



Trích dẫn này: Energy Environ.
Sci., 2017, 10, 43

Sự suy thoái do tiềm năng gây ra trong các mô-đun quang điện: một đánh giá quan trọng

Wei Luo, Yong Sheng Khoo, Peter Hacke, Volker Naumann, Dominik Lausch, Steven P. Harvey, Jai Prakash Singh, Jing Chai, Yan Wang, Armin G. Aberle và Seeram Ramakrishnaab

Sự suy thoái do tiềm năng (PID) đã nhận được sự quan tâm đáng kể trong những năm gần đây do tác động bất lợi của nó đến hiệu suất của mô-đun quang điện (PV) trong điều kiện thực tế. Cả mô-đun PV silicon tinh thể (c-Si) và màng mỏng đều dễ bị PID. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu sâu rộng được tiến hành trong lĩnh vực này, nhưng hiểu biết về hiện tượng PID vẫn chưa đầy đủ và nó vẫn là một vấn đề lớn trong ngành PV. Ở đây, một đánh giá quan trọng về các tài liệu có sẵn được đưa ra để phục vụ như một nguồn duy nhất để hiểu tình trạng hiện tại của nghiên cứu PID. Bài báo này cũng nhằm mục đích cung cấp tổng quan về các con đường nghiên cứu trong tương lai để giải quyết các vấn đề liên quan đến PID. Bài báo này bao gồm ba phần. Trong phần đầu tiên, mô hình hóa các đường dẫn dòng rò rỉ trong gói mô-đun được thảo luận. Các cơ chế PID trong cả mô-đun PV c-Si và màng mỏng cũng được xem xét toàn diện. Phần thứ hai tóm tắt các phương pháp thử nghiệm khác nhau để đánh giá các mô-đun PV cho PID. Phần cuối cùng tập trung vào các nghiên cứu liên quan đến PID trong các mô-đun PV c-Si loại p phổ biến. Sự phụ thuộc của nhiệt độ, độ ẩm và điện áp vào sự tiến triển của PID được xem xét. Các biện pháp phòng ngừa PID ở cấp độ cell, module và hệ thống được minh họa. Hơn nữa, quá trình phục hồi PID trong các module PV c-Si loại p tiêu chuẩn cũng được nghiên cứu. Hầu hết các phát hiện từ các module PV c-Si loại p cũng có thể áp dụng cho các công nghệ module PV khác.

Nhận ngày 5 tháng 8 năm 2016,
Đã chấp nhận ngày 21 tháng 11 năm 2016

DOI: 10.1039/c6ee02271e

www.rsc.org/ees

Bối cảnh rộng hơn Do lo

ngại về biến đổi khí hậu và nhu cầu năng lượng ngày càng tăng, năng lượng tái tạo đã nhận được sự quan tâm ngày càng tăng trong những năm gần đây. Trong số các nguồn năng lượng tái tạo khác nhau, phát điện quang điện (PV) đã nổi lên như một thành phần quan trọng trong hỗn hợp điện hiện nay ở nhiều quốc gia. Độ tin cậy của các công nghệ PV là điều cần thiết cho sự phát triển liên tục của PV và triển khai PV trong tương lai. Trong những năm gần đây, suy thoái do điện thế (PID), có khả năng dẫn đến hỏng hóc thảm khốc của các mô-đun PV trên cánh đồng, đã trở thành một vấn đề lớn đối với ngành công nghiệp PV. Nghiên cứu liên quan đến PID đã thu hút được sự quan tâm rất lớn. Tuy nhiên, các công nghệ PV hoàn toàn không có PID vẫn chưa được phát triển. Bài viết này cung cấp một bức tranh đầy đủ về tình hình nghiên cứu hiện tại và chủ đề này. Chúng tôi sắp xếp một cách có hệ thống các kiến thức trước đây trên các tài liệu đã báo cáo theo cách dễ tiếp cận, do đó tạo điều kiện cho các phát triển mới trong nghiên cứu liên quan đến PID.

1. Giới thiệu

Được công nhận là công nghệ có tính cạnh tranh về chi phí và bền vững, quang điện (PV) cung cấp nguồn năng lượng sạch góp phần giảm thiểu các vấn đề về môi trường toàn cầu, đặc biệt là phát thải CO₂. PV đã phát triển nhanh chóng trong thập kỷ qua;

ghi nhận công suất lắp đặt toàn cầu trên 50 GW vào năm 2015, đạt tổng công suất lắp đặt ít nhất là 228 GW vào cuối năm 2015 và mở rộng hơn 5 lần kể từ năm 2010.^{1,2} Người ta cũng dự đoán rằng, đến năm 2050, năng lượng mặt trời PV sẽ đạt tổng công suất khoảng 4,7 TW và chiếm 16% trong cơ cấu điện toàn cầu.³ Sự phát triển liên tục từ cả các nhà nghiên cứu học thuật và công nghiệp nhằm cải thiện hiệu quả PV và giảm chi phí sản xuất đã đóng góp đáng kể vào thành công của PV. Sau sự phát triển nhanh chóng của ngành công nghiệp PV, độ tin cậy của các công nghệ PV gần đây đã thu hút được sự chú ý đáng kể từ các nhà nghiên cứu, nhà sản xuất, chủ ngân hàng và nhà đầu tư. Mặc dù từ lâu đã được coi là rất đáng tin cậy trong điều kiện thực tế với tỷ lệ suy thoái và hỏng hóc thấp, 4–7% nhưng các công nghệ PV vẫn dễ bị một số

^a Viện nghiên cứu năng lượng mặt trời Singapore (SERIS), Đại học quốc gia Singapore, Singapore 117574. E-mail: yongshengkho@nus.edu.sg

^b Khoa Kỹ thuật cơ khí, Đại học Quốc gia Singapore, Singapore 11757

^c Phòng thí nghiệm năng lượng tái tạo quốc gia (NREL), Golden, CO 80401, Hoa Kỳ

^d Trung tâm Fraunhofer về quang điện silicon CSP, 06120 Halle (Saale), Đức Khoa Kỹ thuật Điện và Máy tính, Đại học Quốc gia Singapore, Singapore 117583

Ôn tập

Khoa học năng lượng và môi trường

cơ chế hỏng hóc như ăn mòn và tách lớp.8-11 Trong số các vấn đề về độ tin cậy rõ ràng này, sự xuống cấp do điện thế (PID) trong các mô-đun PV đã trở nên quan trọng trong những năm gần đây,12-15 vì nó có khả năng dẫn đến hỏng hóc thảm khốc của các mô-đun PV trong điều kiện ngoài trời.16,17

Trong các hệ thống PV kết nối lưới, các tấm pin mặt trời thường được kết nối nối tiếp để tạo ra điện áp đầu ra trong khi các khung mô-đun được nối đất vì lý do an toàn. Tùy thuộc vào loại biến tần được sử dụng trong hệ thống PV, có thể tạo ra chênh lệch điện thế cao giữa các tế bào quang điện và khung mô-đun trong các mô-đun ở cả hai đầu của chuỗi mô-đun (Hình 1).

Sự chênh lệch điện thế khiến dòng điện rò rỉ chảy từ khung mô-đun đến các tế bào năng lượng mặt trời (hoặc ngược lại, tùy thuộc vào vị trí mô-đun trong chuỗi mô-đun), dẫn đến

trong PID. Vấn đề này sẽ nghiêm trọng hơn trong tương lai, vì ngành công nghiệp PV đang có xu hướng tăng điện áp hệ thống tối đa lên 1500 V để giảm chi phí tổng thể.18

Có vẻ như PID lần đầu tiên được Phòng thí nghiệm Động cơ Phản lực (JPL) báo cáo vào năm 1985 đối với cả mô-đun silicon tinh thể (c-Si) và mô-đun màng mỏng silicon vô định hình (a-Si).19,20 Vào đầu những năm 2000, Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Năng lượng Quốc gia (NREL), Trung tâm Năng lượng Mặt trời Florida (FSEC) và BP solar cũng đã nghiên cứu các rủi ro tiềm ẩn của ứng suất điện áp hệ thống cao trên nhiều loại mô-đun PV khác nhau.21-26 Sau đó, người ta đã quan sát thấy nó trong các mô-đun PV c-Si loại n nối sau của SunPower tại một mảng thử nghiệm ngoài trời ở Đức (năm 2005)27 và trong các mô-đun tiêu chuẩn của Evergreen với các tấm silicon đúc dạng dải (năm 2008).28,29 Gần đây hơn, PID đã nhận được sự chú ý đáng kể. Từ năm 2010, nghiên cứu PV



Vệ La

Wei Luo lấy bằng cử nhân ngành kỹ thuật cơ khí tại Đại học Quốc gia Singapore, Singapore vào năm 2015.

Hiện tại, anh đang theo học chương trình Tiến sĩ tại Viện Nghiên cứu Năng lượng Mặt trời Singapore, Đại học Quốc gia Singapore, Singapore. Các mối quan tâm nghiên cứu hiện tại của anh bao gồm đặc tính và độ tin cậy của các mô-đun quang điện. Trọng tâm cụ thể của công trình của anh là nghiên cứu về sự suy thoái do điện thế gây ra trong các mô-đun quang điện.



Vinh Sheng Khoo

Tiến sĩ Yong Sheng Khoo là trưởng nhóm Phát triển mô-đun PV tại Viện Nghiên cứu Năng lượng Mặt trời Singapore (SERIS).

Làm việc trong lĩnh vực PV từ năm 2010, công trình nghiên cứu của ông bao gồm các lĩnh vực quan trọng của PV như nghiên cứu hiệu suất ngoài trời của các công nghệ mô-đun khác nhau, mô hình hóa hướng mô-đun PV tối ưu và góc nghiêng để tối đa hóa khả năng thu thập năng lượng, phát triển các kỹ thuật đặc trưng quang học mới cho mô-đun PV và tối ưu hóa hiệu suất của mô-đun PV trong điều kiện nhiệt

đới. Công việc hiện tại của ông tập trung vào nghiên cứu về suy thoái điện thế mô-đun (PID), đặc tính mô-đun tiên tiến và quy trình thiết kế và chế tạo mô-đun mới.



Peter Hacke

Tiến sĩ Peter Hacke đã nhận bằng Tiến sĩ từ Đại học North Carolina State và là nhà khoa học cao cấp tại Phòng thí nghiệm Năng lượng tái tạo quốc gia, Colorado, Hoa Kỳ. Ông thực hiện nghiên cứu và tư vấn về thử nghiệm độ bền, xác nhận và phân tích lỗi của các mô-đun PV, kiểm tra nguyên nhân gốc rễ của lỗi mô-đun tại hiện trường và thử nghiệm tuổi thọ tăng tốc, bao gồm suy thoái do điện thế, mất điện, ăn mòn, điốt bỏ qua, thiết bị điện tử mô-đun và tách lớp. Các mối quan tâm nghiên cứu của ông bao gồm mô hình hóa các quá trình suy thoái của các mô-đun

PV và phát triển các phương pháp mới để phân tích dữ liệu suy thoái PV.

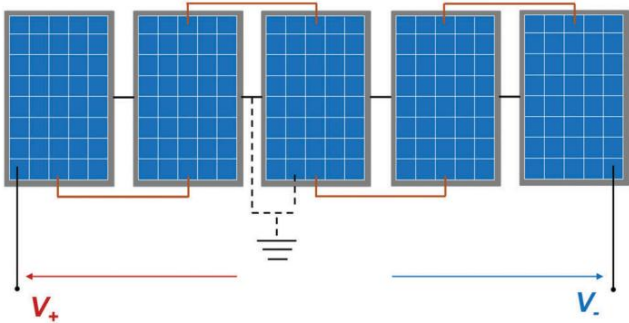


Volker Naumann

Tiến sĩ Volker Naumann đã đạt được bằng vật lý năm 2009 về Tính chất điện và cấu trúc vi mô của các tiếp điểm cục bộ trên pin mặt trời silicon. Từ năm 2010, anh ấy

đã làm việc tại Trung tâm Fraunhofer về quang điện silicon CSP, Halle (Đức), nghiên cứu về đặc tính điện và phân tích bề mặt của vật liệu quang điện. Năm 2014, ông đã hoàn thành bằng Tiến sĩ tại Đại học Martin-Luther Halle-Wittenberg. Lĩnh vực làm việc của ông bao gồm đặc tính điện, chẩn đoán cấu trúc vi mô và phân tích nguyên tố tại silicon và màng mỏng cho các ứng dụng

quang điện. Trọng tâm cụ thể của công trình của ông là đánh giá và hiểu biết vật lý về sự suy thoái do điện thế gây ra của các tế bào quang điện silicon.



