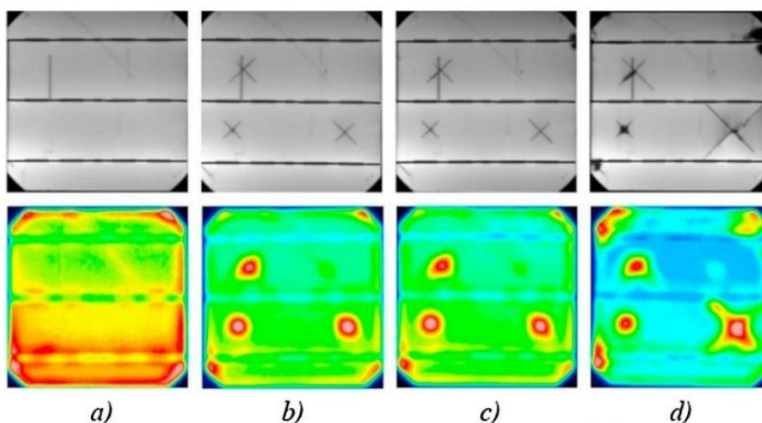
Paggi et al. [101] đã thực hiện các thử nghiệm uốn trên các mô-đun mini linh hoạt có vết nứt ban đầu để phân tích 710 711 sự lan truyền vết nứt và sự suy thoái của các tế bào năng lượng mặt trời. Vai trò của gãy xương đối với sự suy thoái điện 712 đã được theo dõi trong quá trình thử nghiệm bằng kỹ thuật phát quang điện. Nghiên cứu thực nghiệm này 713 cho thấy sự lan truyền vết nứt là một hiện tượng phức tạp và các khu vực nứt có thể phục hồi vì hành vi điện 714 của vết nứt phụ thuộc vào biến dạng đàn hồi. Gade et al. [100] đã thực hiện các thử nghiệm để dự đoán 715 tổn thất điện năng từ các vết nứt của ô trong suốt vòng đời của mô-đun. Các tác giả đã thực hiện các thử nghiệm uốn 3 điểm 716 và đóng băng độ ẩm (HF) trên các mô-đun mini và họ đã chứng minh rằng trong điều kiện ứng suất, các khu vực ô 717 trở nên cô lập. Hơn nữa, họ đã phát hiện ra rằng độ dẫn điện được phục hồi khi ứng suất 718 được giải phóng và loại tấm nền cũng ảnh hưởng đến nó. Ảnh hưởng của các thử nghiệm tải tĩnh và tải động 719 và sự tương tác của chúng với các thử nghiệm ứng suất khí hậu đã được Koch et al. [215] so sánh. Nhiều kết hợp thử nghiệm 720 khác nhau được đánh giá dựa trên sự suy giảm công suất và những thay đổi có thể đã được phát hiện thông qua phát quang điện 721. Người ta thấy rằng các thử nghiệm SML làm tăng các vết nứt nhỏ và các ô nứt do

722 áp suất cao hơn như đã nêu trong các tiêu chuẩn cho thử nghiệm SML. Sự suy giảm công suất cao hơn trong phạm vi 2% 723 đối với thử nghiệm SML. Chang et al. [216] đã thực hiện các thử nghiệm tải cơ học động (DML) để mô phỏng sự nứt vỡ của ô 724 do tải trọng gió trong bão và một chuỗi thử nghiệm khác với áp suất gió khác nhau và 725 khung mô-đun được sử dụng để đánh giá sự suy giảm tiếp theo trong thực tế. Các tác giả đã sử dụng ba loại 726 cấu trúc khung mô-đun cho thấy sự suy giảm công suất khác nhau sau chuỗi thử nghiệm và chứng minh 727 rằng cấu hình lắp đặt đóng vai trò quan trọng đối với chất lượng của hệ thống PV trong thực tế.

728 Nguyên nhân chính gây ra sự suy thoái tiềm ẩn (PID) đối với các tế bào quang điện Si loại p là sự di chuyển của ion natri (Na) 729 từ thủy tinh qua chất đóng gói vào tế bào Si. Đã có một số cuộc điều tra thực nghiệm 730 về vấn đề PID liên quan đến vết nứt nhỏ và cơ chế của nó. Gou và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của các vết nứt nhỏ trong tế bào quang điện silicon 731 đối với hành vi PID. [27] Các đặc tính mật độ dòng điện-điện áp (JV) 732 cục bộ 732 và hình ảnh EL của các mô-đun nhỏ có các vết nứt nhỏ hiện có với các chiều dài khác nhau đã được 733 mô tả trước và sau thử nghiệm PID. Kết quả chỉ ra rằng khi chiều dài vết nứt nhỏ tăng lên, 734 các mô-đun PV có xu hướng cho thấy hành vi PID nghiêm trọng hơn. Một công trình thực nghiệm khác đã chứng minh rằng diện tích phân luồng liên quan đến vết nứt nhỏ 735 bị ảnh hưởng bởi chiều dài, chiều rộng và chiều sâu của các vết nứt nhỏ của tế bào [217].

736 Họ đã nghiên cứu tác động và cơ chế của các vết nứt nhỏ tiếp xúc với ion Na đối với sự tiến hóa của 737 PID. Các thuộc tính đường cong IV trong các khu vực nứt nhỏ của các tế bào năng lượng mặt trời Si đã được đo trước đó

738 và sau khi thử nghiệm ứng suất PID đã chứng minh sự hiện diện của các shunt PID liên quan đến vết nứt nhỏ. Phát quang điện và 739 LIT đã được sử dụng để phát hiện các shunt PID liên quan đến vết nứt nhỏ trong mọi giai đoạn của thí nghiệm như được thể hiện 740 trong Hình 12.



741

742 Hình 12. Hình ảnh phát quang điện (hàng trên cùng) và nhiệt độ khóa (hàng dưới cùng) của các đường phân lưu PID 743 liên
quan đến các vết nứt nhỏ (a) điều kiện ban đầu, (b) sau khi hình thành các vết nứt nhỏ, (c) sau 50 giờ thử nghiệm ứng suất PID
744 (d) sau 100 giờ thử nghiệm ứng suất PID [217].

745 Nghiên cứu đã chỉ ra rằng các vết nứt có thể góp phần gây ra hiện tượng phân cực ngược [218], [219] có thể gây ra sự gia tăng nhiệt độ 746 và do đó, làm phát sinh các vấn đề về sự xuống cấp. Kasewiter [220] đã thực hiện một thử nghiệm uốn trên các tấm ép 747 và phát hiện ra rằng lớp kim loại hóa mặt trước bằng bạc bị nứt đồng thời với vật liệu Si.

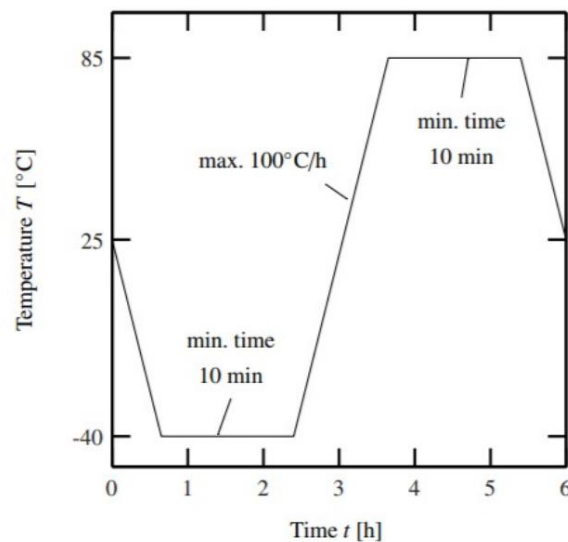
748 Khi tải cơ học được gỡ bỏ, lớp kim loại hóa mặt trước được kết nối lại gần như không có bất kỳ 749 điện trở tiếp xúc bổ sung nào. Ngược lại, lớp kim loại hóa mặt sau bằng nhôm không bị cô lập ngay lập tức 750 với vết nứt đầu tiên của silicon mà thể hiện hành vi nứt môi. Khi chiều rộng và 751 độ sâu của các vết nứt nhỏ tăng lên, khả năng chống nứt càng cao [220]. Điện trở cao cản trở 752 quá trình vận chuyển hạt mang đến các ngón tay, làm giảm khả năng thu thập hạt mang và quan sát thấy sự tái hợp nhanh chóng 753 của các hạt mang tại các cạnh của các vết nứt nhỏ. Do đó, các khu vực này trở thành các trung tâm tái hợp 754, dẫn đến sự suy thoái mạnh trong các phản ứng Hiệu suất lưu trữ từ bên ngoài (EQE) 755 tương ứng [217]. Do đó, chiều rộng và độ sâu của vết nứt nhỏ càng lớn thì sự suy thoái 756 của EQE và các thuộc tính điện khác sẽ càng cao. Demant et al. [221] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các vết nứt 757 được tạo ra trong các bước xử lý ban đầu đối với hành vi phân luồng của các tế bào Si. Các phát hiện cho thấy rằng các vết nứt nhỏ 758 dẫn đến sự suy giảm công suất đáng kể do mật độ dòng điện ngược jREV tăng và điện trở song song Rp giảm 759 được quan sát thấy thông qua hình ảnh phát quang (PL).

760 7.3.1. Ảnh hưởng của các thử nghiệm lão hóa tăng tốc đến các đặc tính điện

761 Thông thường, các nhà sản xuất PV cung cấp bảo hành sản phẩm trong 15 năm và bảo hành hiệu suất PV trong 10 và 25 năm 762 tương ứng là 90% và 80% công suất định mức. Là một phần của quy trình chứng nhận, các mô-đun PV 763 phải chịu tải cơ học (tĩnh và động) và một số loại thử nghiệm lão hóa tăng tốc như chu kỳ nhiệt, nhiệt ẩm và đóng băng độ ẩm, được mô tả trong tiêu chuẩn quốc tế IEC 61215 [20].

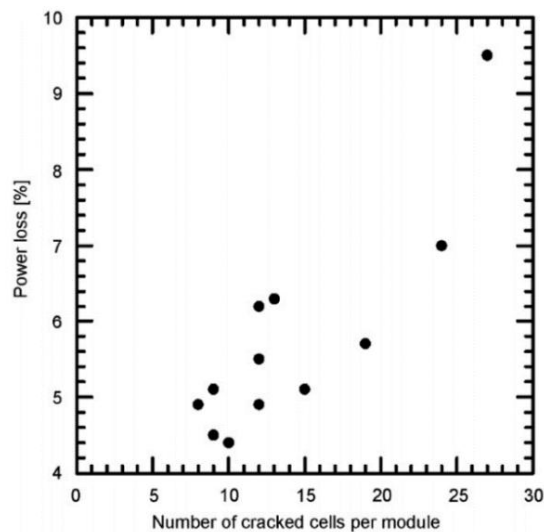
765 Mục đích của các thử nghiệm này là để xác minh độ bền và độ tin cậy của sản phẩm; tức là khả năng của các mô-đun 766 chịu được sự không phù hợp về nhiệt, môi trường và các ứng suất khác do những thay đổi lặp đi lặp lại trên

767 nhiệt độ và độ ẩm [20]. Trong số các thử nghiệm này có Thử nghiệm tuần hoàn nhiệt (TCT) trong đó một mô-đun phải chịu độ ẩm tương đối là 85% và chu kỳ nhiệt độ giữa -40°C và $+85^{\circ}\text{C}$ như được mô tả trong Hình 13.



Hình 13. Một chu kỳ thử nghiệm chu kỳ nhiệt (TCT) theo IEC 61215 [20].

Nhiều mô-đun PV bị suy giảm hơn 5% sau các thử nghiệm lão hóa tăng tốc và do đó chúng bị hỏng [158]. Sự tiến triển của các vết nứt nhỏ do chu kỳ nhiệt vẫn chưa rõ ràng [223]. Tác động của thử nghiệm lão hóa tăng tốc đối với sự hình thành các vết nứt nhỏ trong mô-đun PV đã được González và cộng sự [224] nghiên cứu, trong đó báo cáo rằng các chu kỳ nhiệt áp dụng cho các mô-đun PV được tháo khỏi nhà máy PV không tạo ra vết nứt mới nhưng khiến các mô-đun PV dễ nứt trong quá trình thử nghiệm cơ học tiếp theo. Sau TCT và ML, tổn thất công suất nằm trong khoảng 0,4-1,8%. Trong khi trong một thí nghiệm khác [15], PMPP và FF giảm 3,6% và 3% sau thử nghiệm tải cơ học và 6% và 6,2% sau thử nghiệm tải cơ học và 200 chu kỳ nhiệt (tức là TC200) kết hợp. Một nghiên cứu khác báo cáo rằng không có tổn thất công suất đáng kể nào sau khi quan sát thấy vết nứt phát triển; thậm chí sau 800 chu kỳ TC, các mô-đun vẫn giữ lại hơn 95,5% công suất ban đầu [222]. Kontges et al. [8] đã thực hiện một thử nghiệm ML là tiếp theo là 200 chu kỳ HF và liên hệ mức mất điện với số vết nứt trong mô-đun PV (xem Hình 14). Họ quan sát thấy rằng các vết nứt chế độ A gây ra mức mất điện thấp (thấp tới 4,3%) nhưng trong quá trình thử nghiệm đóng băng độ ẩm, chúng có thể trở thành các vết nứt chế độ B hoặc C và do đó có thể gây ra mức mất điện đáng kể (lên tới 9,6%).



786

787 Hình 14. Sơ đồ cho thấy mối tương quan giữa tổn thất công suất sau khi thử nghiệm ML thành công sau 200
788 chu kỳ HF với số lượng cell bị nứt trong quá trình thử nghiệm ML. Mỗi điểm biểu thị một mô-đun PV 789 duy
nhất [8].

790

Độ tin cậy lâu dài của các mô-đun PV và tổn thất điện năng khi sử dụng các thử nghiệm lão hóa tăng tốc cũng được Khatri và cộng sự nghiên cứu [14]. Thử nghiệm nhiệt ẩm (DH) chủ yếu làm suy giảm các thành phần mô-đun, cho phép độ ẩm và nhiệt phản ứng với các tế bào quang điện và gây ra sự suy giảm. Kết quả thử nghiệm của Khatri và cộng sự [14] cho thấy điện trở nối tiếp của tế bào tăng khoảng 7% do nứt với tổn thất công suất là 4% và hệ số lấp đầy giảm 3%. Các vết nứt nhỏ, chủ yếu được quan sát thấy trong quá trình TCT, có thể rất quan trọng đối với độ tin cậy lâu dài của các mô-đun PV và do đó cần phải được ngăn chặn càng nhiều càng tốt. Một sự gia tăng đáng kể các vết nứt đã được quan sát thấy ở các mô-đun trước đó không bị hư hỏng khi áp dụng hơn 300 chu kỳ nhiệt. Philipp [225] cũng thu được kết quả tương tự khi báo cáo rằng 50% các mô-đun được thử nghiệm có 3 vết nứt mới trở xuống sau TC200. Tuy nhiên, trong cùng báo cáo, tác giả cũng chỉ ra rằng ngay cả 799 sau TC400, 10% mô-đun không cho thấy bất kỳ vết nứt bổ sung nào. Ít hơn 5% trong số các mô-đun 800 được thử nghiệm sẽ xuống cấp hơn 5% sau TC200 và TC400. Lincoln và cộng sự [226] đã thực hiện một phân tích thử nghiệm 801 với thử nghiệm ứng suất bao gồm tải cơ học tĩnh, thử nghiệm buồng môi trường và tải tuần hoàn 802 đi kèm với EL và IV. Người ta kết luận rằng các chu kỳ nhiệt và đóng băng độ ẩm khiến 803 các mô-đun PV dễ bị tổn thương hơn. Người ta cũng báo cáo rằng các vết nứt đã tạo trước đó có thể được mở lại ở 804 mức tải thấp hơn, một kết quả cũng được Sander và cộng sự quan sát thấy. [210]. Một cuộc điều tra hơn 805 250 mô-đun PV đã phát hiện ra rằng tổn thất điện năng lên tới 20% do các vết nứt ô kết hợp với sự nâu hóa và tách lớp của etylen-vinyl 806 axetat (EVA) [13]. Kajari-Schröder và cộng sự [16], phát hiện ra rằng sau 200 chu kỳ HF, 807 7% các ô bị nứt phát triển một vùng ô không hoạt động về điện và 29% các ô bị nứt biểu hiện 808 sự suy giảm công suất không được định lượng. 809 Ngoài các công trình trước đó, các thử nghiệm lão hóa tăng tốc đã được thực hiện đối với các mô-đun bị hư hỏng trước đó và 810 sự suy giảm của chúng đã được phân tích. Grunow et al. [227] đã gây ra các vết nứt cho các mô-đun PV ô mono-c-Si, để nghiên cứu 811 tác động của vị trí các vết nứt lên các thông số điện của từng ô Si. Wendt et al. [228] 812 đã nghiên cứu một mô-đun PV có các ô mặt trời được hàn trong điều kiện không phù hợp để các vết nứt 813 được gây ra. Mô-đun đã được ứng suất bởi TC250 và HF10. Trong các thử nghiệm này, các hư hỏng bao gồm cả sự phát triển vết nứt 814 đã được quan sát thấy ngay sau 50 chu kỳ nhiệt đầu tiên, trái ngược với các quan sát của 815 nghiên cứu của Camus et al. [229]. Ở đó, các mô-đun bị hư hỏng trước đó đã được tiếp xúc với nhiều quá trình lão hóa tăng tốc khác nhau

816 điều kiện để phân tích tác động của hư hỏng có từ trước lên hành vi suy thoái theo 817 kịch bản lão hóa tương ứng. Các tác giả quan sát thấy không có thử nghiệm lão hóa tăng tốc nào gây ra bất kỳ 818 thay đổi nào trong hư hỏng có từ trước và hành vi và tốc độ phụ thuộc vào sự lựa chọn các thành phần mô-đun 819 chứ không phải bản chất của hư hỏng trước. Bảng 6 trình bày tóm tắt về 820 cuộc điều tra thử nghiệm liên quan đến vết nứt trong PV c-Si.

Journal Pre-proof

821 Bảng 6. Tóm tắt các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến vết nứt PV.

Thần quyền giải quyết	Trong nhà/ ngoài trời	Tính/ Năng động	Thiết lập ML	Trình tự của Mô hình tạo	Tỉ lệ	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small> hoặc nhiều	Phát hiện phương pháp của vết nứt	Điện đặc trưng đã đo lường	Kết quả và nhận xét
Kajazi-Shroder và cộng sự [99]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S	Tính trong nhà máy kiểm tra tải cơ học (5x3 giác hút)	-	Mô-đun-60 ô	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small> Và nhiều	ANH TA	-	1) Mỗi hướng vết nứt có thể ảnh hưởng đến công suất đầu ra của mô-đun PV theo những cách khác nhau, 2) áp suất đồng nhất dẫn đến sự phân bố không đồng đều của các vết nứt do khung đỡ mô-đun PV, 3) sự phân bố không gian của các lớp vết nứt khác nhau rất khác nhau.
Quận [8]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S	Tính trong nhà tải trọng cơ học	ML-HF200	Các mô-đun- 60 tế bào	nhiều	ANH TA		Các vết nứt nhỏ của cell gây ra tổn thất điện năng thấp khi chúng không gây ra các vùng bị ngắt kết nối (chế độ A). Trong HF, một số vết nứt ở chế độ A chuyển sang chế độ B hoặc thậm chí là chế độ C. Tổn thất điện năng cao hơn đối với các mô-đun có nhiều cell bị nứt hơn.
Sander và cộng sự [210]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S	4PB	Máy tính	Nhỏ các mô-đun- 10 tế bào	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small> Và nhiều	ANH TA	-	1) Tải song song với thanh cái quan trọng hơn tải vuông góc, đặc biệt đối với multi-c-Si, 2) các vết nứt bắt đầu chủ yếu ở các điểm yếu hiện có từ quá trình hàn hoặc cán mỏng.
Gabor và cộng sự [140]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S	Điểm tải	-	Mô-đun đa		ANH TA		Ban đầu không có vết nứt nào được quan sát thấy như ng nhiều vết nứt mới hình thành ở 1200 Pa. Khi giải phóng toàn bộ áp suất, các vết nứt đóng hoàn toàn và không thể phát hiện được. Các mô-đun có ô nứt mở có thể bị mất điện nhiều hơn khi che bóng so với các mô-đun không có ô nứt mở.
Trang và cộng sự [101]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	D	Bóng PMMA để tạo ra vết nứt có sẵn và thử nghiệm uốn	-	Bán- lĩnh hoạt nhỏ mô-đun- 10 tế bào	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	ANH TA		Hành vi điện của vết nứt phụ thuộc vào biến dạng đàn hồi. Các vùng nứt có thể phục hồi độ dẫn điện.
Đường phố và cộng sự [100]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S	3PB	3PB & HF10 và một số mô-đun + HF20	Nhỏ mô-đun-4 tế bào	nhiều	ANH TA		Trong điều kiện căng thẳng, các vùng nứt của cell mất tính dẫn điện với phần còn lại của mạch cell. Tính dẫn điện được phục hồi khi ứng suất được loại bỏ. Loại tấm nền ảnh hưởng đến tính dẫn điện.
Koch và cộng sự [215]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S, Đ	16 xi lanh khí nén, mỗi xi lanh được trang bị bốn cốc chân không	ML-DH, DML-DH, <small>ĐẠI HỌC</small>	Mô-đun- 72 tế bào	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	ANH TA		Độ suy giảm công suất nằm trong khoảng 2% đối với ML, cao hơn DML. DH dẫn đến mức tăng công suất trung bình +2% trên các mô-đun mono-c-Si, phù hợp với quy trình thử nghiệm chứng nhận IEC với mức tăng trung bình là 1%.
Chang và cộng sự [216]	Tối, ở	D	Cốc hút chân không	DML, DML-TC50- HF10	Mô-đun	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small> Và nhiều	ANH TA		Các phép đo ngoài trời sau hai cơn bão liên tiếp (với tốc độ gió tối đa: 35,7 m/giây và 36,2 m/giây) cho thấy mức suy giảm công suất lần lượt là 1,5% và 1,6% đối với mô-đun PV mono-c-Si và multi-c-Si.
Mülhøfer và cộng sự [212]	<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small>	S, Đ	Xi lanh khí nén và bao cát	Mô-đun ML, DML		<small>Ảnh hưởng của tải trọng</small> Và nhiều	ANH TA		Tải tuần hoàn dẫn đến tổn thất công suất và lỗi cell ít hơn so với tải tĩnh gần đúng. Tổn thất công suất lớn hơn được quan sát thấy đối với các mô-đun mono-c-Si. Thử nghiệm tải cơ học ở -40 °C dẫn đến nhiều vết nứt cell và mất công suất đáng kể. Thử nghiệm ở -40 °C bằng bao cát thay vì xi lanh khí nén cũng cho thấy hư hỏng cell đáng kể.

									Các thử nghiệm đã tiết lộ mối tương quan giữa sự xuất hiện của các vết nứt tế bào và nhiệt độ mà tải trọng cơ học được áp dụng.
Schneller và cộng sự [166]	...	D	Điểm tải	ML-DML	Mô-đun-60 tế bào	Và nhiều	ANH TA		Các mô-đun có hỗ trợ bổ sung như thanh ray hoạt động tốt hơn so với các mô-đun không có hỗ trợ. Mặc dù cả mô-đun mono-c-Si và multi-c-Si đều có số lượng ô bị gãy tương tự, nhưng mô-đun mono-c-Si có mức mất điện lên tới 20% trong khi mô-đun đa tinh thể chỉ có 5,3%.
Hack và cộng sự [222]	...	-	-	DH, TC, xen kẽ DH và TC	Mô-đun đa		Kiểm tra quang học, nhiệt độ hy, EL		1) Một số lượng nhỏ vết nứt đã được quan sát thấy sau TC200 với mức mất điện không đủ điều kiện, 2) các mô-đun vẫn giữ được hơn 95,5% công suất ban đầu sau TC800.
Dethlefsen và cộng sự [223]	...	-	-	TC	Mô-đun đa		ANH TA		Ngay cả các mô-đun có số lượng cell pin bị nứt tương đối lớn cũng không ảnh hưởng đến sự suy giảm chất lượng ngay cả sau thời gian thử nghiệm IEC 61215 kéo dài.
Chatuverdi và cộng sự [15]	...	S	ML (đồng phục-2400 Tốt)	ML, ML-TC	Mô-đun-60 tế bào	đa EL,SEM			PMPP và FF của mô-đun sau khi thử tải cơ học giảm lần lượt 3,6% và 3,0%, trong khi VOC và ISC phần lớn không bị ảnh hưởng trong thử nghiệm này. Điều này có thể được hiểu là những thay đổi về điện trở shunt và điện trở nối tiếp.
Gonzalez và cộng sự [224]	Tôi, ô	S	ML 2400 Pa (IEC 61215)	TC-ML, Mô-đun ML đa			ANH TA		Các chu kỳ nhiệt áp dụng cho các mô-đun PV không tạo ra bất kỳ vết nứt nhỏ mới nào nhưng lại khiến các mô-đun PV dễ nứt trong các thử nghiệm cơ học tiếp theo trong khi trong TC-ML, các vết nứt chủ yếu xảy ra song song và góc 45 độ ở thanh cái. Các vết nứt nhỏ hiện có không phát triển rõ rệt sau ML hoặc TC-ML và do đó sự hiện diện của các vết nứt nhỏ không ngụ ý sự hình thành các vết nứt nhỏ cao hơn trong tương lai. Tổn thất điện năng nằm trong khoảng 0,4-1,8% sau TC và ML.
Khatrı và cộng sự [14]	...	-	-	TC, DH	Mô-đun-60 tế bào	nhiều	ANH TA		Sự mất mát FF (do RS tăng) đã được quan sát thấy trong cả hai thử nghiệm tăng tốc và là một trong những nguyên nhân chính gây ra sự suy thoái mô-đun. DH chủ yếu làm suy thoái các thành phần của mô-đun, cho phép độ ẩm và nhiệt phản ứng với các tế bào và làm suy thoái chúng.
Lincoln và cộng sự [226]	...	S, Đ	Điểm tải	ML-PCO thử nghiệm-TC-HF	Các mô-đun-60 tế bào		ANH TA		Trình tự TC/HF khiến các mô-đun PV dễ bị tổn thương hơn trước các tải trọng trong tương lai. Các vết nứt hiện có có thể được mở lại ở mức tải thấp hơn được sử dụng để hình thành các vết nứt này.
Kajari-Shroder và cộng sự [16]	...	S	Tính trong nhà máy kiểm tra tải cơ học	ML-HF	Các mô-đun-60 tế bào	Và nhiều	ANH TA		Các vết nứt song song với thanh cái và ô pin có nhiều hướng nứt cho thấy khả năng xuống cấp cao trong quá trình lão hóa nhân tạo.
Sander và cộng sự [52]	Tôi, ô	S	4PB	DH-ML, TC-ML	Nhỏ mô-đun-6 tế bào		ANH TA	-	1) Việc điều tra các điều kiện sản xuất khác nhau cho thấy hàn hồng ngoại là tốt hơn. 2) Sau DH-ML: độ bền gãy đã tăng lên. 3) Sau TC-ML: độ bền gãy đã giảm đáng kể ngay sau 10 chu kỳ đầu tiên. 4) Sau 4 tháng tiếp xúc ngoài trời, không thể đo được sự thay đổi đáng kể nào về độ bền đặc trưng.