Hình 1 Sơ đồ đơn giản của hệ thống PV có điện thế nối. Các mô-đun được kết nối nối tiếp, được biểu diễn bằng các đường màu cam liền, trong khi các khung được nối đất. Chỉ có năm mô-đun được hiển thị ở đây, nhưng nhiều mô-đun hơn được kết nối theo chuỗi nối tiếp tại hiện trường. Hiệu điện thế giữa khung cell và mô-đun ở giữa là 0 và tăng dần về cả hai đầu của chuỗi. Hiệu điện thế tối đa có thể vượt quá hàng trăm volt trong trường.

các viện nghiên cứu trên toàn thế giới đã tiến hành một lượng lớn nghiên cứu về PID của các mô-đun PV c-Si loại p thông thường,12-15,30-36 trong đó thuật ngữ 'PID' được Pingel và cộng sự đặt ra vào năm 2010.13 Các loại mô-đun màng mỏng khác nhau cũng đã được thử nghiệm độ tin cậy dưới ứng suất điện áp cao trong một số lượng lớn các nghiên cứu.37-41 Hơn nữa, trong giai đoạn 2009-2012, Viện nghiên cứu năng lượng mặt trời Singapore (SERIS) đã tiến hành các nghiên cứu độ tin cậy trên mười loại mô-đun PV thương mại khác nhau (cả mô-đun PV màng mỏng và mô-đun PV c-Si) và làm sáng tỏ độ nhạy PID tương đối của các công nghệ hấp thụ thương mại khác nhau.39,40

Mặc dù đã có những tiến bộ đáng kể trong việc hiểu PID trong các mô-đun PV, vẫn còn nhiều câu hỏi chưa được giải đáp. Sự phức tạp của PID cũng đặt ra một thách thức nghiêm trọng cho các nhà nghiên cứu để giải quyết chúng. Các hiệu ứng PID bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như đặc tính của lớp phủ chống phản xạ (AR) của tế bào quang điện,12,13 vật liệu đóng gói,42 cấu trúc mô-đun (ví dụ như khung hoặc không khung)31,40 và cấu trúc hệ thống.12,13 Ngay cả đối với cùng một loại mô-đun,

mức độ suy giảm công suất khác nhau có thể được gây ra, tùy thuộc vào ứng suất môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, ngưng tụ, v.v.),31,32,43 điều kiện nối đất của bề mặt kính (ướt hoặc khô),32,44 và tiếp xúc với ánh sáng.45,46 Hơn nữa, việc lắng đọng đất trên đỉnh bề mặt mô-đun trong môi trường tự nhiên cũng ảnh hưởng đến khả năng nhạy cảm với PID của mô-đun.47 Tính phức tạp của PID, cũng như sự hiểu biết chưa đầy đủ về PID, đã cản trở tiến trình khoa học hướng tới phát triển các công nghệ PV hoàn toàn không có PID. Do đó, sẽ rất có lợi khi có một cái nhìn tổng quan toàn diện về những gì đã được thực hiện trong quá khứ và những gì cần đạt được trong tương lai để giải quyết PID.

Trong bài báo này, một đánh giá quan trọng về tài liệu PID trong các mô-đun PV được trình bày để minh họa tình trạng nghiên cứu hiện tại và các con đường nghiên cứu tiềm năng để giải quyết các vấn đề liên quan đến PID. Bài báo này có mục đích sắp xếp một cách có hệ thống các kiến thức trước đây trên các tài liệu đã báo cáo theo cách dễ tiếp cận, do đó tạo điều kiện cho các phát triển mới trong nghiên cứu liên quan đến PID.

2. Mô hình hóa các đường dẫn dòng rò rỉ trong các mô-đun PV

Trong một hệ thống PV thông thường, thường có sự chênh lệch điện thế cao giữa mạch hoạt động và khung mô-đun ở cả hai đầu của chuỗi mô-đun (Hình 1). Điều này sẽ gây ra dòng điện rò rỉ chạy qua gói mô-đun có khả năng dẫn đến mất hiệu suất mô-đun PV đáng kể. Trong các mô-đun PV loại p c-Si tiêu chuẩn, dòng điện rò rỉ có thể chảy từ khung mô-đun đến các tế bào quang điện theo một số đường dẫn khác nhau (Hình 2), được mô tả như sau:12,13,44,48-50

- (1) dọc theo bề mặt của kính trước và xuyên qua phần lớn kính trước và chất đóng gói;
- (2) xuyên qua phần lớn kính trước (theo chiều ngang) và xuyên qua phần lớn chất đóng gói;
- (3) dọc theo giao diện giữa kính trước và chất đóng gói và xuyên qua phần lớn chất đóng gói;



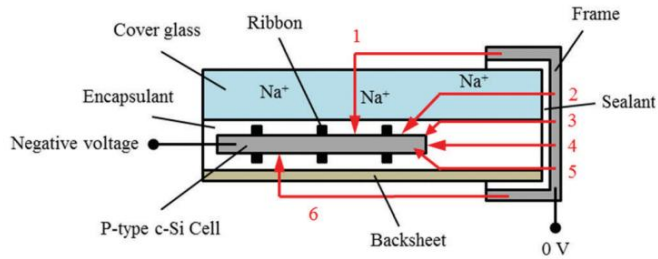
Dominik Lausch

Dominik Lausch đã nhận được bằng tốt nghiệp về vật lý từ Đại học Leipzig, Đức, năm 2009. Trong thời gian học, anh đã làm việc tại công ty Q-Cells SE về nhiều chủ đề khác nhau, bao gồm luận văn tốt nghiệp về các hiệu ứng trước khi phân hủy. Năm 2012, anh nhận bằng Tiến sĩ khoa học tự nhiên từ Đại học Halle (Saale), Đức, hợp tác với Trung tâm Fraunhofer về quang điện silicon CSP và Q-Cells SE. Luận án của anh đã khám phá chủ đề về ảnh hưởng của các khuyết tật hoạt động tái hợp đã nhận được Giải thưởng sinh viên PVSEC cho Nghiên cứu khoa học xuất sắc năm 2012. Hiện anh là trưởng nhóm tại Fraunhofer CSP.



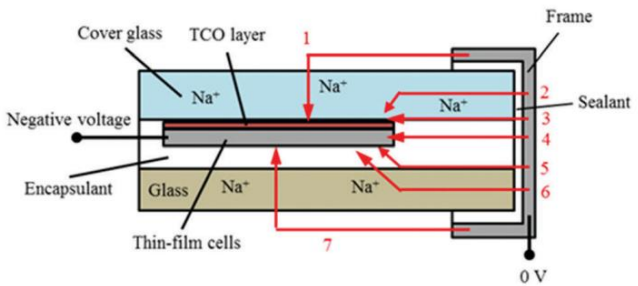
Yenn Vương

Tiến sĩ Yan Wang có kiến thức chuyên môn về công nghệ PV và kinh nghiệm sản xuất thực tế trên nhiều sản phẩm PV khác nhau trong suốt mười năm sự nghiệp của mình trong ngành PV. Ông đã lấy bằng Tiến sĩ vào năm 2007 với tư cách là sinh viên sau đại học đồng giáo dục tại Forschungszentrum Juelich, Đức và Đại học Nam Khai, Trung Quốc. Tiến sĩ Wang Yan hiện đang làm việc tại Viện nghiên cứu năng lượng mặt trời Singapore với tư cách là giám đốc cụm mô-đun PV. Một dự án R&D lớn mà ông chịu trách nhiệm với tư cách là Nhà nghiên cứu chính là phát triển các mô-đun PV tiên tiến khả thi về mặt thương mại để giảm LCOE của PV cho Singapore theo Chương trình nghiên cứu đổi mới năng lượng của EDB.



Hình 2 Mặt cắt ngang của một mô-đun PV c-Si thông thường được chế tạo bằng một gói thủy tinh-chất đóng gói-tế bào-chất đóng gói-tấm nền và mô hình hóa các đường dẫn dòng rò rỉ có thể xảy ra. Các tế bào năng lượng mặt trời bị lệch âm trong khi khung mô-đun được nối đất. Mũi tên biểu thị hướng của dòng rò rỉ. Các ion dương như ion natri (Na+) trôi về phía tế bào khi các tế bào ở điện thế âm (ví dụ qua đường dẫn 1).

Chuyển thể từ tài liệu tham khảo 44.



Hình 3 Mặt cắt ngang của mô-đun PV màng mỏng với tấm kính làm nắp sau và mô hình hóa các đường dẫn dòng rò rỉ có thể xảy ra. Các tế bào quang điện có điện thế âm trong khi khung mô-đun được nối đất. Mũi tên biểu thị hướng của dòng rò rỉ. Các ion dương như Na+ trôi vào tế bào khi các tế bào ở điện thế âm (ví dụ qua đường dẫn 1 và 7). Chuyển thể từ tài liệu tham khảo 22.

- (4) thông qua phần lớn chất đóng gói; (5) dọc theo giao diện giữa chất đóng gói và mặt sau và xuyên qua phần lớn chất đóng gói;
- (6) dọc theo bề mặt của tấm nền và xuyên qua phần lớn tấm nền và chất đóng gói.

Hướng dòng điện rò rỉ được thể hiện trong Hình 2 (hướng dòng điện thông thường) bị đảo ngược khi các tế bào quang điện hoạt động có độ lệch dương so với khung mô-đun. Trong số các đường dẫn rò rỉ được đề cập ở trên, đường dẫn 1 thường có hại nhất trong điều kiện hoạt động ngoài trời, vì độ dẫn điện bề mặt của kính phía trước tăng đáng kể trong điều kiện mưa và độ ẩm cao.44,51,52 Đường dẫn rò rỉ 6, đi qua phần lớn tấm nền, thường bị bỏ qua vì hai lý do: (1) điện trở tuyệt vời của tấm nền polyme;12,13,44 và (2) lớp phủ kim loại hoàn toàn thường xuyên do các trường bề mặt sau bằng nhôm (Al) cung cấp trên lớp bán dẫn ở mặt sau của các tế bào quang điện c-Si thông thường. Tầm quan trọng tương đối của các đường dẫn dòng điện rò rỉ khác nhau phụ thuộc vào một số yếu tố, chẳng hạn như độ ẩm, ngưng tụ sương và vật liệu đóng gói.13,23,48,50 Chi tiết về điều này sẽ được thảo luận trong Phần 5.2.