823 8. Tóm tắt và Kết luận

824 Các vết nứt trong các tế bào quang điện silicon dạng wafer là một vấn đề nổi tiếng trong ngành công nghiệp PV. Sự hình thành của chúng là điều không thể tránh khỏi trong quá trình sản xuất hoặc tuổi thọ của một mô-đun và cho đến nay vẫn chưa rõ cách định lượng tác động của chúng đối với hiệu suất PV. Các vết nứt nhỏ không được phát hiện hình thành trong quá trình sản xuất có thể làm giảm tuổi thọ dự kiến. Các khu vực của các tế bào Si có thể bị cô lập một phần hoặc toàn bộ do các vết nứt và tác động của chúng đối với tổn thất điện năng phụ thuộc vào các đặc điểm của chúng. Các vết nứt có khả năng phát triển trong thời gian dài và do đó kéo dài tác động của chúng đối với chức năng và hiệu suất của mô-đun PV, đồng thời có khả năng gây ra các điểm nóng. Một số nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng các vết nứt nhỏ có thể làm tăng hiện tượng PID. Các nghiên cứu nhiệt học cho thấy các vết nứt chủ yếu hoạt động như các trung tâm tái hợp với nhiệt độ cục bộ tăng lên xung quanh chúng và do đó hiệu suất của mô-đun PV có thể giảm. Trong tài liệu, các vết nứt trong mô-đun PV đã được nghiên cứu sâu rộng vì do tải trọng cơ học hoặc nhiệt, chúng có thể làm giảm đáng kể hiệu suất điện và độ tin cậy của mô-đun.

836 Nghiên cứu này tóm tắt và so sánh nhiều khía cạnh khác nhau của vết nứt trong các mô-đun PV như nguồn gốc của chúng, đặc điểm 837 của chúng và các yếu tố ảnh hưởng đến chúng. Các vết nứt có thể hình thành trong quá trình cắt thái hoặc thanh tinh thể 838 hoặc trong các giai đoạn sản xuất khác nhau. Hơn nữa, việc xử lý/vận chuyển/lắp đặt mô-đun PV 839 không đúng cách và tải trọng môi trường bên ngoài tại hiện trường có thể dẫn đến hình thành 840 vết nứt mới hoặc lan truyền các vết nứt hiện có. Trong nghiên cứu này, các vết nứt được phân loại dựa trên kích thước, 841 hình dạng, vị trí, hướng hoặc mức độ nghiêm trọng của chúng và các yếu tố ảnh hưởng đến chúng được coi là hai-842 gấp: (i) các vết nứt xuất phát từ các đặc tính cơ học và (ii) các vết nứt xuất phát từ các đặc tính hình học của chúng.

đầu Các mô phỏng số được thực hiện để nghiên cứu ứng suất dư trong quá trình sản xuất PV và hoạt động 843 844, có thể dẫn đến sự khởi hoặc lan truyền các vết nứt đã được kiểm tra chi tiết. Hơn nữa, các nghiên cứu 845 khác sử dụng các phương pháp từ cơ học gây ứng suất cố gắng liên hệ các vết nứt với phản ứng điện 846 của chúng cũng đã được thảo luận. Ngoài ra, các nghiên cứu thực nghiệm đã được triển khai ở quy mô wafer-, cell- và 847 PV-module để nghiên cứu tác động của các vết nứt đến độ bền cấu trúc và các đặc tính điện 848 của mô-đun đã được so sánh theo ứng dụng, phương pháp phát hiện và vật liệu được sử dụng. Trong 849 để cải thiện chức năng và hiệu suất của các mô-đun PV, việc hiểu cơ chế gây 850 trong silicon có ý nghĩa rất lớn đối với cả những người hành nghề trong ngành công nghiệp và khoa học.

851 Phát hiện chính của bài tổng quan tài liệu toàn diện này cho thấy các đặc điểm vết nứt (vị trí, hướng 852, hình dạng, v.v.) phụ thuộc rất nhiều vào cách chúng bắt đầu. Hơn nữa, bài tổng quan các nghiên cứu mô phỏng vết nứt 853 cho thấy hầu hết các nghiên cứu này không kết hợp ứng suất dư từ các bước sản xuất và xử lý 854 trước đó, bỏ qua lịch sử ứng suất của các ô Si. Do đó, việc đánh giá thấp 855 khả năng nứt phát sinh, đặc biệt là khi các mô-đun PV hoạt động tại hiện trường, nơi chúng trải qua 856 điều kiện tải khác nhau do các thông số môi trường khác nhau. Nghiên cứu này cũng cho thấy tác động 857 của vết nứt đối với độ tin cậy và đặc tính điện của các mô-đun PV vẫn còn gây tranh cãi. Trong khi một số nghiên cứu 858 chỉ ra rằng có thể phục hồi điện khi tải trọng được áp dụng được rút ra, thì những nghiên cứu khác lại báo cáo 859 mức mất điện lên tới 20% (kết hợp với các cơ chế suy thoái khác). Mặc dù vết nứt là 860 không thể tránh khỏi, việc xác định và hiểu các yếu tố kích hoạt sự bắt đầu và lan truyền vết nứt là 861 rất quan trọng để cải thiện độ tin cậy về mặt cơ học và điện của các mô-đun PV. Do đó, cần tiến hành thêm 862 cuộc điều tra để a) nhận biết liệu các mô-đun PV tiếp xúc 863 với các điều kiện tải khác nhau, có hoặc không có ứng suất do vận hành trước, có biểu hiện mất hiệu suất 864 hay các vấn đề xuống cấp hay không và b) dự đoán và định lượng tác động và sự phát triển lâu dài của vết nứt 865 trong các điều kiện khí tượng khác nhau.

866 Lời cảm ơn 867 Công

trình này được đồng tài trợ bởi chương trình nghiên cứu và đổi mới Horizon 2020 của Liên minh châu Âu 868 trong khuôn khổ dự án "TwinPV" với thỏa thuận tài trợ số 692031.

Journal Pre-proof

869 Tài liệu tham khảo

- 870 [1] 871 "Lộ trình công nghệ quốc tế cho quang điện (ITRPV) Phiên bản thứ chín. Kết quả năm 2017," 2018.
[Trực tuyến]. Có sẵn: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/2018>.
- 872 [2] M. Knausz et al., "Hành vi giãn nở nhiệt của vật liệu bao bọc pin mặt trời," Polym. Test., 873 tập 44, trang 160-167, 2015.
- 874 [3] 875 P. Rupnowski và B. Sopori, "Độ bền của tấm silicon: phương pháp tiếp cận cơ học gãy," Int. J.
Fract., tập. 155, số 1, trang. 67-74, 2009.
- 876 [4] 877 S. Pingel, Y. Zemen, O. Frank, T. Geipel và J. Berghold, "Độ ổn định cơ học của các tế bào quang điện trong tấm pin mặt
878 trời," trong Hội nghị Năng lượng Mặt trời PV Châu Âu lần thứ 24. Hamburg, Đức, trang 3459-3464, 2009.
- 879 [5] 880 AM Gabor, R. Janoch, A. Anselmo và H. Field, "Các yếu tố thiết kế tấm pin mặt trời giúp giảm tác động của các ô nứt và
881 xu hướng lan truyền vết nứt" trong Hội thảo về độ tin cậy của mô-đun quang điện NREL.
Denver, CO, Hoa Kỳ, trang 1. 1-11, 2015.
- 882 [6] M. Köntges, M. Siebert, A. Morlier, R. Illing, N. Bessing và F. Wegert, "Tác động của giao thông vận tải đến các mô-đun quang điện
dựa trên tấm silicon," Prog. Photovoltaics Res. Appl., tập 24, số 8, trang 883 884 1085-1095, 2016.
- 885 [7] M. Assmus, S. Jack, K. Weiss và M. Koehl, "Đo lường và mô phỏng độ rung của các mô-đun PV do tải trọng cơ học động gây ra," Prog.
Photovoltaics Res. Appl., tập 19, số 6, trang 886 887 688-694, 2011.
- 888 [8] M. Köntges, I. Kunze, S. Kajari-Schröder, X. Breitenmoser và B. Bjørneklett, "Nguyên cơ mất điện trong các mô-đun quang điện dựa trên
silicon tinh thể do các vết nứt nhỏ," Sol. Energy Mater. Sol. 889 890 Cells, tập 95, số 4, trang 1131-1137, 2011.
- 891 [9] S. Spataru, P. Cernek, D. Sera, T. Kerekes và R. Teodorescu, "Đặc điểm của Hệ thống quang điện silic tinh thể sau 15 năm hoạt
892 động ở miền Bắc Đan Mạch," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 29. Amsterdam, Hà Lan,
893 trang 2680-2688, 2014.
894
- 895 [10] MA Munoz, MC Alonso-García, N. Vela và F. Chenlo, "Sự suy thoái sớm của các mô-đun PV 896 silicon và các điều kiện bảo hành," Sol.
Energy, tập 85, số 9, trang 2264-2274, 2011.
- 897 [11] JI van Mülken et al., "Tác động của các vết nứt nhỏ đến sự suy giảm hiệu suất của tế bào năng lượng mặt trời 898 dựa trên các
tham số mô hình hai điện trở," Energy Procedia, tập 27, số Phụ lục C, trang 167-
899 172, 2012.
- 900 [12] B. Javvaji, PR Budarapu, M. Paggi, X. Zhuang và T. Rabczuk, "Tính chất gãy của silicon phủ Graphene-901 cho quang điện," Adv.
Theory Simulations, tập 1, số 12, trang 1800097, 2018.
- 902 [13] K. Schulze, M. Groh, M. Nieß, C. Vodermayr, G. Wotruba và G. Becker, "Nghiên cứu tác động lão hóa lên các mô-đun PV đơn tinh thể hoạt
động hơn 15 năm bằng phương pháp đo điện phát quang và công suất," trong Hội thảo lần thứ 28 về Năng lượng Mặt trời Quang
điện. 905 Staffelstein, Đức, 2013.
- 906 [14] R. Khatri, S. Agarwal, I. Saha, SK Singh và B. Kumar, "Nghiên cứu về độ tin cậy lâu dài của các mô-đun quang điện 907 và phân
tích sự suy giảm công suất bằng cách sử dụng các thử nghiệm lão hóa tăng tốc và kỹ thuật phát quang điện 908," Energy Procedia, tập 8, số.
Phụ lục C, trang 396-401, 2011.
- 909 [15] P. Chaturvedi, B. Hoex và TM Walsh, "Các ngón tay kim loại bị gãy trong các tế bào quang điện wafer silicon và PV 910
mô-đun," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 108, trang 78-81, 2013.