Trong các mô-đun màng mỏng, một lớp mỏng oxit dẫn điện trong suốt (TCO) nằm giữa kính phía trước và bề mặt cell (Hình 3).53 Ngoài ra, một tấm kính thường được sử dụng làm nắp sau của các mô-đun màng mỏng.53 Mặc dù có sự khác biệt về cấu trúc mô-đun, các mô-đun màng mỏng thường có các đường dẫn dòng điện rò rỉ tương tự như các mô-đun PV c-Si thông thường, ngoại trừ một đường dẫn bổ sung theo chiều ngang qua kính tồn tại ở mặt sau của mô-đun.22,26,54-58 Hơn nữa, đường dẫn dòng điện rò rỉ 7 không thể bỏ qua như trong trường hợp của các mô-đun PV loại p thông thường.56-58 Các đường dẫn dòng điện rò rỉ 1 và 7 đều có thể dẫn đến PID, nhưng độ nhạy PID của chúng khác nhau. Ví dụ, dòng điện rò rỉ qua kính phía sau trong mô-đun đồng indium gallium selenide (CIGS) được đo là thấp hơn một độ lớn so với dòng điện qua kính phía trước. Tuy nhiên, tổn thất điện năng liên quan đến dòng điện rò rỉ qua kính sau cần ít điện tích được truyền đi hơn nhiều, gấp tới 20 lần trong một trường hợp được báo cáo.56 Các mô-đun màng mỏng không khung thường có lớp niêm phong cạnh tuyệt vời và được giữ bằng kẹp. Do đó, dòng điện rò rỉ xảy ra ở cạnh có thể giảm.

3. Cơ chế PID trong các mô-đun PV

Nguyên nhân gốc rễ của PID khác nhau đối với các loại công nghệ mô-đun khác nhau. Các chế độ PID khác nhau cũng có thể xảy ra khi cùng một loại mô-đun PV bị căng thẳng trong các điều kiện khác nhau. Sự hiểu biết về PID đã được thiết lập tốt ở cấp độ vĩ mô, nhưng vẫn chưa được hiểu đầy đủ ở cấp độ vi mô. Tuy nhiên, một số lý thuyết đã được đề xuất trong tài liệu để giải thích nguyên nhân gốc rễ của PID thường được quan sát thấy trong các mô-đun PV. Các mô hình vật lý này cung cấp những hiểu biết hữu ích về hầu hết các hiệu ứng PID; do đó, các cơ chế PID phổ biến cho cả mô-đun PV dựa trên c-Si và màng mỏng được tóm tắt trong

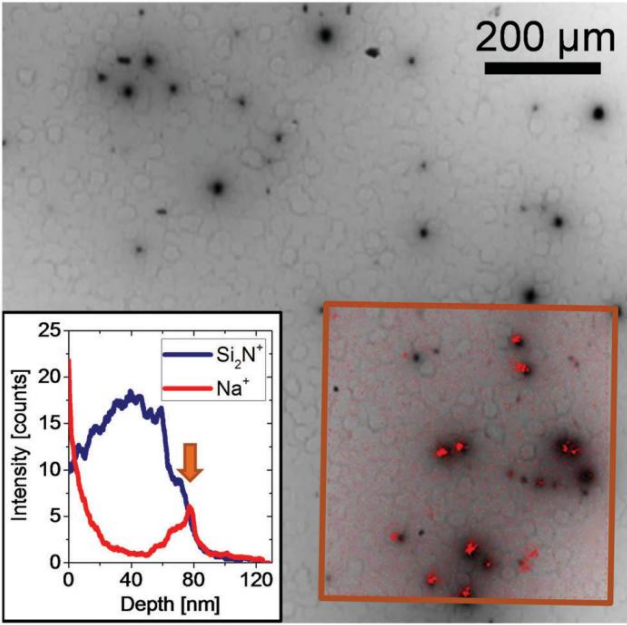
phần này tập trung vào các loại phổ biến nhất (ví dụ PID).

3.1. Công nghệ dựa trên c-Si

3.1.1. PID-s trong các công nghệ c-Si loại p tiêu chuẩn. PID-shunting (PID-s) là loại PID phổ biến nhất trong các mô-đun PV loại p thông thường c-Si. Các nghiên cứu sâu rộng đã chỉ ra rằng PID của mô-đun PV c-Si loại p tiêu chuẩn có liên quan chặt chẽ với việc giảm điện trở phân luồng (Rsh) 12,13,43,45,49,59-62 và tăng dòng bão hòa tối do tái hợp trong

vùng điện tích không gian (J02) và hệ số lý tưởng (n2) của số hạng diode thứ hai (liên quan đến sự tái hợp được quan sát thấy là sự phân luồng phi tuyến tính).36,62,63 Na được cho là đóng vai trò nổi bật trong quá trình tiến hóa của PID-s.15,32 Trong điều kiện có độ lệch âm, các ion natri (Na+) trôi qua lớp phủ SiNx AR về phía giao diện giữa lớp phủ Si và AR và thâm nhập vào các khuyết tật tinh thể bằng cách qua mỗi nối n+ -p. Điều này dẫn đến sự phân luồng đáng kể (cả ômi và phi tuyến tính) của các ô và làm giảm hiệu suất của chúng.32-34,64-66 Ở mức độ chiếu xạ thấp, tổn thất hiệu suất do PID-s nghiêm trọng hơn so với điều kiện thử nghiệm tiêu chuẩn (STC), vì tổn thất của các hạt mang điện vào các đường phân luồng trở nên chiếm ưu thế khi dòng điện quang giảm.

Mối quan hệ giữa PID-s và Na dựa trên các phát hiện thực nghiệm sử dụng Phổ khối ion thứ cấp thời gian bay (ToF-SIMS), Kính hiển vi điện tử quét (SEM) với Electron Đo dòng điện cảm ứng chùm tia (EBIC) và khóa tối Nhiệt ảnh (DLIT), chứng minh rằng các vùng phân luồng của các tế bào năng lượng mặt trời bị ảnh hưởng bởi PID có mối tương quan mạnh mẽ với



Hình 4. Hình ảnh EBIC của vùng tế bào silicon đơn tinh thể có mật độ shunt PID cao thu được ở điện áp tăng tốc 30 kV. Hình chèn cho thấy sự phân bố của Na tại giao diện SiNx/Si được đo bằng ToF-SIMS. In lại từ tài liệu tham khảo 65. Bản quyền 2014, Elsevier.

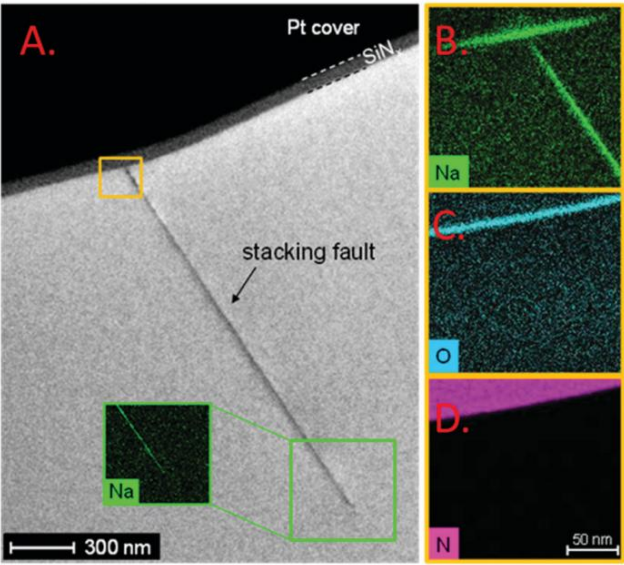
vị trí tích tụ Na tại giao diện giữa màng điện môi AR và Si, như thể hiện trong Hình 4.33,34,65 Lớp phủ trong hình ảnh EBIC cho thấy sự phân bố Na tại giao diện SiNx/Si thu được bởi ToF-SIMS. Vị trí của giao diện SiNx/Si được đối chiếu dựa trên hồ sơ cường độ của SiNx. Như có thể thấy trong Hình 4, các vùng cho thấy tín hiệu Na+ mạnh trùng với các vị trí phân luồng (các điểm tối), ngụ ý vai trò quan trọng của sự di chuyển Na+ trong quá trình tiến hóa của PID-s.

Nguồn gốc của sự ô nhiễm Na khá rõ ràng. Trong hầu hết các ấn phẩm, người ta cho rằng sự ô nhiễm Na bắt nguồn từ tấm kính soda-vôi. Kính soda-vôi chứa 13% đến 14% Na2O và điện trở suất khối của nó, trong khoảng từ 1010 đến 1011 Ω cm ở 25 °C, được tạo điều kiện thuận lợi bởi sự di chuyển của ion Na.67 Theo Naumann và cộng sự, một khả năng khác

nguồn có thể là sự ô nhiễm Na ở bề mặt của

tế bào năng lượng mặt trời (tức là bề mặt của lớp SiNx).68 Nghiên cứu của họ được thực hiện ở cấp độ tế bào với cụm phóng điện corona, nhưng PID-s vẫn được nhìn thấy trong tế bào năng lượng mặt trời. Tuy nhiên, Na trong thủy tinh soda-vôi ít nhất cũng chia sẻ sự tiến hóa của PID-s ở cấp độ mô-đun như các chất mang điện tích phổ biến góp phần vào dòng điện rò rỉ cần thiết cho bất kỳ sự tiến hóa nào của PID-s.

Các mô hình lý thuyết cũng đã được phát triển để kiểm tra nguyên nhân gốc rễ của PID-s trong các mô-đun PV c-Si loại p thông thường. Mô hình vật lý đầu tiên đưa ra giả thuyết rằng sự tích tụ các điện tích dương trong lớp phủ AR cuối cùng đảo ngược bộ phát n+ thành vùng dẫn p+ và do đó tạo ra một đường dẫn phân luồng qua tiếp giáp p-n.33,64 Mô hình đảo ngược này đã được thảo luận thêm trong một số ấn phẩm.69,70 Tuy nhiên, mô hình đảo ngược đã bị vô hiệu hóa ngay sau khi được công bố, vì một cấu trúc phân luồng khác đã được xác định từ các thí nghiệm do cùng một nhóm các nhà nghiên cứu thực hiện.65 Họ đã điều tra

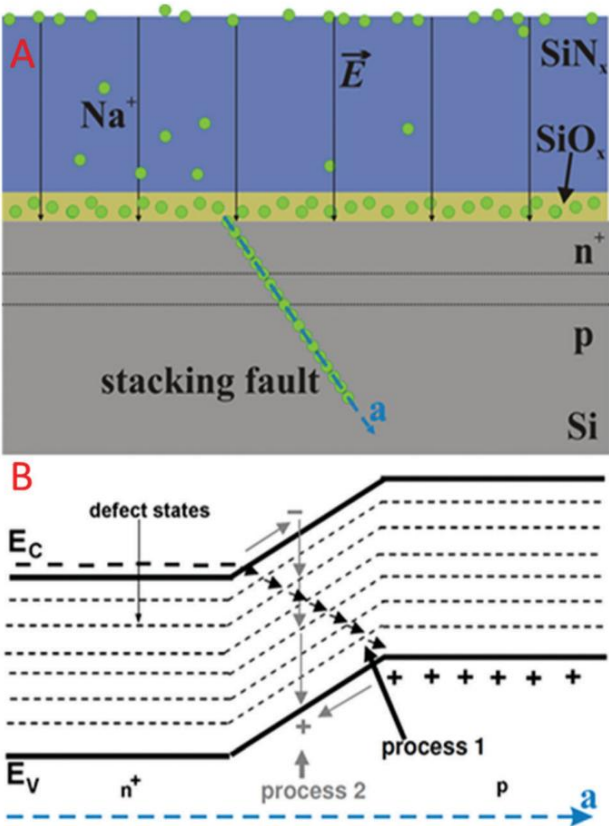


Hình 5 (A) Ảnh TEM trường sáng của đứt gãy xếp chồng biểu diễn một PID-shunt đơn. (B-D) Ảnh xạ EDX thu được ở chế độ STEM tại cùng đứt gãy xếp chồng gần giao diện giữa Si và SiNx. Bản đồ Na-EDX của phần dưới của đứt gãy xếp chồng cũng được hiển thị trong phần chèn của A. In lại từ tài liệu tham khảo 65. Bản quyền 2014, Elsevier.

các PID-shunt với Kính hiển vi điện tử truyền qua quét (STEM) kết hợp với phân tích tia X phân tán năng lượng (EDX) và quan sát thấy các đứt gãy xếp chồng trong Si bị nhiễm Na (Hình 5).35,63,65 Các đứt gãy xếp chồng, có chiều dài vài micromét, kéo dài từ giao diện SiNx/Si qua tiếp giáp p-n vào vật liệu nền Si pha tạp p.35,63,65,71 Khi PID-s tiến triển, Na+ trôi về phía giao diện SiNx/Si do sự hiện diện của một điện trường mạnh trên lớp SiNx và tích tụ trong lớp xen kẽ SiOx siêu mỏng. Do đó, Na có thể làm nhiễm các đứt gãy xếp chồng. Khi Na+ đi vào các đứt gãy xếp chồng từ lớp xen kẽ SiOx (lớp oxit tự nhiên), chúng sẽ được trung hòa bởi các electron tự do trong bộ phát n+ và do đó cho phép nhiều Na+ hơn đi theo (Hình 6A).63,65 Trong các đứt gãy xếp chồng, chuyển động của Na được điều chỉnh bởi quá trình khuếch tán chứ không phải quá trình trôi dạt.