- 911 [16] S. Kajari-Schröder, I. Kunze và M. Köntges, "Mức độ nghiêm trọng của các vết nứt trong mô-đun PV," *Năng lượng* 912
Tiền hành, tập. 27, trang. 658-663, 2012.
- 913 [17] A. Morlier, F. Haase và M. Köntges, "Tác động của các vết nứt trong tế bào quang điện silicon đa tinh thể lên công suất mô-đun PV 914-
Nghiên cứu mô phỏng dựa trên dữ liệu thực địa", *IEEE J. Photovoltaics*, tập 5, số 6, trang 1735-1741, 2015.
- 916 [18] M. Köntges và cộng sự, *Đánh giá về sự cố của các mô-đun quang điện. Nhiệm vụ 13 PVPS của IEA. Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA)*, 2014.
- 918 [19] S. Dietrich, M. Sander, M. Pander và M. Ebert, "Mối quan hệ phụ thuộc lẫn nhau giữa tỷ lệ hỏng hóc cơ học của các tế bào quang điện
được đóng gói và các thông số thiết kế mô-đun," trong *SPIE 8472 - Độ tin cậy của các tế bào quang điện 919 920*, mô-đun,
thành phần và hệ thống V. San Diego, CA, Hoa Kỳ, trang 84720P, 2012.
- 921 [20] IEC 61215. Mô-đun quang điện mặt đất (PV) silicon tinh thể e thiết kế đủ điều kiện và loại 922
phê duyệt. Ủy ban Kỹ thuật Điện quốc tế (IEC), 2005.
- 923 [21] M. Abdelhamid, R. Singh và M. Omar, "Đánh giá các kỹ thuật phát hiện vết nứt nhỏ cho pin mặt trời Silicon 924," *IEEE J. Photovoltaics*,
tập 4, số 1, trang 514-524, 2014.
- 925 [22] M. Köntges và cộng sự, *Đánh giá các lỗi mô-đun quang điện tại hiện trường. Báo cáo Nhiệm vụ PVPS của IEA 926*
13. Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA), 2017.
- 927 [23] "Liên đoàn vật liệu mô-đun bền (DuraMat)," 2019. .
- 928 [24] M. Israil, SA Anwar và MZ Abdullah, "Phát hiện tự động vết nứt nhỏ trong tấm wafer và pin mặt trời 929: một bản đánh giá," *Trans. Inst.*
Meas. Control, tập 35, số 5, trang 606-618, 2013.
- 930 [25] M. Israil, "Kỹ thuật phát hiện vết nứt nhỏ không phá hủy trong pin mặt trời silicon," *Phys. Sci. Int.* 931
J., tập 4, số 8, trang 1073-1087, 2014.
- 932 [26] B. Du, R. Yang, Y. He, F. Wang và S. Huang, "Kiểm tra, thử nghiệm và đánh giá không phá hủy đối với pin mặt trời màng mỏng và đa điểm
dựa trên Si: Tổng quan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 933 934 tập 78, trang 1117-1151, 2017.
- 935 [27] X. Gou, X. Li, S. Wang, H. Zhuang, X. Huang và L. Jiang, "Ảnh hưởng của chiều dài vết nứt nhỏ trong các ô silicon lên hành vi suy thoái
tiềm ẩn do cảm ứng", *Int. J. Photoenergy*, tập. 2018, trang 936 937 1-6, 2018.
- 938 [28] S. Wiegold, AE Morishige, L. Meyer, T. Buonassisi và EM Sachs, "Phát hiện vết nứt trong pin mặt trời silicon tinh thể bằng cách sử
dụng hình ảnh trường tối," *Energy Procedia*, tập 124, trang 526-531, 939 940 2017.
- 941 [29] H. Wu, "Công nghệ cơ a dây: Đánh giá hiện đại", *Precis. Eng.*, tập 43, trang 1-9, 2016.
- 942 [30] H. Wu, SN Melkote và S. Danyluk, "Độ bền cơ học của các tấm silicon cắt bằng bunn mài mòn rời và cơ a bằng dây kim cương mài mòn cố
định," *Adv. Eng. Mater.*, tập 14, số 5, trang 944 342-348, tháng 5 năm 2012.
- 945 [31] T. Liu, P. Ge, W. Bi, và Y. Gao, "Hư hỏng nứt dư thừa bề mặt trong các tấm bán dẫn silicon gây ra bởi quá trình cơ a dây kim cương liên
kết nhựa 946," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, tập 57, trang 147-156, 2017.
- 947 [32] RK Kang, YF Zeng, S. Gao, ZG Dong và DM Guo, "Thiệt hại lớp bề mặt của Silic 948
Tấm wafer cắt lát bằng quy trình cơ a dây," *Adv. Mater. Res.*, tập 797, trang 685-690, tháng 9 năm 2013.
- 949 [33] A. Grün, A. Lawrenz, R. Porzytsky và O. Anspach, "Nghiên cứu bề mặt wafer với các thử nghiệm độ bền phá vỡ phân giải không gian và
phân tích ứng dụng về độ sâu vết nứt," trong *tạp chí European lần thứ 26* 950

- 951 Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện. Hamburg, Đức, trang 961-965, 2011.
- 952 [34] C. Funke, O. Sciurova, O. Kiriienko và HJ Moller, "Thiết hại bề mặt do cơ a nhiều dây và tính chất cơ học của tấm bán dẫn silicon," trong Hội nghị và triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang hợp Châu Âu lần thứ 20, 2005, tr. 6-10.
- 955 [35] S. Würzner, A. Falke, R. Buchwald và HJ Möller, "Xác định tác động của vận tốc dây lên bề mặt hư hỏng của các tấm silicon cơ a bằng dây kim cơ ứng," Energy Procedia, tập 77, trang 956-957, tháng 8 năm 2015.
- 958 [36] R. Buchwald, K. Fröhlich, S. Würzner, T. Lehmann, K. Sunder và HJ Möller, "Phân tích thiết hại dư ới bề mặt của các tấm wafer mc- và cz-Si dư ới cơ a bằng dây mạ kim cơ ứng," Energy Procedia, 959 960 tập 38, trang 901-909, 2013.
- 961 [37] C. Yang, F. Mess, K. Skenes, S. Melkote và S. Danyluk, "Về ứng suất dư và độ bền gãy của các tấm silicon tinh thể," Appl. Phys. Lett., tập 102, số 2, trang 021909, tháng 1 năm 2013.
- 963 [38] N. Watanabe, Y. Kondo, D. Ide, T. Matsuki, H. Takato và I. Sakata, "Đặc điểm của tấm bán dẫn silicon đa tinh thể 964 dùng cho pin mặt trời dư ới cắt lát bằng dây mài cố định mới," Prog. 965 Photovoltaics Res. Appl., tập 18, số 7, trang 485-490, tháng 7 năm 2010.
- 966 [39] B. Sopori, S. Devayajanam và P. Basnyat, "Đặc điểm bề mặt và phân bố hư hỏng của tấm wafer cắt bằng dây kim cơ ứng 967 dành cho pin mặt trời silicon," AIMS Mater. Sci., tập 3, số 2, trang 669-685, 968 2016.
- 969 [40] C. Chung và V.-N. Le, "Độ sâu cắt trên mỗi vật mài mòn trong quá trình cơ a dây kim cơ ứng cố định," Int. J. Adv. 970 Manuf. Technol., tập 80, số 5-8, trang 1337-1346, tháng 9 năm 2015.
- 971 [41] M. Ge, H. Zhu, C. Huang, A. Liu và W. Bi, "Nghiên cứu về độ sâu cắt không nứt quan trọng đối với cắt lát silicon đơn tinh thể 972 bằng dư ới cơ a dây mài cố định dựa trên các thí nghiệm gia công xứ ớc," Mater. Sci. Semicond. Process., tập 74, trang 261-266, tháng 2 năm 2018. 973
- 974 [42] H. Kim et al., "Ảnh hưởng của quá trình tạo kết cấu liên quan đến quá trình khắc hư hỏng do cơ a trên các tế bào năng lượng mặt trời silicon tinh thể 975," Appl. Surf. Sci., tập 284, trang 133-137, 2013.
- 976 [43] HJ Möller, C. Funke, M. Rinio và S. Scholz, "Silic đa tinh thể cho pin mặt trời," Rắn mỏng 977 Phim, tập 487, số 1-2, trang 179-187, 2005.
- 978 [44] C. Funke, E. Kullig, M. Kuna và HJ Möller, "Thử nghiệm gãy hai trục của tấm silicon," Adv. 979 Tiếng Anh Mater., tập. 6, không. 7, trang. 594-598, 2004.
- 980 [45] M. Oswald, T. Loewenstein, O. Anspach, J. Hirsch, D. Lausch và S. Schoenfelder, "Về mối tư ớng quan 981 giữa độ nhám bề mặt với độ bền cơ học và khả năng phản xạ của tấm bán dẫn silicon," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29. Amsterdam, Hà Lan, trang 983 764-768, 2014.
- 984 [46] VA Popovich, M. Janssen, IJ Bennett và IM Richardson, "Cấu trúc vi mô và tính chất cơ học của tiếp điểm mặt trước của pin mặt trời bằng bạc in dư ới", Đại hội EPD 2015. Cham, 986 tr. 265-272, 2015.
- 987 [47] VA Popovich, MPFHL van Maris, M. Janssen, IJ Bennett và IM Richardson, 988 "Hiểu về các đặc tính của lớp tiếp xúc nhôm của tế bào quang điện silicon và ảnh hưởng của nó đến độ ổn định cơ học", Mater. Sci. Appl., tập 04, số 02, trang 118-127, 2013.
- 990 [48] S. Kim, S. Sridharan, C. Khadilkar và A. Shaikh, "Nhựa nhôm (không chì/cung thấp) cho tấm mỏng 991," trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 31. Lake Buena Vista, FL, Hoa Kỳ, trang 1100-

- 992 1102, 2005.
- 993 [49] F. Huster, "Lĩnh vực bề mặt sau bằng nhôm: điều tra và loại bỏ mùi tàu," trong tạp chí 994 của Châu Âu thế kỷ 20 Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện, 2005, trang 635-638.
- 995 [50] C. Anguiano, M. Felix, A. Medel, D. Salazar và H. Marquez, "Phân tích khả năng gia nhiệt của hệ thống hàn bằng ánh sáng hồng ngoại tập trung 996," trong Hội nghị thường niên lần thứ 37 của Hiệp hội điện tử công nghiệp IEEE. Melbourne, Úc, trang 2136-2140, 2011. 997
- 998 [51] M. Felix, C. Anguiano, A. Medel, M. Bravo, D. Salazar và H. Marquez, "Nhiệt ảnh hồng ngoại 999 của BGA được làm nóng bằng Hệ thống hàn ánh sáng hồng ngoại tập trung," trong Hội nghị công nghệ vi hệ thống, đóng gói, lắp ráp và mạch điện quốc tế lần thứ 7. Đài Bắc, 1000 Đài Loan, trang 323-325, 2012.
- 1001 [52] M. Sander và cộng sự, "Ảnh hưởng của các quy trình sản xuất và quá trình phong hóa tiếp theo đến sự xuất hiện của các vết nứt ô trong các mô-đun PV," trong Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 28. Paris, Pháp, trang 3275-3279, 2013. 1002 1003
- 1004 [53] H. Schulte-Huxel, S. Blankemeyer, R. Bock, A. Merkle, S. Kajari-Schröder và R. Brendel, "Hành vi lão hóa của các kết nối Al hàn bằng laser trong các mô-đun silicon tinh thể," Sol. Energy Mater. 1006 Sol. Cells, tập 106, trang 22-26, 2012.
- 1007 [54] H. Schulte-Huxel, S. Blankemeyer, A. Merkle, V. Steckenreiter, S. Kajari-Schröder, và R. Brendel, 1008 "Kết nối các tế bào quang điện tiếp xúc mặt sau không có thanh cái bằng hàn laser," Prog. Photovoltaics 1009 Res. Appl., tập 23, số 8, trang 1057-1065, 2015.
- 1010 [55] H. Schulte-Huxel, S. Kajari-Schroder và R. Brendel, "Phân tích các quá trình nhiệt thúc đẩy hàn laser nhôm lắng đọng trên chất nền thủy tinh để kết nối mô-đun của tế bào quang điện silicon," IEEE J. Photovoltaics, tập 5, số 6, trang 1606-1612, 2015.
- 1013 [56] K. Komiyama, T. Sasaki và Y. Watanabe, "Ảnh hưởng của hình dạng cạnh dụng cụ trong hàn siêu âm," 1014 J. Mater. Process. Technol., tập 229, trang 714-721, 2016.
- 1015 [57] X. Chen, Y. Gong, D. Li, và H. Li, "Bề mặt siêu kỵ nước chắc chắn và dễ sửa chữa với địa hình nhiều chiều dài được xây dựng bằng tuyến phun nhiệt," Bề mặt keo A Vật lý hóa học. Eng. Asp., tập 492, trang 19-25, 2016. 1017
- 1018 [58] DWK Eikelboom, JH Bultman, A. Schonecker, MHH Meuwissen, MAJC van den 1019 Nieuwenhof và DL Meier, "Chất kết dính dẫn điện để kết nối ứng suất thấp giữa các tế bào quang điện tiếp xúc mặt sau mỏng," trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 29. New Orleans, LA, Hoa Kỳ, 1020 trang 403-406, 2002. 1021
- 1022 [59] T. Geipel, LC Rendler, M. Stompe, U. Eitner, và L. Rissing, "Giảm nhiệt cơ học 1023 Căng thẳng khi sử dụng chất kết dính dẫn điện," Energy Procedia, tập 77, trang 346-355, 2015.
- 1024 [60] Y. Zemen, T. Prewitz, T. Geipel, S. Pingel và J. Berghold, "Tác động của cường độ chịu kéo của bộ kết nối 1025 đến ứng suất bên trong của pin mặt trời trong mô-đun," trong Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện 1026 Châu Âu lần thứ 25. Valencia, Tây Ban Nha, trang 4073-4078, 2010.
- 1027 [61] G. Dou, DC Whalley, C. Liu và YC Chan, "Một phương pháp thực nghiệm để nghiên cứu các hiệu ứng biến đổi đồng phẳng trong các cụm keo dẫn điện dị hướng," Solder. Surf. Mt. 1029 Công nghệ, tập 22, số 1, trang 47-55, 2010.
- 1030 [62] MT Zarmai, NN Ekere, CF Oduoza và EH Amalu, "Đánh giá các công nghệ kết nối 1031 để cải tiến lắp ráp mô-đun quang điện tế bào quang điện silicon tinh thể," Appl. 1032 Năng lượng, tập 154, trang 173-182, 2015.