Mô hình này được xác thực thêm bằng cách kiểm tra các khuyết tật PID-s sau khi phục hồi nhiệt, trong đó trạng thái Na không còn hiện diện trong đứt gãy xếp chồng nữa.71,72 Chi tiết về điều này sẽ được trình bày trong Phần 7. Hơn nữa, kết quả tính toán do Ziebarth và cộng sự công bố đã chứng minh rằng Na khuếch tán vào các đứt gãy xếp chồng trong Si có lợi về mặt năng lượng.73 Người ta còn đề xuất rằng trạng thái Na của các đứt gãy xếp chồng tạo ra một dải trạng thái

khuyết tật trong khoảng cách dải ban đầu (Hình 6B).63,65 Điều này một lần nữa phù hợp với cấu trúc điện tử do Ziebarth và cộng sự báo cáo.73 những người đã thực hiện mô hình nguyên tử về các đứt gãy xếp chồng được trạng thái Na của silicon và tiết lộ rằng sự hiện diện của Na trong các đứt gãy xếp chồng làm phát sinh các mức khuyết tật bị chiếm giữ một phần với khoảng cách dải Si.73 Nếu nồng độ mức khuyết tật cục bộ trong khu vực bị ảnh hưởng bởi PID đủ cao, các đường dẫn phân luồng được cho là được hình thành qua tiếp giáp p-n do dẫn truyền nhảy, được đánh dấu là quá trình 1 (màu đen) trong Hình. 6B.63,65 Tuy nhiên, khi nồng độ mức độ khuyết tật tương đối thấp ở giai đoạn đầu của PID, những khuyết tật này



Hình 6 (A) Sơ đồ mặt cắt ngang của một tế bào năng lượng mặt trời và quá trình vận chuyển Na⁺ (các chấm màu xanh lá cây) qua lớp SiNx và sự khuếch tán tiếp theo vào các đứt gãy xếp chồng. (B) Cấu trúc dải được đề xuất dọc theo một đứt gãy xếp chồng được trang trí bằng Na. In lại từ tài liệu tham khảo 65. Bản quyền năm 2014, Elsevier.

mức độ cung cấp các trung tâm bổ sung cho sự tái hợp Shockley-Read-Hall (SRH) trong vùng cận kiệt, được đánh dấu là quá trình 2 (màu xám) trong Hình 6B. Quá trình 2 được kích hoạt bằng nhiệt dẫn đến J02 tăng lên và hệ số lý tưởng n2 lớn hơn đáng kể so với 2,63,74 Vùng khối vẫn không bị ảnh hưởng vì chiều dài của các đứt gãy xếp chồng vào thứ tự của một vài micromet.63

Mối quan hệ giữa vị trí của PID-shunt và đứt gãy xếp chồng cũng được quan sát thấy tại NREL.75 Hình 7 cho thấy tiến trình xác định đứt gãy xếp chồng từ điểm nóng PID, được xác định bởi DLIT. Hình 7A cho thấy điểm nóng được DLIT xác định và các dấu laser xác định vị trí vùng khuyết tật. Hình 7B cho thấy hình ảnh dòng điện cảm ứng chùm tia điện tử (EBIC) có độ phóng đại thấp của khu vực này và Hình 7C là hình ảnh EBIC có độ phóng đại cao hơn cho thấy ba khuyết tật. Các hình vuông trong Hình 7C cho thấy nơi mẫu TEM chùm ion hội tụ (FIB TEM) được nâng lên từ các khuyết tật này. Hình 7D cho thấy hình ảnh TEM trường sáng có độ phóng đại thấp của phiên FIB xác định vị trí của khuyết tật bên dưới bề mặt trong phiên, và Hình 7E và F là hình ảnh TEM có độ phân giải cao hơn của khuyết tật bên dưới bề mặt (có mặt xung quanh độ sâu giao thoa), được xác định là đứt gãy xếp chồng.

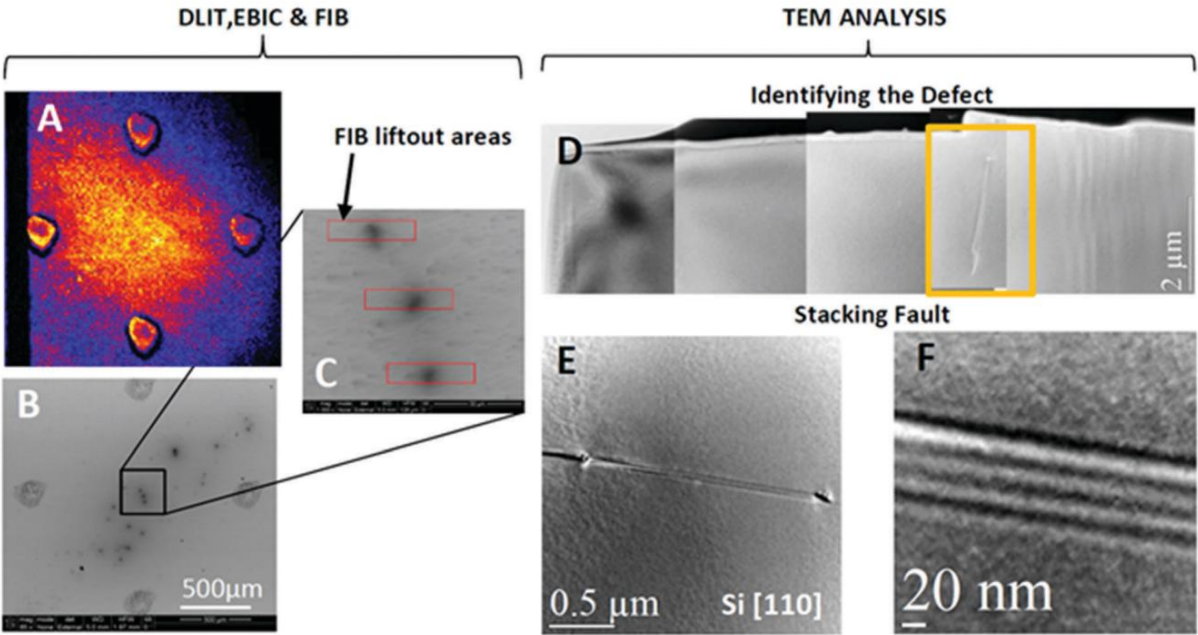
Liên kết đến Na được hỗ trợ thêm bởi dữ liệu chụp cắt lớp ToF-SIMS cho vùng phân lưu được xác định bằng DLIT, được trình bày trong Hình 8(A-C).75 Nồng độ Na tương đối cao tại

bề mặt đã được quan sát nhưng nồng độ Na cao nhất không có ngay tại bề mặt mà xuất hiện ở một khoảng cách nào đó cách xa bề mặt.75 Người ta cho rằng Na dưới bề mặt này có liên quan đến shunt được xác định thông qua DLIT. Na dưới bề mặt này đầu tiên được phát hiện trong vùng chuyển tiếp giữa lớp SiNx và silicon và vào mối nối, thường nằm cách silicon khoảng 0,3 mm.

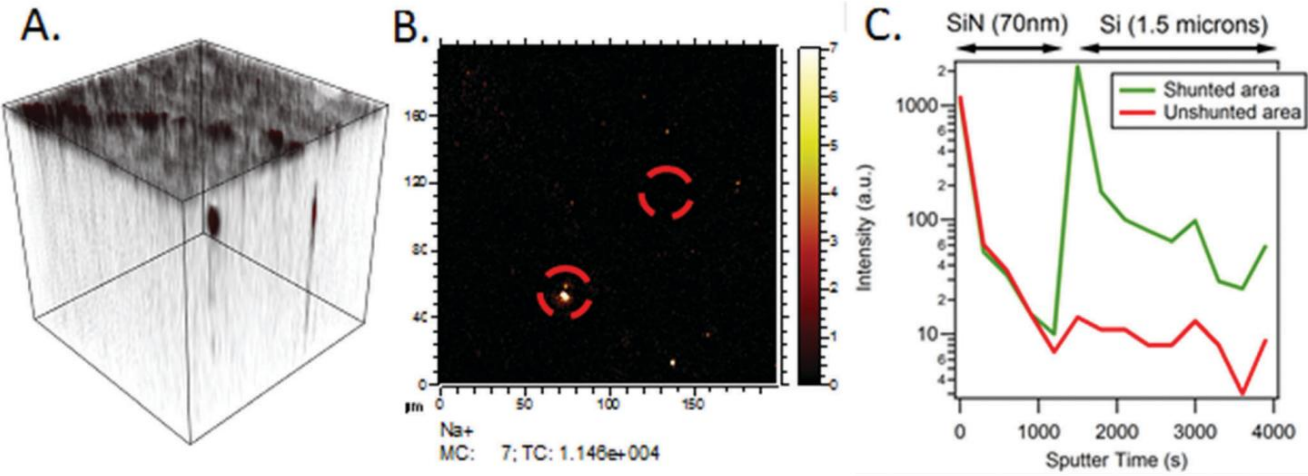
Sự hình thành các lỗi xếp chồng gây ra PID-s cũng được nghiên cứu trong một số ấn phẩm. Một số nghiên cứu đã báo cáo rằng các lỗi xếp chồng có thể hình thành và phát triển trong quá trình lắng đọng phốt pho.76,77 Quá trình pha tạp phốt pho được thực hiện trong môi trường oxy hóa và người ta biết rõ rằng quá trình oxy hóa nhiệt của Si dẫn đến sự hình thành các

loại đứt gãy xếp chồng trong Si.78-80 Tuy nhiên, Naumann và cộng sự phát hiện ra rằng đứt gãy xếp chồng được trang trí bằng Na có chiều rộng là 0,57 nm,65 trong khi tài liệu báo cáo rằng chiều rộng của đứt gãy xếp chồng bên trong và bên ngoài lần lượt là 0,32 nm và 0,63 nm,81,82 . Đứt gãy xếp chồng được trang trí bằng Na không thể được chỉ định là loại bên trong hay bên ngoài. Họ suy đoán rằng các đứt gãy xếp chồng đã tồn tại trong Si trước PID-s (loại nội tại) và được mở rộng khi PID-s tiến triển.65 Tuy nhiên, mô hình này có thể không hoàn toàn đúng, vì nghiên cứu gần đây của họ cho thấy không có đứt gãy xếp chồng nào tồn tại trong mẫu tế bào trước ứng suất PID.83 Người ta cũng phát hiện ra rằng có mối tương quan mạnh giữa vị trí của các shunt PID và các khuyết tật về cấu trúc như các vết xước nhẹ trên bề mặt Si thông qua SEM/EBIC và kỹ thuật mô tả đặc tính bằng kính hiển vi quang học (Hình 9).83 Hơn nữa, các cuộc điều tra EBIC lặp đi lặp lại về các shunt PID riêng lẻ ở các mức PID-s khác nhau đã chứng minh sự phát triển của các đứt gãy xếp chồng trong quá trình ứng suất PID.83 Do đó, dựa trên các quan sát thực nghiệm, Naumann và cộng sự đã đưa ra giả thuyết rằng các khuyết tật tinh thể như sự sai lệch hoạt động như các nhân khuyết tật và các đứt gãy xếp chồng được hình thành/phát triển thông qua sự thâm nhập của Na.83 Các đứt gãy xếp chồng sẽ tiếp tục phát triển dưới ảnh hưởng của ứng suất PID.83