1033 [63] R. Ebner et al., "Tăng công suất đầu ra của các mô-đun năng lượng mặt trời silicon tinh thể bằng cách áp dụng các khái niệm mô-đun mới 1034", Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 29.

1035 Amsterdam, Hà Lan, trang 171-176, 2014.

1036 [64] H. Xiong et al., "Sự hình thành và phân bố định hướng của các vết nứt do hàn cảm ứng điện từ trong tế bào quang điện silic tinh thể gây ra," IEEE J. Photovoltaics, tập 7, số 4, trang 1038 966-973, 2017.

1039 [65] WJRSong, SKTippabhotla, AAOtay, và ASBudiman, "Ảnh hưởng của hình học kết nối đến 1040 sự tiến triển của ứng suất trong tấm quang điện mặt trời nhiều lớp trong và sau khi cán mỏng," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 187, trang 241-248, 2018.

1041

1042 [66] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander, SH Schulze và M. Ebert, "Đánh giá cơ học và nhiệt cơ học của các tế bào quang điện được đóng gói bằng mô phỏng phần tử hữu hạn," trong SPIE - Độ tin cậy của các tế bào quang điện, mô-đun, thành phần và hệ thống III. San Diego, CA, Hoa Kỳ, trang 77730F, 2010.

1045 [67] KN Rengarajan et al., "Chất đóng gói ứng suất thấp? Ảnh hưởng của vật liệu đóng gói đến ứng suất 1046 và vết nứt của tế bào quang điện silicon mỏng được phát hiện bằng nhiễu xạ tia X dư địa micron của máy gia tốc đồng bộ," 1047 Procedia Eng., tập 139, trang 76-86, 2016.

1048 [68] F. Reil, J. Althaus, W. Vaaßen, W. Herrmann và K. Strohkendl, "Ảnh hưởng của tác động giao thông 1049 và thử nghiệm tải động lên hành vi cơ học và điện của mô-đun PV tinh thể 1050," trong Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 25. Valencia, Tây Ban Nha, trang 3989-

1051 3992, 2010.

1052 [69] XF Brun và SN Melkote, "Phân tích ứng suất và sự vỡ của các tấm silicon tinh thể trong quá trình xử lý và vận chuyển," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 93, số 8, trang 1238-1247, 2009.

1054 [70] KA Weiss, M. Assmus, S. Jack và M. Koehl, "Đo lường và mô phỏng tải trọng cơ học động trên các mô-đun PV," trong SPIE - Độ tin cậy của các tế bào quang điện, mô-đun, 1055 1056 Linh kiện và Hệ thống II. San Diego, CA, Hoa Kỳ, trang 741203, 2009.

1057 [71] G. Mathiak, J. Sommer, W. Herrmann, N. Bogdanski, J. Althaus và F. Reil, "Thiệt hại của mô-đun PV do tác động của mưa đá và tải trọng 1692- tuyết không đồng đều," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 32. Munich, Đức, trang 1696, 2016.

1060 [72] Y. Lee và AAO Tay, "Phân tích ứng suất của mô-đun quang điện dựa trên tấm silicon theo thử nghiệm tải cơ học IEC 61215," Energy 1061 Procedia, tập 33, trang 265-271, 2013.

1062 [73] D. Moore, A. Wilson và R. Ross, "Thử nghiệm tác động mưa đá mô phỏng của tấm pin mặt trời quang điện," 1063 24 Môi trường kết hợp: Mối quan hệ công nghệ. Fort Worth, TX, Hoa Kỳ, 1978.

1064 [74] G. Mathiak et al., "Thiệt hại của mô-đun PV do tác động của mưa đá - Kinh nghiệm thực tế và thử nghiệm trong phòng thí nghiệm," 1065 Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 31. Hamburg, Đức, trang 1915 1066 - 1919, 2015.

1067 [75] M. Corrado, A. Infuso và M. Paggi, "Tác động của mưa đá mô phỏng lên các tấm quang điện linh hoạt: 1068 thử nghiệm và mô hình hóa," Meccanica, tập 52, số 6, trang 1425-1439, 2017.

1069 [76] C. Ferrara và D. Philipp, "Tại sao các mô-đun PV bị hỏng?," Energy Procedia, tập 15, trang 379-387, 1070 2012.

1071 [77] C. Buerhop-Lutz và cộng sự, "Phân tích hiệu suất của các mô-đun PV bị nứt trước ở điều kiện tải thực tế," trong Hội nghị và triển 1072 lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 33, 2017, trang 1451-1456.

1073

1074 [78] JA Tsanakas, L. Ha và C. Buerhop, "Các lỗi và chẩn đoán nhiệt hồng ngoại trong quá trình vận hành các mô-đun quang điện c-Si 1075: Tổng quan về nghiên cứu và những thách thức trong tương lai," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, tập 62, trang 695-709, 2016.

1076

1077 [79] A. Holt et al., "Cấu trúc bề mặt của các tấm bán dẫn silicon đơn tinh thể được sản xuất bằng phương pháp cấy a dây kim cương và phương pháp cấy a bunn tiêu chuẩn trước và sau khi khắc trong dung dịch kiềm," trong *Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 35*, 2010, trang 003501-003504.

1080 [80] C. Kohn, M. Hug, R. Kübler, M. Krappitz và G. Kleer, "Tăng cường độ của các tế bào quang điện silicon in lư ới 1081 bằng phương pháp xử lý sau in", trong *Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 25 / Hội nghị Thế giới lần thứ 5 về Chuyển đổi Năng lượng Quang điện*, số tháng 9. Valencia, Tây Ban Nha, trang 2062-2065, 2010.

1083

1084 [81] T. Wagner, M. Schuetz và M. Ammon, "Một phương pháp mới để phát hiện vết nứt đáng tin cậy trong các tấm wafer 1085 và các ô," trong *Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 26*, 2011, trang 1086 2078-2081.

1087 [82] AM Gabor et al., "Hàn gây hư hỏng cho các tế bào quang điện Si mỏng và phát hiện các tế bào nứt 1088 trong các mô-đun," trong *Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 21*. Dresden, 1089 Đức, trang 4-8, 2006.

1090 [83] G. Li et al., "Đánh giá hành vi nhiệt cơ học của các mô-đun thanh cái và dây thông minh được kết nối trong quá trình sản xuất, vận chuyển và các giai đoạn tải tại hiện trường tiếp theo," *Năng lượng*, tập 168, 1092 trang 931-945, tháng 2 năm 2019.

1093 [84] S. Nasr Esfahani, S. Asghari và S. Rashid-Nadimi, "Mô hình số cho quy trình hàn trong 1094 pin mặt trời silicon," *Sol. Energy*, tập 148, trang 49-56, 2017.

1095 [85] F. Kraemer, J. Seib, E. Peter và S. Wiese, "Phân tích ứng suất cơ học trong các tế bào quang điện trong quá trình kết nối dây-dài," trong *Hội nghị quốc tế lần thứ 15 về nhiệt*, 1096 1097 Mô phỏng và thí nghiệm cơ học và đa vật lý trong vi điện tử và hệ vi mô. 1098 Ghent, Bỉ, trang 1-7, 2014.

1099 [86] LC Rendler et al., "Ứng suất nhiệt cơ học trong pin mặt trời: Mô hình hóa và độ tin cậy của miếng đệm tiếp xúc 1100 phân tích," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, tập 196, trang 167-177, tháng 7 năm 2019.

1101 [87] H. Shin, E. Han, N. Park và D. Kim, "Phân tích ứng suất dư nhiệt của quy trình hàn và cán mỏng để chế tạo mô-đun quang điện 1102 silic tinh thể," *Energies*, tập 11, số 12, trang 3256, tháng 11 năm 2018.

1103

1104 [88] QZ Zhang et al., "Nghiên cứu số về ứng suất dư trong các tấm quang điện sau khi cán mỏng 1105," *J. Mech. Sci. Technol.*, tập 29, số 2, trang 655-662, 2015.

1106 [89] M. Sander et al., "Đặc điểm của các mô-đun PV bằng cách kết hợp kết quả của các phương pháp phân tích cơ học và điện," trong *SPIE - Độ tin cậy của các tế bào quang điện, mô-đun, thành phần và hệ thống 1108 III*. San Diego, CA, Hoa Kỳ, trang 777308, 2010.

1109 [90] J.-S. Jeong, N. Park, và C. Han, "Nghiên cứu cơ chế hỏng hóc tại chỗ của mối hàn kết nối cho mô-đun quang điện silicon tinh thể 1110," *Microelectron. Reliab.*, tập 52, số 9-10, trang 2326-2330, 1111 2012.

1112 [91] WJR Song, SK Tippabhotla, AAO Tay và AS Budiman, "Mô phỏng số về sự tiến hóa của ứng suất trong tế bào năng lượng mặt trời trong 210- toàn bộ chu kỳ sản xuất của tấm quang điện dựa trên wafer silicon thông thường," *IEEE J. Photovoltaics*, tập 8, số 1, trang 217, 2018.

1115 [92] F. Reil et al., "Thử nghiệm thực nghiệm các mô-đun PV dư ới tải trọng tuyết không đồng nhất," trong 27

- 1116 Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu, 2012, trang 3414-3417.
- 1117 [93] R. Pérez và P. Gumbsch, "Nghiên cứu ab initio về tính dị hướng phân cắt trong silic," Acta Mater., tập 48,
1118 số 18-19, trang 4517-4530, 2000.
- 1119 [94] T.-K. Wen và C.-C. Yin, "Phát hiện vết nứt trong các tế bào quang điện bằng cách phân tích giao thoa các mẫu đốm điện tử 1120,"
Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 98, trang 216-223, 2012.
- 1121 [95] SA Anwar và MZ Abdullah, "Phát hiện vết nứt nhỏ của các tế bào quang điện đa tinh thể có bộ lọc khuếch
1122 tán dị hướng cải tiến và kỹ thuật phân đoạn hình ảnh," EURASIP J. Image Video Process., tập. 2014, số
1123 1, trang 15, 2014.
- 1124 [96] J. Gustafsson, H. Larsson, HJ Solheim và T. Boström, "Các thử nghiệm ứng suất cơ học trên các tấm wafer mc-Si 1125 có vết nứt nhỏ,"
trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 23. 1126 Valencia, Tây Ban Nha, trang 1957-1960, 2008.
- 1127 [97] F. Kaule, R. Koepge và S. Schoenfelder, "Thiệt hại và vỡ của các tấm wafer silicon trong quá trình tải trọng va chạm trên mép tấm wafer,"
Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 27. 1129 Frankfurt, Đức, trang 1179-1184, 2012.
- 1130 [98] M. Trautmann, K. Mangold, M. Hemsendorf, C. Berge, C. Probst và E. Rüland, "Phát hiện vết nứt nhỏ trực tuyến 1131 và độ ổn định cơ học
của tấm wafer silicon," trong Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 25 / Hội nghị thế giới lần thứ 5 về chuyển đổi
năng lượng quang điện. Valencia, Tây Ban Nha, trang 2618-2621, 2010.
- 1134 [99] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Eitner và M. Köntges, "Phân bố không gian và định hướng của các vết nứt trong các mô-đun quang điện
2011. tinh thể được tạo ra bởi các thử nghiệm tải cơ học," Sol. Energy Mater. 1135 1136 Sol. Cells, tập 95, số 11, trang 3054-3059,
2011.
- 1137 [100] V. Gade, N. Shiradkar, M. Paggi và J. Opalewski, "Dự đoán tổn thất điện năng dài hạn từ các vết nứt ô trong các mô-đun PV," trong Hội
nghị chuyên gia quang điện lần thứ 42. New Orleans, LA, Hoa Kỳ, trang 1138 1139 1-6, 2015.
- 1140 [101] M. Paggi, I. Berardone, A. Infuso và M. Corrado, "Sự suy thoái do môi và phục hồi điện trong các tế bào
1141 quang điện Silicon được nhúng trong các mô-đun quang điện," Sci. Rep., tập 4, số 1, trang 4506, 2015.
- 1142 [102] TL Anderson, Cơ học gãy xương: Cơ sở và ứng dụng, Ấn bản thứ tư. CRC Press, 1143
2005.
- 1144 [103] KB Broberg, "Các công thức liên quan đến tích phân không phụ thuộc đường đi," trong Cracks and Fracture, San 1145
Diego: Elsevier, 1999, trang 696-700.
- 1146 [104] B. Lawn, Gãy xương của chất rắn giòn, ấn bản lần 2. Cambridge: Nhà xuất bản Đại học Cambridge, 1993.
- 1147 [105] I.-H. Lin và R. Thomson, "Sự phân tách, phát xạ lệch và che chắn cho các vết nứt dư ở tải trọng chung," Acta Metall., tập 34, số
2, trang 187-206, 1986.
- 1149 [106] T. Cramer, A. Wanner và P. Gumbsch, "Sự tiêu tán năng lượng và sự bất ổn định đường đi trong sự gãy động của tinh thể đơn silicon,"
Phys. Rev. Lett., tập 85, trang 788-791, 2000.
- 1151 [107] L. Zhao, D. Bardel, A. Maynadier và D. Nélis, "Hành vi bắt đầu nứt trong tinh thể đơn
1152 silicon," Scr. Mater., tập 130, trang 83-86, 2017.
- 1153 [108] F. Ebrahimi và L. Kalwani, "Sự dị hướng gãy trong tinh thể đơn silic," Mater. Sci. Eng., tập 1154
268, số 1-2, trang 116-126, 1999.
- 1155 [109] JA Hauch, D. Holland, MP Marder và HL Swinney, "Sự gãy động trong tinh thể đơn