3.1.2. Hiệu ứng phân cực bề mặt trong công nghệ dựa trên c-Si loại n. Hiệu ứng phân cực bề mặt lần đầu tiên được quan sát thấy trong các mô-đun PV c-Si của SunPower, được chế tạo bằng các cell c-Si tiếp xúc ngược hiệu suất cao loại n với silicon dioxide (SiO2) để thụ động bề mặt. Theo Swanson và cộng sự, cell tiếp xúc ngược loại n c-Si phải chịu điện thế dương cao, dòng điện rò rỉ từ cell qua ²⁷ khi một ethylene vinyl acetate (EVA) và kính đến khung nối đất, dẫn đến các điện tích âm tích tụ trên bề mặt lớp phủ AR (Hình 10). Các điện tích âm bị giữ lại bên trong lớp phủ AR silicon nitride (SiNx) do điện trở suất cao của màng SiO2 và/hoặc SiNx . Do đó, thay vì được thu thập bởi mối nối p-n của cell, các lỗ sinh ra do ánh sáng tích điện dương ở vùng phía trước của cell bị thu hút nhiều hơn về phía bề mặt phía trước của cell bởi các điện tích âm trong lớp phủ AR, tại đó chúng kết hợp lại với các electron. Điều này dẫn đến sự kết hợp bề mặt tăng lên và do đó làm giảm dòng điện và điện áp.27 Ngoài sự sụt giảm dòng điện và điện áp được quan sát, sự không khớp giữa các ô trong mô-đun gây ra mất hệ số lấp đầy đáng kể và dẫn đến mất hiệu suất PV đáng kể. Họ cũng quan sát thấy một hiệu ứng tương tự trong loại n hiệu suất cao



Hình 7 (A) Hình ảnh DLIT của vùng phân luồng, các dấu laser để đánh dấu vùng cũng có thể nhìn thấy được. Các dấu cách nhau khoảng 1 mm. (B) Hình ảnh EBIC của cùng một khu vực như được hiển thị trong A. (C) Quét EBIC có độ phóng đại cao hơn của ba điểm tối ở trung tâm trong B. Các hộp hình chữ nhật nhỏ (màu đỏ trực tuyến) hiển thị khu vực nơi mẫu FIB được lấy ra để phân tích TEM; cạnh dài của hình chữ nhật là 50 mm. (D) Biên soạn hình ảnh TEM có độ phân giải thấp của FIB mẫu như thể hiện trong C; một hộp được vẽ xung quanh khuyết tật cấu trúc bên dưới bề mặt đã được xác định. (E) Hình ảnh phóng đại cao hơn của khuyết tật đã được xác định trong D, hiện được xác định là lỗi xếp chồng. (F) Hình ảnh TEM có độ phân giải cao của lỗi xếp chồng bên dưới bề mặt, có thể góp phần vào sự phân luồng PID được xác định từ hình ảnh DLIT. In lại từ tài liệu tham khảo 75. Bản quyền 2016, IEEE.

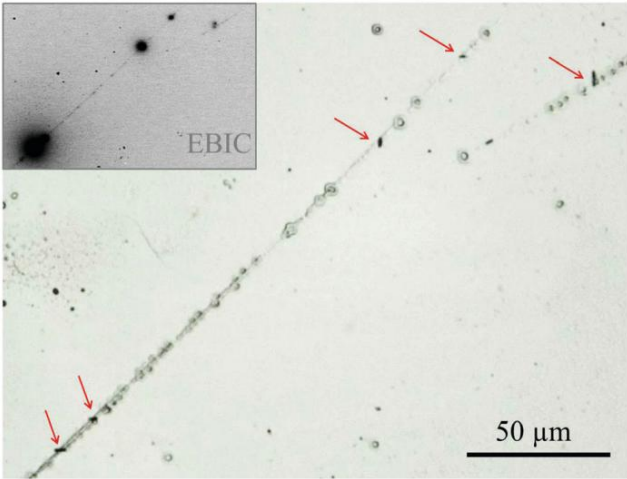


Hình 8 (A) Biểu diễn 3-D ToF-SIMS của một khu vực phân luồng được rửa bằng nước khử ion, cho thấy sự phân bố Na trong thể tích 200 200 2,2 mm. (B) Hình ảnh 2-D cho dữ liệu gần giao diện SiNx/Si, cho thấy các vùng giàu Na. Các vòng tròn cho thấy các khu vực được chọn để hồ sơ độ sâu vùng quan tâm. Các vòng tròn được phóng to để rõ ràng hơn; vùng phân tích thực tế là một hình cầu có đường kính 8 mm. (C) So sánh Tín hiệu Na của vùng được phân luồng và không được phân luồng. In lại từ tài liệu tham khảo 75. Bản quyền 2016, IEEE.

Các tế bào PERT với các mối nối trên cùng được pha tạp boron khi chúng thiên vị tiêu cực so với mặt đất.²⁷ Nguyên nhân của sự xuống cấp được cho là do sự kết hợp bề mặt tăng lên do sự tích tụ điện tích dương trong quá trình thụ động hóa nitrua và/hoặc oxit.²⁷

Các công nghệ dựa trên c-Si loại n khác nhau (ví dụ: pin mặt trời tiếp xúc mặt sau xen kẽ loại n với bộ phát nổi phía trước) cũng đã được tiến hành thử nghiệm PID trong vài năm qua.^{84–87}

Hầu hết các quan sát cũng có thể được giải thích tốt bởi lý thuyết phân cực bề mặt. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng mô hình phân cực bề mặt không thể giải thích tất cả các PID hiệu ứng xảy ra trong các mô-đun dựa trên c-Si loại n. Có những chế độ PID, có thể tồn tại ngoài hiệu ứng phân cực bề mặt. Ví dụ, người ta thấy rằng PV mono c-Si loại n các mô-đun có bộ phát phía sau bị suy giảm nhẹ khi chúng đã phải chịu sự thiên vị tiêu cực.⁸⁶ Các mô-đun thể hiện một



Hình 9 Kính hiển vi quang học của các vết nứt sau khi phân định các shunt PID bằng cách khắc khuyết tật. Việc chuẩn bị mẫu được trình bày chi tiết trong tài liệu tham khảo 87. Các đường đen ngắn (được đánh dấu bằng mũi tên màu đỏ) là các rãnh nứt. Các đường màu xám dài, đi kèm với các vết giống như vòng, là các vết xước nhẹ trên bề mặt tế bào quang điện. Hình chèn cho thấy hình ảnh EBIC của cùng một PID-shunt, được thu nhỏ từ hình ảnh kính hiển vi quang học. In lại từ ref. 83. Bản quyền 2016, Elsevier.

Mất EQE trong phạm vi bước sóng 400 đến 600 nm và giảm Voc và FF.⁸⁶ Kết quả cho thấy mất Voc là do sự tái hợp bề mặt tăng lên của các chất mang thiểu số, bao gồm cả ở bề mặt cạnh của các mẫu nhỏ được sử dụng. Kết quả ngược lại với mô hình phân cực,²⁷ trong đó các ion dương sẽ tích tụ tại lớp phủ AR và các chất mang thiểu số thay vào đó bị đẩy ra khỏi vùng phía trước của tế bào.

Một nguyên nhân có thể gây ra sự thoái hóa có thể là sự đưa Na vào Si dưới sự phân cực âm.^{86,87} Người ta nghi ngờ rằng Na bị ô nhiễm tìon gây ra các trung tâm tái tổ hợp SRH bổ sung và do đó

sự tái hợp bề mặt tăng lên.^{86,87} Tuy nhiên, vẫn chưa có bằng chứng rõ ràng nào xác minh giả định này.

3.2. Công nghệ màng mỏng

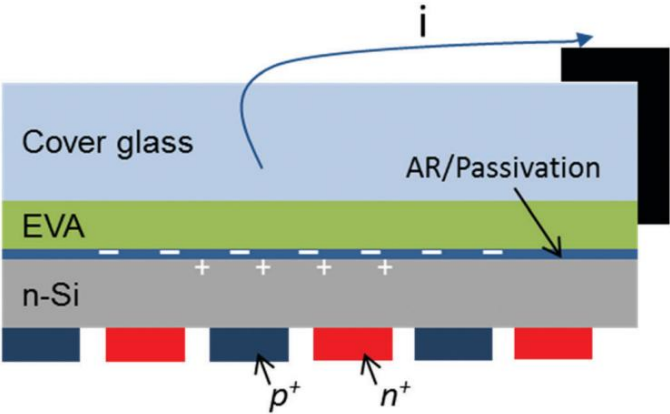
Silic vô định hình (a-Si), đồng indium gallium selenide (CIGS) và các mô-đun màng mỏng cadmium telluride (CdTe) có

tất cả đều được báo cáo trong tài liệu là bị PID, khi các tế bào năng lượng mặt trời bị phân cực âm.^{20,23,39,40,56,58,88,89} PID trong các mô-đun màng mỏng chủ yếu là do sự di chuyển của ion Na.^{21,22,41,88,90,91} Nhìn chung, có thể xảy ra hai kịch bản khác nhau, tùy thuộc vào việc có hơi ẩm xâm nhập hay không. Trong trường hợp không có hơi ẩm xâm nhập, rất có thể là trong môi trường khô hoặc trong môi trường ẩm ướt nhưng hơi ẩm vẫn chưa xâm nhập vào các mô-đun, Na⁺ bị khử thành Na nguyên tố. Điều này được thấy trong cả màng TCO thiếc dioxide (Sn2O) và kẽm oxit (ZnO) dưới dạng hiệu ứng làm tối.⁹⁰ Sự tích tụ Na cũng ảnh hưởng rất lớn đến hiệu suất điện, nhưng điều này đã được quan sát thấy là có thể đảo ngược với phân cực đảo ngược.^{41,88} Nhìn chung, tạp chất quá mức trong các mối nối bán dẫn gây ra sự tái hợp.

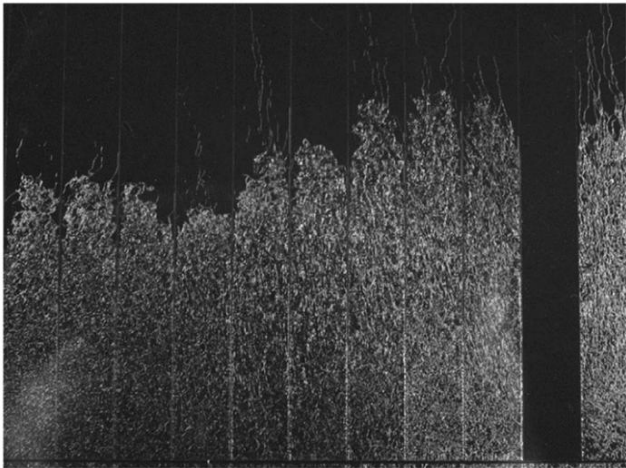
Yamaguchi và cộng sự đã quan sát thấy điện áp mạch hở (Voc) và hệ số lấp đầy (FF) giảm hơn 40% và 50% tương ứng trong các mô-đun CIGS có lớp ZnO TCO sau khi thử nghiệm PID, trong khi dòng điện ngắn mạch (Isc), điện trở phân luồng (Rsh) và điện trở nối tiếp (Rs) thay đổi đôi chút.⁸⁸ Hơn nữa, hệ số lý tưởng của diode n (mô hình một diode) được phát hiện tăng từ 1,4 lên khoảng 9,88. Do đó, kết luận từ nghiên cứu của họ rằng PID của các mô-đun CIGS chủ yếu là do sự tái hợp tăng cường.⁸⁸

Tuy nhiên, sự tích tụ Na trong các mô-đun màng mỏng cũng có thể dẫn đến các dạng PID khác. Các thí nghiệm do Fja'llstro'm và cộng sự thực hiện cho thấy Voc, Isc và FF của mẫu CIGS đều bị phân hủy.⁴¹ Các quan sát khác nhau, được báo cáo bởi Yamaguchi và cộng sự và Fja'llstro'm và cộng sự, có thể là do sự khác biệt trong các thiết lập thí nghiệm của họ, dẫn đến các vị trí tích tụ Na khác nhau. Yamaguchi và cộng sự đã bơm Na từ mặt kính hướng sáng và phát hiện ra rằng cường độ tín hiệu Na trong lớp ZnO của mẫu bị phân hủy cao hơn so với mẫu không bị ảnh hưởng.⁸⁸ Tuy nhiên, theo Fja'llstro'm và cộng sự, Na được đưa vào từ mặt sau và nồng độ Na tăng lên được quan sát thấy trong cadmium

lớp sunfua (CdS) và ở vùng trên của lớp CIGS.⁴¹ Hacke và cộng sự cũng báo cáo rằng cơ chế phân luồng và sự gia tăng điện trở nối tiếp đã được quan sát thấy trong các mô-đun CdTe.⁹² Nguyên nhân gốc rễ của các cơ chế PID khác nhau này trong các mô-đun màng mỏng vẫn chưa được kiểm tra.



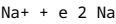
Hình 10 Sơ đồ minh họa hiệu ứng phân cực bề mặt trong các cell c-Si tiếp xúc ngược hiệu suất cao loại n của SunPower. EVA được sử dụng làm lá kim loại đóng gói. 'i' biểu thị dòng điện rò rỉ từ cell qua kính đến khung và đất. Chuyển thể từ tài liệu tham khảo 27.



Hình 11 Sự tách lớp của một phần mô-đun PV a-Si sau 200 giờ tiếp xúc trong điều kiện 85 1C và 85% RH với độ lệch 600 V so với khung mô-đun. Sự ăn mòn bắt đầu ở các đầu của từng tế bào quang điện (được phân cách bằng các sọc dọc) và tiến vào bên trong, thể hiện kiểu ''biểu đồ thanh''. Các vùng tối không bị tách lớp.

In lại từ tham khảo 22. Bản quyền 2003, Elsevier.

Mặt khác, khi độ ẩm xâm nhập vào các mô-đun, thường xảy ra trong môi trường ẩm ướt, có thể quan sát thấy một cơ chế PID khác.21,22,54,90,92-94 Độ ẩm xâm nhập cũng phụ thuộc vào chất lượng bao bì mô-đun ngoài các điều kiện môi trường (ví dụ nhiệt độ và độ ẩm). Bao bì mô-đun chất lượng cao có thể ngăn độ ẩm xâm nhập vào mô-đun ngay cả trong điều kiện ẩm ướt. Tuy nhiên, sự kết hợp giữa quá trình khử Na+ và độ ẩm xâm nhập sẽ dẫn đến sự ăn mòn điện hóa không thể đảo ngược của màng TCO dựa trên SnO2 (ví dụ biểu đồ thanh, như thể hiện trong Hình 11).21,22,90 Phản ứng hóa học xảy ra thông qua ba bước riêng biệt, như sau:90 Phản ứng khử Na:



Sự hình thành nguyên tử hydro:



Phản ứng oxi hóa khử:



Kết quả là độ bám dính của TCO bị phá vỡ.

Không chỉ Na là chất phản ứng trong các phản ứng điện hóa, sự tích tụ của Na cũng làm tăng ứng suất cơ học tại giao diện.90 Khi ứng suất cơ học đủ lớn, màng TCO sẽ bắt đầu nứt và cuối cùng có thể bị tách lớp.21,22,90 Một cơ chế khác cũng có thể xảy ra trong các hợp chất TCO được fluor hóa như SnO2:F, vì flo có thể phản ứng với độ ẩm để tạo thành axit flohydric tại giao diện.90 Điều này cũng có thể dẫn đến việc phá vỡ các liên kết thiếc-oxy. So với màng TCO dựa trên SnO2, ZnO phần lớn không bị ảnh hưởng bởi sự tấn công hóa học của hydro nguyên tử.95 Do đó, các hiệu ứng tách lớp là

không được quan sát thấy trong các mô-đun màng mỏng có TCO dựa trên ZnO lớp.21,90

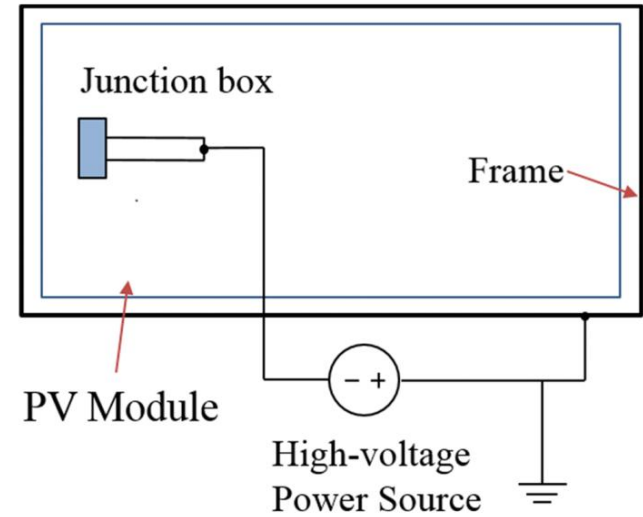
4. Phương pháp thử nghiệm khả năng nhạy cảm với PID

Tấm pin mặt trời, được coi là thành phần đáng tin cậy nhất của hệ thống PV, thường được thử nghiệm trong nhà trong điều kiện khắc nghiệt để đảm bảo tuổi thọ từ 20 đến 25 năm trong điều kiện thực tế.96,97 Nhiều phương pháp thử nghiệm trong nhà khác nhau đã được phát triển trong nhiều năm để nghiên cứu khả năng nhạy cảm với PID của các mô-đun PV, bằng cách sử dụng kết hợp các biến ứng suất khác nhau. Mức độ nghiêm trọng của thiệt hại gây ra cho các mô-đun phụ thuộc vào các phương pháp thử nghiệm. Ngay cả các mô-đun giống hệt nhau về mặt danh nghĩa trải qua cùng một phương pháp thử nghiệm PID cũng có thể biểu hiện các tổn thất điện năng khác nhau. Hơn nữa, sự hiểu biết về mối tương quan giữa thử nghiệm PID trong nhà và ngoài trời vẫn còn tương đối kém. Do đó, điều cần thiết là phải hiểu các phương pháp thử nghiệm PID khác nhau cho

phát triển một bài kiểm tra chất lượng PID để đánh giá độ ổn định PID của một mô-đun PV. Ở đây, trước tiên sẽ đưa ra một bản tóm tắt ngắn gọn về các phương pháp kiểm tra PID trong phòng thí nghiệm. Sau đó, ứng dụng, ưu điểm và nhược điểm của chúng cũng được minh họa. Các phương pháp kiểm tra ở cấp độ tế bào cũng được thảo luận, vì chúng đóng vai trò là một lựa chọn chi phí thấp để kiểm tra PID của các tế bào năng lượng mặt trời và vật liệu đóng gói. Hơn nữa, chúng rất quan trọng đối với các cuộc điều tra về nguyên nhân gốc rễ của PID.

4.1. Kiểm tra PID ở cấp độ mô-đun

4.1.1. Kiểm tra PID buồng khí hậu. Phương pháp phổ biến nhất để kiểm tra PID là phân cực các mô-đun PV với điện áp cao trong môi trường có độ ẩm và nhiệt độ cao.31,32,46,98-100 Điều này đạt được bằng cách đặt các mô-đun trong buồng khí hậu có độ ẩm và nhiệt độ được kiểm soát. Một thiết lập điển hình được thể hiện trong Hình 12. Hai dây dẫn của mô-đun được rút ngắn và kết nối với cực âm của nguồn điện áp cao. Khung mô-đun được nối đất và kết nối với cực dương của nguồn điện cao áp. Dòng rò rỉ cũng có thể được theo dõi bằng một thiết bị bổ sung. Hơn nữa, hiệu suất mô-đun có thể được xác định tại chỗ ở ứng suất



Hình 12 Sơ đồ thiết lập thử nghiệm PID trong buồng khí hậu. Hai dây dẫn của mô-đun PV được rút ngắn và kết nối với cực âm của nguồn điện cao thế. Khung mô-đun được nối đất.

hiệt độ tức là không cần tháo nó ra khỏi buồng để chớp sáng. Điều này đạt được thông qua đặc tính dòng điện-điện áp tối tại chỗ dựa trên sự chống chớp,101 do Spataru và cộng sự phát triển102 Quy trình thử nghiệm chính trong IEC 62804-1 dựa trên cùng một phương pháp luận, trong đó ứng suất các mô-đun mẫu trong buồng khi hậu trong 96 giờ ở nhiệt độ tối thiểu là 60 1C và độ ẩm tương đối (RH) 85% và với điện áp được áp dụng bằng điện áp hệ thống định mức tối đa của mô-đun.99 Đây là các phương pháp thử nghiệm được thiết kế để đảm bảo khả năng lặp lại từ phòng thí nghiệm này sang phòng thí nghiệm khác chứ không phải tiêu chí đạt/không đạt. Các kết hợp khác của nhiệt độ, độ ẩm và điện áp cũng có thể được chọn để nghiên cứu các hiệu ứng PID (ví dụ: 85 1C/85% RH và 1000 V cũng được mô tả trong IEC 62804-1).99 Việc lựa chọn các biến ứng suất phụ thuộc vào mục đích của công việc.

Khi tiến hành thử nghiệm PID buồng, độ ẩm và nhiệt độ buồng phải được kiểm soát cẩn thận để đảm bảo khả năng lặp lại vì cả hai đều có tác động rất lớn đến hiệu ứng PID. Koentopp và cộng sự đã thử nghiệm hai mô-đun để bị PID trong một buồng có kiểm soát độ ẩm ổn định và hai mẫu bổ sung trong một buồng có độ ẩm dao động cao.45 Các thí nghiệm của họ cho thấy ứng suất bổ sung đã được tạo ra trong các mô-đun do độ ẩm dao động cao.45 Điều này có thể là do độ ẩm tích tụ hoặc ngưng tụ trên kính phía trước của mô-đun.45 Hơn nữa, quá trình tăng dần cần được tối ưu hóa để tránh ngưng tụ. Khi tăng nhiệt độ trong buồng, luôn có độ trễ giữa nhiệt độ mô-đun và nhiệt độ buồng. Có thể xảy ra độ dốc nhiệt độ lớn giữa mô-đun và môi trường xung quanh buồng nếu tăng dần quá nhanh. Điều này có thể dẫn đến ngưng tụ trên kính phía trước của mô-đun và làm giảm tính hợp lệ của thử nghiệm. Tốc độ tăng dần cho cả nhiệt độ và độ ẩm phải được tối ưu hóa để tránh ngưng tụ và cũng giảm thiểu thời gian tăng dần. IEC 62804-1 yêu cầu nhiệt độ mô-đun phải được ổn định trước khi điều chỉnh độ ẩm đến mức ứng suất và thực hiện ổn định độ ẩm hơn nữa trước khi áp dụng độ lệch điện áp.99