- 1156 Silicon," Phys. Rev. Lett., tập 82, số 19, trang 3823-3826, 1998.
- 1157 [110] D. Sherman, "Gương Hackle hay gương có kết cấu? Phân tích nhiễu loạn bề mặt trong silicon tinh thể đơn,"
1158 J. Mater. Sci., tập 38, số 4, trang 783-788, 2003.
- 1159 [111] MJ Buehler, H. Tang, A. van Duin và W. Goddard, "Tốc độ nứt nguội trong gãy động 1160
của silicon," MRS Proc., tập 978, 2006.
- 1161 [112] D. Sherman và I. Be'ery, "Hình dạng và năng lượng của vết nứt lan truyền động dưôi tác động uốn cong,"
1162 J. Mater. Res., tập 18, số 10, trang 2379-2386, 2003.
- 1163 [113] RF Cook, "Sức mạnh và sự gây tiếp xúc sắc nét của silicon," J. Mater. Sci., tập 41, số 3, trang 841-
1164 872, 2006.
- 1165 [114] F. Abraham, N. Bernstein, JQ Broughton và D. Hess, "Sự gãy động của Silic: Mô phỏng đồng thời các electron lượng tử, nguyên tử cổ điển
và chất rắn liên tục," MRS Bull., tập 25, 1167 2000.
- 1168 [115] MJ Buehler, ACT van Duin và WA Goddard, "Mô hình đa mô hình về sự lan truyền vết nứt động trong silicon bằng cách sử dụng trừu tượng
lực phản ứng," Phys. Rev. Lett., tập 96, số 9, trang 1170 095505, 2006.
- 1171 [116] T. Fujii và Y. Akiniwa, "Phân tích động lực học phân tử cho hành vi gãy của màng mỏng silicon đơn tinh
1172 thể có khía nhỏ," Model. Simul. Mater. Sci. Eng., tập 14, số 5, trang 73-83, 2006.
- 1173 [117] J. Swadener, M. Baskes và M. Nastasi, "Mô phỏng động lực học phân tử của gãy giòn trong silicon 1174," Phys. Rev. Lett., tập 89,
số 8, trang 085503, 2002.
- 1175 [118] MA Hopcroft, WD Nix, và TW Kenny, "Mô đun Young của Silic là gì?," J. 1176
Hệ thống vi cơ điện tử, tập 19, số 2, trang 229-238, 2010.
- 1177 [119] A. Masolin, P.-O. Bouchard, R. Martini, và M. Bernacki, "Tính chất nhiệt cơ học và gãy trong silic đơn tinh
1178 thể," J. Mater. Sci., tập 48, số 3, trang 979-988, 2013.
- 1179 [120] JJ Hall, "Các hiệu ứng điện tử trong hàng số đàn hồi của silicon loại n," Phys. Rev., tập 161, số 3, 1180 trang 756-761, 1967.
- 1181 [121] M. Paggi, M. Corrado và J. Reinoso, "Sự gãy của Silic đa tinh thể dị hướng cấp năng lượng mặt trời: Một
1182 phương pháp tiếp cận mô hình vùng kết dính trừu tượng pha kết hợp," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., tập
1183 330, trang 123-148, 2018.
- 1184 [122] C. Bourgeois, E. Steinsland, N. Blanc và NF de Rooij, "Thiết kế bộ cộng hưởng để xác định hệ số nhiệt độ của hàng số đàn hồi của
silicon đơn tinh thể," trong Hội thảo quốc tế về kiểm soát tần số. Orlando, FL, Hoa Kỳ, trang 791-799, 1997 .
- 1187 [123] G. Coletti, NJCM van der Borg, S. De Iuliis, CJJ Tool, và LJ Geerligs, "Độ bền cơ học của các tấm bán dẫn silicon tùy thuộc vào độ dày
và xử lý bề mặt của tấm bán dẫn," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 21 , số tháng 9. Dresden, Đức, trang
2-5, 1190 2006.
- 1191 [124] M. Brede, "Sự chuyển đổi từ giòn sang dẻo trong silicon," Acta Metall. Mater., tập 41, số 1, trang 211-
1192 228, 1993.
- 1193 [125] AW Czauder và FJ Pern, "Việc đóng gói các mô-đun PV sử dụng đồng trùng hợp etylen vinyl axetat 1194 làm chất điện phân: Một
đánh giá quan trọng," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 43, số 2, trang 101-
1195 181, 1996.

1196 [126] K. Agroui và G. Collins, "Xác định các tính chất nhiệt của vật liệu bao bọc EVA liên kết chéo 1197 khi tiếp xúc ngoài trời bằng phương pháp TSC và DSC," *Renew. Energy*, tập 63, số Bổ sung 1198 C, trang 741-746, 2014.

1199 [127] G. Oreski và GM Wallner, "Sự lão hóa vật lý do nhiệt ảm gây ra của vật liệu đóng gói PV," 1200 trong Hội nghị liên hiệp IEEE lần thứ 12 về Hiện tượng nhiệt và nhiệt cơ trong Hệ thống điện tử. Las Vegas, NV, Hoa Kỳ, trang 1-6, 2010.

1201

1202 [128] SK Tippabhotla et al., "Từ tế bào đến tấm ép: thăm dò và mô hình hóa sự tiến hóa ứng suất dư trong các mô-đun quang điện silicon mỏng 1203 bằng các thí nghiệm nhiễu xạ tia X vi mô synchrotron và mô phỏng phần tử hữu hạn," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, tập 25, số 9, 1204 trang 791-809, 2017.

1205 [129] U. Eitner, M. Pander và S. Kajari-Schröder, "Nhiệt cơ học của các mô-đun PV bao gồm độ nhớt đàn hồi của EVA," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 26. 1207 Hamburg, Đức, trang 3267-3269, 2011.

1208 [130] O. Hasan và AFM Arif, "Mô hình dự đoán hiệu suất và tuổi thọ cho các mô-đun quang điện: 1209 Hiệu ứng của hành vi cấu thành chất đóng gói," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, tập 122, trang 75-87, 1210 tháng 3 năm 2014.

1211 [131] U. Eitner, "Nhiệt cơ học của các mô-đun quang điện," Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2011.

1212

1213 [132] C. Chen, F. Lin, H. Hu và F. Yeh, "Phân tích ứng suất dư và độ cong cho pin mặt trời silicon 1214 được tạo ra bởi quá trình hàn," *Sol. Cells*, số tháng 5, trang 1-3, 2008.

1215 [133] C.-M. Lai, K.-M. Lin, và C.-H. Su, "Ảnh hưởng của vết nứt đến ứng suất nhiệt do hàn 1216 trong các ô silicon đơn tinh thể gây ra," *Proc. Inst. Mech. Eng. Phần E J. Process Mech. Eng.*, 1217 tập 228, số 2, trang 127-135, 2014.

1218 [134] J. Al Ahmar và S. Wiese, "Mô hình phân tích vết nứt cho pin mặt trời dựa trên silicon," trong Hội nghị quốc tế lần thứ 5 về mô phỏng và thí nghiệm nhiệt, cơ học và đa vật lý trong vi điện tử và hệ thống vi mô 1219. Brussels, Bỉ, trang 1-5, 2004.

1221 [135] S. Wiese, F. Kraemer, E. Peter và J. Seib, "Các vấn đề cơ học của các mô-đun năng lượng mặt trời tiếp xúc ngược mới," trong 1222 Hội nghị quốc tế lần thứ 13 về mô phỏng và thí nghiệm nhiệt, cơ học và đa vật lý trong vi điện tử và hệ thống vi mô. Cascais, Bồ Đào Nha, trang 1-6, 2012.

1224 [136] W. Gambogi, S. Kurian, B. Hamzavy, J. Trout, O. Fu và Y. Chao, "Vai trò của tấm nền trong hiệu suất và độ bền của mô-đun quang điện 1225," Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 26. Hamburg, Đức, trang 3325-3328, 2011.

1227 [137] F. Haase et al., "Tác động của tấm nền lên bộ kết nối và sự phá vỡ ô trong tấm PV nhiều lớp dư ới tải cơ học 1228," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 29. 1229 Amsterdam, Hà Lan, trang 2477-2483, 2014.

1230 [138] F. Haase, J. Kosewiter, SR Nabavi, E. Jansen, R. Rolfes và M. Kontges, "Xác suất gãy, 1231 Mẫu vết nứt và Chiều rộng vết nứt của Pin mặt trời Silicon đa tinh thể trong Mô-đun PV trong quá trình Tải cơ học," *IEEE J. Photovoltaics*, trang 1-15, 2018.

1232

1233 [139] B. Masetty, N. Shiradkar và S. Patwardhan, "Nghiên cứu toàn diện về độ tin cậy của các mô-đun quang điện 1234 có nhiều cấu hình khác nhau trong điều kiện tải cơ học tĩnh và động bằng cách sử dụng phân tích phần tử hữu hạn," trong Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 35. 1235 1236 Brussels, Bỉ, trang 1247-1251, 2018.

1237 [140] AM Gabor, R. Janoch, A. Anselmo, JL Lincoln, H. Seigneur và C. Honeker, "Tải trọng cơ học

- 1238 "Kiểm tra tấm pin mặt trời - Ngoài thử nghiệm chứng nhận", tại Hội nghị chuyên gia quang điện lần thứ 44.
1239 Washington, DC, Hoa Kỳ, trang 1-6, 2017.
- 1240 [141] Y. Zhang et al., "Mô-đun kính đôi có độ tin cậy cao và độ bền lâu dài với các tế bào quang điện silicon tinh thể 1241 có chứng nhận an toàn cháy nổ loại A," trong Hội nghị và triển lãm năng lượng quang điện châu Âu lần thứ 28 1242. Paris, Pháp, trang 3123-3126, 2013.
- 1243 [142] A. Infuso, M. Corrado và M. Paggi, "Phân tích hình ảnh của các tế bào quang điện đa tinh thể và mô hình hóa 1244 vết nứt giữa các hạt và xuyên hạt," J. Eur. Ceram. Soc., tập 34, số 11, trang 2713-2722, 1245 2014.
- 1246 [143] S.-H. Schulze, M. Pander, S. Müller, C. Ehrich, và M. Ebert, "Ảnh hưởng của quy trình cán chân không 1247 lên tính chất của lớp cán - Kết quả mô phỏng và thử nghiệm," trong Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 24. Hamburg, Đức, trang 3367-3372, 2009.
- 1249 [144] R. Mickiewicz và cộng sự, "Ảnh hưởng của mô đun đóng gói đến phản ứng của các mô-đun PV đối với ứng suất cơ học," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 26. 1251 Hamburg, Đức, trang 3157-3161, 2011.
- 1252 [145] M. W Rowell, S. G Daroczi, D. WJ Harwood và A. Gabor, "Ảnh hưởng của kết cấu nhiều lớp 1253 và chu kỳ nhiệt độ đến độ bền nứt và hiệu suất của tế bào quang điện được bao bọc," 1254 trong Hội nghị thế giới lần thứ 7 về chuyển đổi năng lượng quang điện, 2018.
- 1255 [146] AJ Beinert, M. Ebert, U. Eitner và J. Aktaa, "Ảnh hưởng của Hệ thống lắp đặt mô-đun quang điện 1256 đến ứng suất nhiệt cơ học trong pin mặt trời bằng mô hình FEM," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 32, 2016, tr. 1833-1836.
1257
- 1258 [147] JH Wohlgemuth, DW Cunningham, NV Placer, GJ Kelly và AM Nguyen, "Ảnh hưởng của độ dày cell lên độ tin cậy của mô-đun," trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 33. San Diego, CA, Hoa Kỳ, trang 1-4, 2008.
1260
- 1261 [148] B. Terheiden et al., "Sản xuất pin mặt trời silicon dày 100 μm có hiệu suất lớn hơn
1262 20% trong dây chuyền sản xuất thử nghiệm," Phys. status solidi, tập 212, số 1, trang 13-24, năm 2015.
- 1263 [149] PA Wang, "Những thách thức trong công nghiệp đối với sản xuất tấm mỏng," trong Hội nghị thế giới lần thứ 4 về Năng lượng quang điện 1264 , tập 1. Waikoloa, HI, Hoa Kỳ, trang 1179-1182, 2007.
- 1265 [150] Z. Liu, S. Wieghold, LT Meyer, LK Cavill, T. Buonassisi và EM Sachs, "Thiết kế công cụ phát hiện vết nứt dư ới milimét cho tấm 1456, quang điện Si sử dụng chiếu sáng vùng lân cận và tán xạ ngược tối," IEEE J. Photovoltaics, tập 8, số 6, trang 1449-2018.
- 1268 [151] E. Kurtz, L. Karpowich, D. Moyer, P. Gundel, M. König, và W. Zhang, "Giảm chi phí sản xuất pin mặt trời 1269 thông qua bột nhão kim loại hóa mặt sau có hàm lượng bạc thấp," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 27. Frankfurt, Đức, trang 1806-1808, 2012.
- 1271 [152] H. Chen, C. Chen, M. Chang, CH Hsueh, E. Yen và KL Ho, "Ảnh hưởng của mô hình thanh cái tế bào đến độ tin 1272 cậy của mô-đun PV," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 29.
1273 Amsterdam, Hà Lan, trang 2562-2565, 2014.
- 1274 [153] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch và D. Habermann, "Thiết kế thanh cái đa năng: Tổng quan", Energy Procedia, tập. 43, trang 86-92, 2013.
- 1276 [154] J. Burschik et al., "Chuyển đổi sang thiết kế 4 và 5 BB cho pin mạ Ni/Cu/Ag," Energy Procedia, tập 98, trang 1277 66-73, 2016.
- 1278 [155] J. Walter, M. Tranitz, M. Volk, C. Ebert và U. Eitner, "Kết nối nhiều dây của thanh cái không có