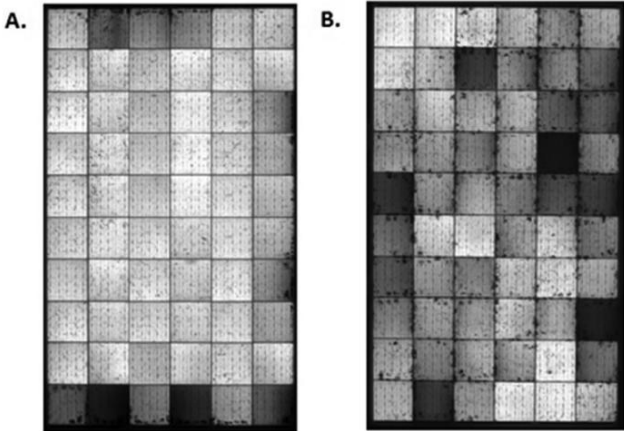
4.1.2. Kiểm tra PID bằng lớp dẫn điện trên mặt kính trước của mô-đun. Sự khác biệt giữa phương pháp này và kiểm tra PID buồng là lớp dẫn điện được đặt trên mô-đun mẫu.32 Lớp dẫn điện có thể là lá nhôm hoặc đồng, nước hoặc bột cacbon. Phương pháp này cũng đã được đưa vào IEC 62804-1 như một phương án thay thế cho PID buồng

kiểm tra, nhưng chỉ lá nhôm hoặc đồng được sử dụng cho IEC 62804-1.99 Trong hầu hết các trường hợp, lá nhôm được sử dụng để phủ bề mặt trước của mô-đun mẫu. Do đó, sau đây được gọi là thử nghiệm PID lá nhôm. Lá nhôm cung cấp đường dẫn điện trên bề mặt kính, tương đương với điều kiện độ ẩm cao. Trong thiết lập này, cần kiểm soát nhiệt độ chính xác, nhưng yêu cầu kiểm soát độ ẩm giảm do sự hiện diện của lá nhôm. Hơn nữa, để đảm bảo tiếp xúc đồng đều giữa lá nhôm và bề mặt kính, cần áp dụng áp lực, chẳng hạn như sử dụng thảm cao su trên lá nhôm.46

Thử nghiệm PID lá nhôm có một số ưu điểm so với thử nghiệm PID buồng, chẳng hạn như yêu cầu thấp hơn về kiểm soát độ ẩm và tốc độ suy thoái lớn hơn đối với cùng một ứng suất

hiệt độ. Tuy nhiên, các thử nghiệm PID buồng bao gồm các yếu tố của môi trường tự nhiên (ví dụ độ ẩm và nhiệt độ cao) không giống như các thử nghiệm PID lá nhôm và có thể phân biệt các giải pháp PID (ví dụ như giá đỡ mô-đun cách điện tốt);16,46,103 do đó, các thử nghiệm PID buồng thường có liên quan đến thực tế hơn so với các thử nghiệm PID lá nhôm. Một trường hợp ngoại lệ có thể là các thử nghiệm PID buồng ở nhiệt độ và độ ẩm cao (ví dụ: 85 1C/85% RH), nếu thực hiện trong thời gian dài, sẽ đưa độ ẩm cao hơn vào các mô-đun có tấm nền polyme so với thử nghiệm ngoài thực địa và có thể dẫn đến các cơ chế PID bổ sung, ví dụ: làm mỏng các lớp SiNx,15,36,104 cũng đã được quan sát thấy ngoài thực địa.105 Dựa trên hình ảnh phát quang điện (EL) của các mô-đun chịu ứng suất PID ngoài thực địa, các hiệu ứng PID thường bắt đầu từ khung,16,103,106 phù hợp với các kết quả quan sát được sau thử nghiệm PID buồng (Hình 13A).16,66,103,107 Mẫu suy thoái tương tự không thường được quan sát thấy sau thử nghiệm PID lá nhôm, vì các ô bị ảnh hưởng bởi PID (hình vuông tối) được phân bố ngẫu nhiên (Hình 13B).16,66,103,107 Tuy nhiên, đôi khi cũng có những phát hiện tại các trường với mẫu suy thoái giống với mẫu sau Kiểm tra PID lá nhôm.16,17 Một lý do có thể là sự bắn 'dẫn điện' hoặc hành vi điện của lớp phủ AR trên bề mặt kính, có thể làm tăng độ dẫn điện bề mặt của tấm kính (bề mặt tiếp đất).47,108 Một lời giải thích có thể khác cho những phát

hiện thỉnh thoảng có thể là vật liệu đóng gói có điện trở suất cao.108 Dựa trên phân tích phần tử hữu hạn, Pingel và cộng sự đã kết luận rằng sự phân bố điện thế cục bộ trên bề mặt mô-đun phụ thuộc vào điện trở suất khối của vật liệu đóng gói.108 Sự thay đổi điện thế trên bề mặt mô-đun tăng lên khi điện trở suất khối của vật liệu đóng gói giảm. Nếu vật liệu đóng gói có điện trở suất khối lớn, điện thế trên bề mặt mô-đun được phân bố đều, giống như hiệu ứng dẫn điện trên bề mặt (như với màng nước hoặc lá nhôm) nhưng có điện trở PID cao hơn nhiều. Hiệu ứng tương tự do chất đóng gói có điện trở suất cao cũng có thể được quan sát thấy khi



Hình 13 Ảnh EL của các mô-đun PV c-Si sau thử nghiệm PID buồng trong điều kiện độ ẩm và nhiệt độ cao (A) và sau thử nghiệm PID với lá nhôm (B). Các ô vuông tối là các ô bị phân luồng do PID. Trước khi thử nghiệm PID, cả hai mô-đun đều ở trong tình trạng tốt, không có ô nào bị phân luồng.

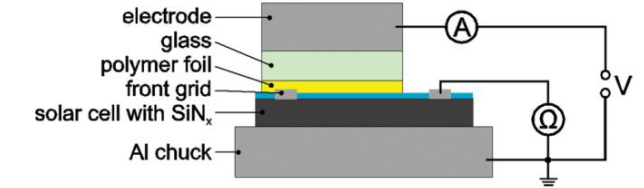
kính điện trở suất được sử dụng.50 Do đó, không chỉ các ô gần khung mô-đun sẽ bị ảnh hưởng bởi PID trong những tình huống này.

4.2. Kiểm tra PID ở cấp độ tế bào

4.2.1. Kiểm tra PID bằng cụm xả corona. Kiểm tra PID ở cấp độ tế bào năng lượng mặt trời cũng quan trọng vì nó cung cấp cơ hội cho các nhà nghiên cứu điều tra nguyên nhân gốc rễ. Nếu tế bào được đóng gói, sẽ cực kỳ khó để cô lập tế bào bị hỏng để điều tra bằng kính hiển vi sau khi kiểm tra PID.

Hơn nữa, không cần sản xuất các mô-đun tốn kém, vì có thể kiểm tra trực tiếp pin mặt trời trần. Kỹ thuật phóng điện corona là một cách hiệu quả để tạo PID trực tiếp cho các mẫu pin mặt trời.43,49,59,109 Sơ đồ đơn giản hóa của thiết lập thử nghiệm được thể hiện trong Hình 14. Các ion dương được tạo ra bởi đầu của một sợi dây mỏng do điện thế cao được áp dụng và được lắng đọng trên bề mặt trước của mẫu thử nghiệm. Sau đó, một trường điện được tạo ra trên ô mẫu bởi các điện tích dương này, nhưng bản chất của các điện tích lắng đọng được coi là khác nhau và không đại diện cho sự vận chuyển các ion Na trong các mô-đun trong trường. Na gây ra PID trong phương pháp này được cho là tồn tại trước trên bề mặt ô và có thể thay đổi.68,110,111 Người ta cũng cho rằng các ion trong quá trình phóng điện corona có thể làm hỏng và thay đổi hành vi của màng SiNx theo thời gian, khiến phương pháp này kém hữu ích hơn.112 Hơn nữa, phương pháp này bỏ qua ảnh hưởng mạnh của vật liệu đóng gói và tấm kính đối với sự phân bố trường điện.

4.2.2. Kiểm tra PID với các lớp xếp chồng giống mô-đun. Kiểm tra độ nhạy PID ở cấp độ tế bào với cụm phóng điện corona thực sự mang lại một số lợi thế, nhưng nhược điểm của chúng thì rất rõ ràng. Để bù đắp một số nhược điểm của nó, một phương pháp kiểm tra PID mô phỏng một mô-đun nhiều lớp đã được phát triển, trong đó xem xét ảnh hưởng của vật liệu đóng gói.63,66,113 Hình 15 cho thấy một phương pháp kiểm tra PID cho các công nghệ dựa trên c-Si do Fraunhofer CSP phát triển gần đây để mô phỏng cấu trúc giống mô-đun.63 Pin mặt trời được đặt trên một mâm cặp Al được kiểm soát nhiệt độ để đạt được sự phân bố nhiệt độ đồng đều.63 Ở mặt trước, một lớp lá nhôm đóng gói



Hình 15 Phương pháp thử PID mới được phát triển với cấu trúc dạng mô-đun; điện áp được áp dụng theo điều kiện hiện trường.

và một tấm kính được đặt lên trên cùng của tế bào quang điện.63 Hiệu điện thế giữa các lớp xếp chồng đạt được bằng cách cung cấp điện áp cao giữa khối kim loại và mâm cặp Al.63 Thiết lập này cho phép thử nghiệm PID của các mẫu mà không cần cán mỏng, và các tế bào quang điện bị ảnh hưởng bởi PID sau đó có thể được cô lập khỏi vật liệu đóng gói và tấm kính mà không bị nhiễm bẩn để điều tra nguyên nhân gốc rễ của PID.63 Hơn nữa, điện trở phân luồng của tế bào quang điện có thể được theo dõi tại chỗ bằng cách áp dụng một điện áp ngược nhỏ giữa các tiếp điểm trước và sau của nó. Điều này cho phép theo dõi bán liên tục sự tiến triển của PID trong tế bào mẫu.63

5. Động học của PID trong các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn

Tiến trình PID trong các mô-đun PV loại p c-Si liên quan đến dòng rò rỉ hoặc điện tích tích tụ chảy qua gói mô-đun. Mặc dù hai thông số này có thể không phải là chỉ báo nhất quán để so sánh tiến trình PID trong các mô-đun khác nhau (ví dụ: vật liệu đóng gói khác nhau, lớp phủ AR, kim loại hóa tế bào, đường truyền dòng rò rỉ), nhưng chúng cung cấp thông tin có giá trị về tốc độ PID khi cùng một loại mô-đun đang được thử nghiệm. Các tác động của độ ẩm và nhiệt độ lên dòng rò rỉ đã được nghiên cứu rộng rãi để theo dõi tiến trình của PID trong các điều kiện thực tế, bao gồm các mô-đun PV màng mỏng. Mỗi quan hệ giữa các điều kiện khí hậu và dòng rò rỉ đã đóng góp đáng kể vào mô hình hóa gia tốc của tiến trình PID trong các mô-đun PV loại p c-Si tiêu chuẩn. Hơn nữa, mối tương quan giữa điện áp được áp dụng và tổn thất công suất cũng đã được kiểm tra trong một số nghiên cứu, cung cấp thêm thông tin chi tiết về các hiệu ứng PID. Trong phần này, sự phụ thuộc của PID vào điện áp, độ ẩm và nhiệt độ được áp dụng sẽ được thảo luận chi tiết. Hai mô hình gia tốc của PID được đề xuất trong tài liệu cũng được minh họa. Hơn nữa, mối tương quan giữa dòng rò rỉ và PID và mối tương quan giữa phân luồng và PID cũng được kiểm tra.