- 1279 Pin mặt trời," Kỹ yếu năng lượng, tập 55, trang 380-388, 2014.
- 1280 [156] S. Braun, G. Micard và G. Hahn, "Cải tiến pin mặt trời bằng cách sử dụng thiết kế thanh cái đa năng làm 1281
"Điện cực phía trước," Energy Procedia, tập 27, trang 227-233, 2012.
- 1282 [157] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch và D. Habermann, "Pin mặt trời đa thanh cái và mô-đun 1283: Hiệu suất cao và mức tiêu
thụ bạc thấp," Energy Procedia, tập 38, trang 334-339, 2013.
- 1284
- 1285 [158] SK Chunduri, "Những lời bàn tán về thanh cái: Tăng số lượng thanh cái - và diện mạo của PV - là 1286 xu hướng mới nhất trong
thế giới CTS," trong PHOTON International, 2013, tr. 84-105.
- 1287 [159] Y. Xie et al., "Hiệu suất của các mô-đun PV thanh cái đa năng," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần
thứ 33. Amsterdam, Hà Lan, trang 1639-1642, 2017.
- 1289 [160] J. Walter, LC Rendler, C. Ebert, A. Kraft và U. Eitner, "Nghiên cứu độ ổn định mối hàn của kết nối dạng dây so với kết nối dạng ruy
băng," Energy Procedia, tập 124, trang 515-525, 1291 2017.
- 1292 [161] P. Papet et al., "Các mẫu kim loại hóa tế bào mới cho các tế bào năng lượng mặt trời dị hợp được kết nối bởi 1293
Công nghệ kết nối dây thông minh," Energy Procedia, tập 67, trang 203-209, 2015.
- 1294 [162] G. Schubert, G. Beaucarne và J. Hoorstra, "Tương lai của kim loại hóa - Dự báo của các chuyên gia 1295 của Hội thảo kim loại
hóa lần thứ 5," Energy Procedia, tập 67, trang 13-19, 2015.
- 1296 [163] T. Söderström, P. Papet và J. Ufheil, "Công nghệ kết nối dây thông minh", trong Hội nghị châu Âu lần thứ 28 1297
Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện. Paris, Pháp, trang 495-499, 2013.
- 1298 [164] A. Faes et al., "Công nghệ kết nối tế bào năng lượng mặt trời SmartWire," trong Hội nghị quang điện châu Âu lần thứ 29 1299
Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời. Amsterdam, Hà Lan, trang 2555-2561, 2014.
- 1300 [165] A. Gabor et al., "Chiến lược ứng suất nén để giảm tỷ lệ suy thoái liên quan đến ô nứt trong các tấm pin mặt trời mới và phục hồi điện
năng trong các tấm pin mặt trời bị hỏng," trong Hội nghị thế giới lần thứ 7 1301 1302 về chuyển đổi năng lượng quang điện.
Waikoloa, HI, Hoa Kỳ, 2018.
- 1303 [166] E. Schneller và cộng sự, "Đánh giá sự gãy vỡ của tế bào quang điện như một chức năng của các điều kiện tải cơ học của mô-đun,"
1304 trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 44. Washington, DC, Hoa Kỳ, 2017.
- 1305 [167] H. Nussbaumer, M. Klenk và N. Keller, "Mô-đun hợp chất đơn vị nhỏ: Một cách tiếp cận mới cho mô-đun PV nhẹ 1306," trong Hội nghị và
Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 32. Munich, Đức, trang 56-60, 2016.
- 1307
- 1308 [168] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander và M. Ebert, "Nghiên cứu cơ học về bố cục kim loại hóa của pin mặt trời liên quan đến độ tin
cậy của mô-đun", Energy Procedia, tập 38, trang 488-497, 1310 2013.
- 1311 [169] S. Wiese, F. Kraemer, N. Betzl và D. Wald, "Công nghệ kết nối cho các mô-đun quang điện - phân tích các vấn đề về công nghệ
1312 và cơ học," trong Hội nghị quốc tế lần thứ 11 về mô phỏng nhiệt, cơ học và đa vật lý, và các thí nghiệm về vi điện tử
1313 và hệ thống vi mô.
1314 Bordeaux, Pháp, trang 1-6, 2010.
- 1315 [170] GH Sun, SL Yan và G. Chen, "Mô hình phân tích ứng suất nhiệt cho quá trình đóng gói và dịch vụ của mô-đun pin mặt trời," Adv.
Mater. Res., tập 97-101, trang 2699-2702, 2010.
- 1317 [171] S. Dietrich, M. Pander, M. Sander, U. Zeller và M. Ebert, "Phân tích ứng suất của các tế bào quang điện được bao bọc bằng cách
V, chống ứng suất nhiệt và cơ học," trong SPIE - Độ tin cậy của 1318 1319 Tế bào quang điện, Mô-đun, Linh kiện và Hệ thống
tập 8825. San Diego, CA, Hoa Kỳ, trang.

- 1320 882505, 2013.
- 1321 [172] L. Yixian và AAO Tay, "Phân tích ứng suất nhiệt phần tử hữu hạn của mô-đun quang điện mặt trời,"
1322 trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 37. Seattle, WA, Hoa Kỳ, trang 003179-003184, 2011.
- 1323 [173] T. van Amstel, VA Popovich, và IJ Bennett, "Mô hình đa tỷ lệ của lớp nhôm ở 1324 mặt sau của pin mặt trời," trong Hội nghị và Triển lãm
năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 24. Hamburg, Đức, 2009.
- 1325
- 1326 [174] J. Dong, H. Yang, X. Lu, H. Zhang và J. Peng, "Nghiên cứu so sánh về phân tích tĩnh và động của mô-đun PV kính đôi siêu mỏng dựa
trên FEM," Energy Procedia, tập 75, trang 343-348, 2015.
- 1328
- 1329 [175] Thứ một. và K. "Phân tích ảnh hưởng của tải trọng động bên
1330 ngoài đến hiệu suất kết cấu của mô-đun quang điện," Eng. Fail. Anal., tập 66, số Phụ lục C, trang 445-
1331 454, 2016.
- 1332 [176] M. Paggi và J. Reinoso, "Xem xét lại vấn đề vết nứt tác động lên giao diện: Một khuôn khổ mô hình hóa cho tương tác giữa phương pháp
truyền pha đối với gãy giòn và mô hình vùng kết dính giao diện," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., tập 321, trang 145-172, 2017.
- 1335 [177] M. Paggi, M. Corrado và MA Rodriguez, "Một phương pháp tiếp cận số đa vật lý và đa thang đo 1336 đối với hiện tượng nứt vi mô
và mất điện trong các mô-đun quang điện," Compos. Struct., tập 95, trang 630-638, 1337 2013.
- 1338 [178] M. Paggi, M. Corrado và I. Berardone, "Một cách tiếp cận toàn cầu/cục bộ để dự đoán phản ứng điện của các tế bào quang điện bị nứt
trong các mô-đun quang điện dưới tác động của tải trọng cơ học," Eng. 1339 1340 Fract. Mech., tập 168, trang 40-57, 2016.
- 1341 [179] A. Sapora và M. Paggi, "Mô hình vùng kết dính liên hợp để phân tích tạm thời sự tách rời giao diện
1342 nhiệt đàn hồi," Comput. Mech., tập 53, số 4, trang 845-857, 2014.
- 1343 [180] I. Berardone, M. Corrado và M. Paggi, "Mô hình điện tổng quát cho Silicon đơn tinh thể và đa tinh thể khi có vết nứt và khuyết tật ngẫu
nhiên," Energy Procedia, tập 55, trang 22-29, 2014.
- 1345
- 1346 [181] O. Breitenstein và S. Rißland, "Mô hình hai diode liên quan đến điện trở nối tiếp phân tán," Sol. 1347 Energy Mater. Sol. Cells,
tập 110, trang 77-86, 2013.
- 1348 [182] C. Buerhop và cộng sự, "Sự tiến hóa của các vết nứt ô trong các mô-đun PV trong điều kiện thực tế và phòng thí nghiệm," 1349
Prog. Photovoltaics Res. Appl., tập 26, số 4, trang 261-272, 2018.
- 1350 [183] J. H Wohlgemuth, D. W Cunningham, D. Amin, J. Shaner, Z. Xia và J. Miller, "Sử dụng các bài kiểm tra tăng tốc 1351 và dữ liệu thực địa
để dự đoán độ tin cậy và tuổi thọ của mô-đun," trong Hội nghị và triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 23. Valencia, Tây Ban
Nha, trang 2663-2669, 2008.
- 1353 [184] A. Bouraiou et al., "Nghiên cứu thực nghiệm về các khuyết tật quan sát được trong các mô-đun PV 1354 silicon tinh thể trong điều kiện
khí hậu khô nóng ngoài trời ở Algeria," Sol. Energy, tập 159, trang 475-487, 1355 2018.
- 1356 [185] SS Chandel, M. Nagaraju Naik, V. Sharma và R. Chandel, "Phân tích sự suy thoái của 28 mô-đun quang điện đơn-c-Si tiếp xúc thực địa năm 1357 của hệ
thống bơm nước năng lượng mặt trời kết nối trực tiếp tại khu vực phía tây dãy Himalaya của Ấn Độ," Renew. Energy, tập 78, trang 193-202, 2015.
- 1359 [186] V. Sharma và SS Chandel, "Một nghiên cứu mới để xác định sự suy thoái trong giai đoạn đầu của các mô-đun quang điện silicon tinh thể đa 1360 được
quan sát thấy ở vùng khí hậu Ấn Độ Himalaya phía tây

- 1361 điều kiện," Sol. Energy, tập 134, trang 32-44, 2016.
- 1362 [187] A. Dolara, S. Leva, G. Manzolini và E. Ogliari, "Nghiên cứu về sự suy giảm hiệu suất trên các mô-đun quang điện: Đuờng mòn ốc sên và vết nứt nhỏ của tế bào," IEEE J. Photovoltaics, tập 4, số 5, trang 1363-1364, 1204-1211, 2014.
- 1365 [188] I. Paul, B. Majeed, K. Razeed và J. Barton, "Mô hình gãy thống kê của silicon với 1366 thay đổi độ dày," Acta Mater., tập 54, số 15, trang 3991-4000, 2006.
- 1367 [189] O. Borrero-López, T. Vodenitcharova, M. Hoffman và AJ Leo, "Độ bền gãy của tấm wafer silicon đa tinh thể 1368 cho ngành công nghiệp Quang điện," J. Am. Ceram. Soc., tập 92, số 11, trang 2713-2717, 2009.
- 1369
- 1370 [190] S. Schoenfelder, M. Ebert, C. Landesberger, K. Bock, và J. Bagdahn, "Điều tra về ảnh hưởng của các kỹ thuật cắt hạt lựu lên các đặc tính cơ học của silicon mỏng," Microelectron. Reliab., 1372 tập 47, số 2-3, trang 168-178, 2007.
- 1373 [191] M. Trautmann, M. Hemsendorf, C. Berge, C. Probst và E. Rueland, "Phát hiện vết nứt nhỏ không tiếp xúc 1374 từ wafer cắt sẵn đến pin mặt trời hoàn thiện," trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 38. 1375 Austin, TX, Hoa Kỳ, trang 000485-000488, 2012.
- 1376 [192] H. Behnken, M. Apel và D. Franke, "Mô phỏng ứng suất cơ học trong quá trình thử nghiệm uốn cho các tấm tinh thể 1377," trong Hội nghị thế giới lần thứ 3 về chuyển đổi năng lượng quang điện, tập 2. Osaka, 1378 Nhật Bản, trang 1308-1311, 2003.
- 1379 [193] J. Barredo, V. Parra, I. Guerrero, A. Fraile, và L. Hermanns, "Về độ bền cơ học của các tấm bán dẫn silicon đơn tinh thể, đa tinh thể 1204- và bán đơn tinh thể: Nghiên cứu thử nghiệm uốn bốn đờng 1380 1381," Prog. Photovoltaics Res. Appl., tập 22, số 12, trang 1212, 2014.
- 1382 [194] S. Schoenfelder, A. Bohne và BJ, "So sánh các phương pháp thử nghiệm để xác định đặc tính cơ học của các tấm wafer mỏng năng lượng 1640, mặt trời," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 22. Milan, 1383 1384 Ý, trang 1636-2007.
- 1385 [195] T. Hauck, C. Bohm, và WH Müller, "Thống kê Weibull cho phân phối nhiều lỗi và ứng dụng của nó trong dự đoán gãy silicon," trong Hội nghị quốc tế lần thứ 6 về mô phỏng và thí nghiệm nhiệt, cơ học và đa vật lý trong vi điện tử và vi hệ thống, tập. 2005. 1388 Berlin, Đức, trang 242-247, 2005.
- 1389 [196] C. Bohm, T. Hauck, WH Muller và A. Juritza, "Xác suất gãy silicon trong các gói đúc 1390 [IC]," trong Hội nghị quốc tế lần thứ 5 về mô phỏng nhiệt và cơ học và 1391 Thí nghiệm về vi điện tử và hệ thống vi mô. Brussels, Bỉ, trang 75-81, 2004.
- 1392 [197] C. Bohm, T. Hauck, A. Juritza và W. Mueller, "Thống kê Weibull về gãy khuôn silicon," Pm&r. 1393 trang 782-786, 2005.
- 1394 [198] VA Popovich, M. Janssen, IM Richardson, T. van Amstel, và IJ Bennett, "Cấu trúc vi mô 1395 và tính chất cơ học của lớp tiếp xúc mặt sau bằng nhôm," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 95, 1396 số 1, trang 93-96, 2011.
- 1397 [199] VA Popovich, A. Yunus, M. Janssen, IJ Bennett và IM Richardson, "Ảnh hưởng của cấu trúc vi mô 1398 và các thông số xử lý đến độ bền cơ học của pin mặt trời silicon đa tinh thể," Sol. 1399 Energy Mater. Sol. Cells, tập 95, số 1, trang 2222-2226, 2010.
- 1400 [200] JG Coletti, CJJ Tool và L. Geerligs, "Định lượng thiệt hại bề mặt bằng cách đo cơ học của các tấm bán dẫn silicon," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 20, 1402 2005.

- 1403 [201] K. Wasmer et al., "Ảnh hưởng của các khuyết tật cạnh do cấu trúc nhiều dây gây ra đối với độ bền của tấm wafer," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 23. Valencia, Tây Ban Nha, trang 1305-1405 1310, 2008.
- 1406 [202] PFA Schneider, E. Rueland, A. Kraenzl, "Đặc điểm cơ học và điện của các tế bào quang điện silicon đa tinh thể mỏng 1407," trong Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 19. Paris, 1408 Pháp, trang 496-499, 2004.
- 1409 [203] C. Klute, F. Kaule và S. Schoenfelder, "Phân tích nguyên nhân gốc rễ gây vỡ trong các tấm silicon đơn tinh thể 1410 đã cắt," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 29. 1411 Amsterdam, Hà Lan, trang 753-756, 2014.
- 1412 [204] VA Popovich, A. Yunus, M. Janssen, IM Richardson và IJ Bennett, "Ảnh hưởng của các thông số xử lý pin mặt trời silicon 1413 và độ kết tinh lên độ bền cơ học," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 1414 tập 95, số 1, trang 97-100, 2011.
- 1415 [205] VA Popovich, M. Janssen, IJ Bennett và IM Richardson, "Các vấn đề về sự cố trong pin mặt trời silicon 1416 tấm wafer và tế bào quang điện", Photovoltaics Int., tập 12, trang 49-57, 2011.
- 1417 [206] VA Popovich, W. Geerstma, M. Janssen, IJ Bennett và IM Richardson, "Độ bền cơ học 1418 của tấm wafer năng lượng mặt trời silicon được đặc trưng bởi thử nghiệm vòng trên vòng kết hợp với tư vấn quan hình ảnh kỹ thuật số 1419," Đại hội EPD 2015. Cham, trang 241-248, 2015.
- 1420 [207] F. Kaule, W. Wang và S. Schoenfelder, "Mô hình hóa và thử nghiệm độ bền cơ học của năng lượng mặt trời 1421 tế bào," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 120, số Phần A, trang 441-447, 2014.
- 1422 [208] V. Popovich, A. Yunus, M. Janssen, I. Bennett và I. Richardson, "Độ bền cơ học của 1423 tế bào quang điện silicon đa tinh thể và các yếu tố ảnh hưởng," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 25, 2010, trang 2631-2636.
- 1425 [209] C. Kohn et al., "Ảnh hưởng của quá trình kim loại hóa đến độ bền của pin mặt trời silicon," trong Hội nghị năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 24 năm 1426. Hamburg, Đức, trang 1419-1423, 2009.
- 1427 [210] M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert và J. Bagdahn, "Nghiên cứu có hệ thống về các vết nứt trong các tế bào quang điện được bao bọc sau khi chịu tải cơ học," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 111, số 1428 1429 Phụ lục C, trang 82-89, 2013.
- 1430 [211] IEC 61646. Mô-đun quang điện mặt đất (PV) màng mỏng e thiết kế đủ điều kiện và loại 1431 phê duyệt. Ủy ban Kỹ thuật Điện quốc tế (IEC), 2008.
- 1432 [212] G. Mülhölfer, H. Berg, C. Ferrara, W. Grzesik và D. Philipp, "Ảnh hưởng của tải cơ học ở nhiệt độ thấp 1433 đến khuyết tật của cell và sự suy giảm công suất ở các mô-đun PV quy mô đầy đủ," trong Hội nghị và Triển lãm năng lượng mặt trời quang điện châu Âu lần thứ 28 1434. Paris, Pháp, trang 2968-2971, 1435 2013.
- 1436 [213] C. Borri, M. Gagliardi và M. Paggi, "Sự phát triển vết nứt do mỏi trong các tế bào quang điện Silicon và hành vi trễ của thanh cái," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, tập 181, trang 21-29, 2018.
- 1438 [214] V. Novitzky, V. Vishnyakov, A. 1439 1440 J. Novickij, A. Grainys và P. Zapolskis, "Nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng cơ học động lên cấu trúc tinh thể của tế bào quang điện," trong hội nghị đo lường quốc tế lần thứ 9. Smolenice, Slovakia, trang 179-182, 2013.
- 1441 [215] S. Koch, J. Kupke, D. Tornow, M. Schoppa, S. Krauter và P. Grunow, "Các thử nghiệm tải cơ học động trên các mô-đun silicon 1442 tinh thể," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 25 / Hội nghị Thế giới lần thứ 5 về Chuyển đổi Năng lượng Quang điện. Valencia, Tây Ban Nha, trang 3998-1443 1444 4001, 2010.

1445 [216] M. Chang, CH Hsueh, H. Chen và C. Chen, "Đánh giá ảnh hưởng của bão đến độ tin cậy của mô-đun PV 1446," Hội nghị và Triển lãm Năng
lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 32. Munich, 1447 Đức, tr. 2248-2251, 2016.

1448 [217] NC Dong, MA Islam, Y. Ishikawa và Y. Uraoka, "Ảnh hưởng của các ion natri trang trí 1449 vết nứt nhỏ trên sự tiến triển của sự suy
thoái tiềm ẩn trong các tế bào quang điện silicon tinh thể loại p," Sol. Energy, tập 174, trang 1-6, 2018.

1450

1451 [218] O. Breitenstein, JP Rakotoniaina, MH Al Rifai và M. Werner, "Các loại phân luồng trong tinh thể
1452 pin mặt trời silicon," Prog. Photovoltaics Res. Appl., tập 12, số 7, trang 529-538, 2004.

1453 [219] O. Breitenstein, J. Bauer, PP Altermatt và K. Ramspeck, "Ảnh hưởng của các khuyết tật đến đặc điểm của pin mặt trời", Solid State
Phenom., tập 156-158, trang 1-10, 2009.

1455 [220] J. Käsewiter, F. Haase, MH Larrodé và M. Köntges, "Các vết nứt trong quá trình kim loại hóa tế bào quang điện 1456 dẫn đến mất
điện mô-đun dư ới tải cơ học", Energy Procedia, tập 55, trang 469-477, 1457 2014.

1458 [221] M. Demant, T. Welschehold, S. Kluska và S. Rein, "Các vết nứt nhỏ trong tấm wafer silicon II: 1459 Ý nghĩa đối với đặc điểm, số liệu
thống kê và nguồn gốc vật lý của tế bào quang điện", IEEE J. Photovoltaics, 1460 tập 6, số 1, trang 136-144, 2016.

1461 [222] P. Hacke và cộng sự, "Kiểm tra đến khi hỏng các mô-đun silicon tinh thể," trong IEEE Photovoltaic lần thứ 35
1462 Hội nghị chuyên gia. Honolulu, HI, Hoa Kỳ, trang 244-250, 2010.

1463 [223] AF Dethlefsen, "Mô-đun pin mặt trời silicon đa tinh thể: sự hình thành và phát triển vết nứt do thử nghiệm chu kỳ nhiệt của buồng
1464 khí hậu," trong Hội thảo về độ tin cậy của mô-đun quang điện, 2011.

1465 [224] O. Gonzalez, B. Diaz-Herrera, B. Gonzalez-Diaz, S. Gonzalez-Perez, L. Votta và R. Guerrero-1466 Lemus, "Phân tích pháp y về vết nứt vi
mô của mô-đun PV dựa trên Si do các quy trình thử nghiệm cơ học và nhiệt IEC tiêu chuẩn," trong Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 43.
Portland, OR, 1467 1468 Hoa Kỳ, trang 3041-3045, 2016.

1469 [225] D. Philipp, "Độ tin cậy và thử nghiệm chất lượng của mô-đun PV," Ngày của các nhà đầu tư PV, trang 1-22, 2015.

1470 [226] J. Lincoln và cộng sự, "Dự báo suy thoái môi trường mất điện trong tấm pin mặt trời với 1471
"Thử nghiệm dự đoán vết nứt mở", tại Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 44, 2017.

1472 [227] P. Grunow, P. Clemens, V. Hoffmann, B. Litzenburger và L. Podlowski, "Ảnh hưởng của các vết nứt nhỏ trong pin mặt trời silicon đa tinh
thể đến độ tin cậy của các mô-đun PV," trong Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 20.
Barcelona, Tây Ban Nha, trang 2380-2383, 2005.

1475 [228] J. Wendt, M. Träger, M. Mette, A. Pfennig và B. Jaekel, "Mối liên hệ giữa ứng suất cơ học 1476 gây ra bởi hàn và hư hỏng vi mô
trong pin mặt trời silicon," trong Hội nghị Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 24. Hamburg, Đức, trang 3420-3423, 2009.

1478 [229] C. Camus, A. Adegbenro, J. Ermer, V. Suryaprakash, J. Hauch và CJ Brabec, "Ảnh hưởng của các hư hỏng hiện có trước năm 1479 đến hành
vi suy thoái của các mô-đun quang điện silicon tinh thể," J. 1480 Renew. Sustain. Energy, tập 10, số 2, trang 1-16, 2018.

1481

Điểm nổi bật:

- Nguồn gốc của các vết nứt và các yếu tố ảnh hưởng đến chúng được giải thích chi tiết.
- Phân loại các vết nứt dựa trên các đặc điểm của chúng được trình bày.
- Tổng quan về các nghiên cứu thực nghiệm và số về các vết nứt của ô được tiến hành.
- Tác động của các vết nứt đến các đặc tính điện của các mô-đun PV vẫn còn gây tranh cãi.
- Việc dự đoán và định lượng tác động lâu dài của chúng vẫn chưa được biết.

Journal Pre-proof