5.1. Sự phụ thuộc vào nhiệt độ Độ

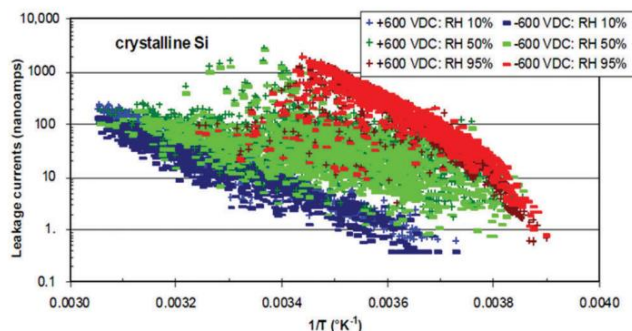
lớn của dòng điện rò rỉ tuân theo mối quan hệ kiểu Arrhenius với nhiệt độ khi độ ẩm ở mức cố định. Sự tiến triển của PID trong các mô-đun PV c-Si loại p chủ yếu là do sự trôi dạt và khuếch tán của các ion kim loại kiềm (chủ yếu là Na+).65 Các quá trình này được kích hoạt bởi nhiệt độ và do đó thể hiện mối quan hệ kiểu Arrhenius.114 Điều này đã được xác minh trong nhiều



Hình 14 Sơ đồ lắp ráp phóng điện corona để thử nghiệm PID. HV biểu thị nguồn điện áp cao. Các ion dương được tạo ra và lắng đọng trên bề mặt của cell mẫu, tạo ra trường điện trên cell mẫu.

Ôn tập

Khoa học năng lượng và môi trường



Hình 16 Dòng điện rò rỉ ở 600 V DC cho các mô-đun Si đơn tinh thể so với nghịch đảo của nhiệt độ mô-đun nghịch đảo trong ba dải giá trị RH; độ ẩm thay đổi trong vòng 2%. In lại từ tài liệu tham khảo 115. Được sự cho phép của cả ủy ban SPIE và tác giả.

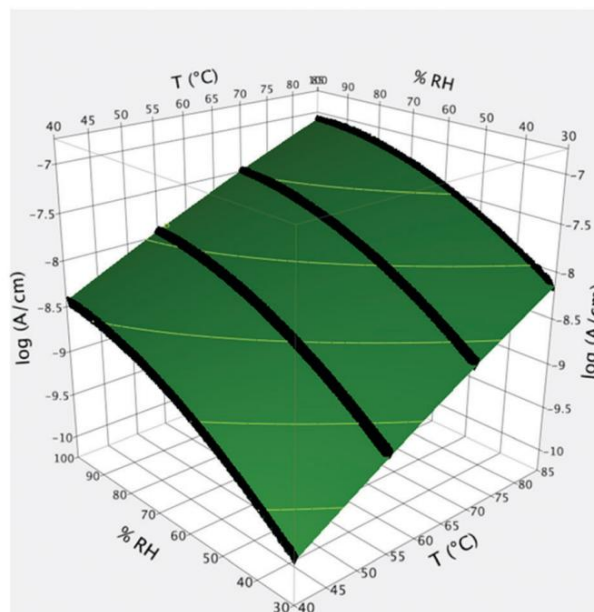
công bố bằng cách vẽ dòng rò rỉ trên trục y logarit so với nghịch đảo của nhiệt độ mô-đun tuyệt đối, cho thấy mối quan hệ theo hàm mũ (Hình 16).^{15,23,44,51,115,116} Cần lưu ý rằng mối quan hệ này chỉ đúng với các mức độ ẩm cố định, vì năng lượng hoạt hóa thường tăng theo độ ẩm.^{23,44,115} Nó cũng khác nhau đối với các loại mô-đun PV khác nhau. Do đó, rất khó để chỉ định năng lượng hoạt hóa cho các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn. Tuy nhiên, theo hướng dẫn chung, nó nằm trong khoảng từ 0,7 đến 0,9 eV đối với các mô-đun PV c-Si loại p tiêu chuẩn ở mức độ ẩm tương đối cao.^{15,23,44,51,115,116}

5.2. Sự phụ thuộc vào độ ẩm

Ngoài nhiệt độ, độ ẩm là một yếu tố môi trường khác ảnh hưởng đến sự tiến triển của PID theo nhiều cách.

Đầu tiên, độ ẩm ảnh hưởng đến các đường dẫn dòng rò rỉ chủ yếu trong mô-đun. Trong điều kiện khô, độ dẫn điện bề mặt của kính che mặt trước thấp và do đó dòng rò rỉ chủ yếu xảy ra ở các cạnh mô-đun.^{23,44,50,116} Dòng rò rỉ chủ yếu do độ dẫn điện bề mặt và độ dẫn điện của kính khối và có thể là độ dẫn điện của giao diện kính/chất đóng gói trong trường hợp này. Ngược lại, trong điều kiện độ ẩm cao hoặc ẩm ướt (ví dụ như mưa hoặc sương), một lớp màng dẫn điện tương đối cao được hình thành trên kính mặt trước, điều này thường không xảy ra ở độ ẩm thấp,^{44,117} và do đó, dòng ion vuông góc với kính mặt trước trở thành đường rò rỉ quyết định tốc độ chủ yếu.^{23,44,50,116} Điều này được hỗ trợ bởi dữ liệu dòng rò rỉ, thu thập từ các mô-đun c-Si có khung trong thực tế.²³ Người ta kết luận rằng, ở độ ẩm tương đối cao, năng lượng hoạt hóa của dòng rò rỉ là khoảng 0,9 eV, tương quan tốt với độ dẫn trong thủy tinh soda-vôi.²³ Người ta dự đoán rằng điện trở của chất đóng gói cũng sẽ góp phần vào các năng lượng hoạt hóa được đo như vậy. Ngược lại, ở độ ẩm tương đối thấp, năng lượng hoạt hóa được tính toán trong phạm vi 0,4–0,6 eV; do đó, người ta suy ra rằng dòng điện rò rỉ tập trung ở các cạnh mô-đun.²³ Thứ hai, dòng điện rò rỉ tăng khi độ ẩm tăng.^{19,23,51} Độ lớn của dòng điện rò rỉ ở độ ẩm tương đối cao lớn hơn nhiều bậc so với độ ẩm tương đối thấp ở một nhiệt độ nhất định, như được báo cáo trong Hình 17.^{19,115} Hoffmann

và cộng sự cũng quan sát thấy rằng dòng điện rò rỉ



Hình 17 Chuyển giao dòng điện được chuẩn hóa theo chu vi của các cạnh khung như một hàm của nhiệt độ và độ ẩm tương đối cho các phiếu thử nghiệm ở trạng thái cân bằng. Chuyển thể từ tài liệu tham khảo 19.

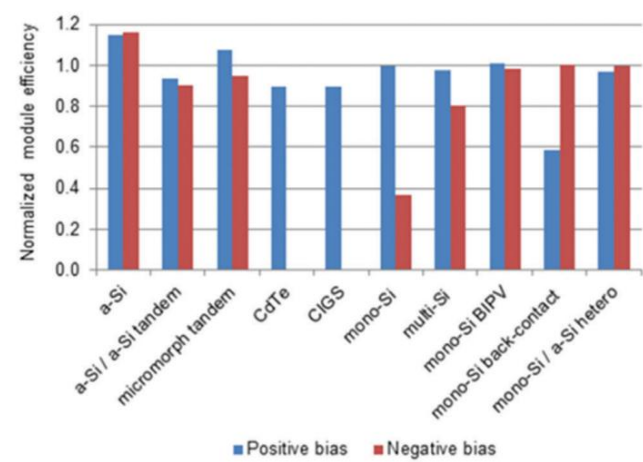
Dòng điện vào những ngày mưa tăng gấp hai lần so với dòng điện đo được vào những ngày nắng.⁵¹ Hơn nữa, người ta thường xuyên quan sát thấy dòng điện rò rỉ thường tăng đột biến vào sáng sớm do sương ngưng tụ.^{32,44,51} Sau khi mặt trời mọc, nhiệt độ mô-đun tăng do bức xạ mặt trời và cao hơn nhiệt độ môi trường xung quanh.

Điều này làm giảm độ ẩm trong vi khí hậu của mô-đun.⁵¹ Nhiệt độ thường làm tăng dòng rò rỉ, nhưng trong trường hợp này, nó sẽ dẫn đến tổng dòng rò rỉ nhỏ hơn vì độ dẫn điện bề mặt giảm—các đường dẫn dòng điện trở nên tập trung ở các cạnh mô-đun.^{51,115} Cuối cùng, độ ẩm cũng ảnh hưởng đến PID trong thời gian dài vì

độ ẩm có thể xâm nhập vào mô-đun sau thời gian tiếp xúc dài.¹¹⁸ Nó có thể làm giảm điện trở suất khối của vật liệu đóng gói, góp phần vào sự tiến triển của PID.⁶⁶ Nhìn chung, rủi ro PID tăng lên khi độ ẩm tăng. Mặt khác, PID đã được chứng minh là xảy ra ở vùng khí hậu khô nóng ở các cạnh mô-đun.¹⁰⁸

5.3. Sự phụ thuộc vào điện áp

Hiệu ứng PID phụ thuộc vào cả độ phân cực và độ lớn của điện áp được áp dụng. Đối với các mô-đun PV c-Si loại p tiêu chuẩn, các tế bào quang điện có độ phân cực âm có thể dễ bị PID-s trong khi các tế bào có độ phân cực dương có thể bị ảnh hưởng bởi các cơ chế khác nhau.^{12,13,43} Trong điều kiện độ phân cực âm, các ion kiềm (chủ yếu là Na⁺) trôi qua lớp phủ AR đến giao diện của tinh thể Si, gây ra mất hiệu suất PV như đã thảo luận trong Phần 3.1.1. Tuy nhiên, đối với các tế bào quang điện có độ phân cực dương, các ion dương đó trôi ra khỏi các tế bào. Xiong và cộng sự đã nhấn mạnh các loại mô-đun PV thương mại khác nhau (cả c-Si và màng mỏng) trong 650 giờ trong buồng nhiệt ẩm (85 ± 1°C, 85% RH), trong đó điện áp DC 1000 V được áp dụng giữa mạch tế bào quang điện và khung mô-đun.^{39,40}



Hình 18 Hiệu suất mô-đun PV chuẩn hóa sau các thử nghiệm nhiệt ẩm có điện áp dương hoặc âm. Chuẩn hóa liên quan đến hiệu suất đo được của mô-đun trước thử nghiệm PID. 10 loại mô-đun thương mại khác nhau được thử nghiệm với cả độ lệch dương và âm. Các mô-đun CdTe và CIGS cho hiệu suất 0% sau khi có điện áp phân cực âm. In lại từ tham khảo 40. Bản quyền 2011, Elsevier.

Như có thể thấy từ Hình 18, đối với các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn (sử dụng các tấm bán dẫn loại p), độ lệch dương có ít tác động, trong khi độ lệch âm gây ra sự suy giảm công suất nghiêm trọng.39,40 Điều ngược lại đúng đối với mô-đun tiếp xúc phía sau, sử dụng các tấm bán dẫn loại n như đã thảo luận trong Phần 3.1.0.39,40

Độ lớn của điện áp được áp dụng cũng ảnh hưởng đến mức độ PID. Hattendorf và cộng sự đã áp dụng điện áp 250, 500 và 750 V cho hai loại mô-đun PV c-Si loại p trong cùng điều kiện khí hậu (phân cực âm).119 Đối với cả hai loại mô-đun, điện áp phân cực 500 V gây ra sự suy giảm công suất PV ít hơn 750 V, nhưng lớn hơn 250 V sau cùng thời gian thử nghiệm.119 Do đó, mức độ nghiêm trọng của PID tăng lên khi điện áp được áp dụng tăng. Tuy nhiên, không tìm thấy mối quan hệ tuyến tính chính xác giữa tổn thất công suất của mô-đun và độ lớn của điện áp được áp dụng từ các thí nghiệm của họ.119 Cần phải tiến hành thêm các cuộc điều tra để hiểu mối quan hệ giữa hai thông số này, điều này rất quan trọng để đánh giá các rủi ro tiềm ẩn khi triển khai các hệ thống kết nối lưới điện với điện áp DC 1500 V trong tương lai.18

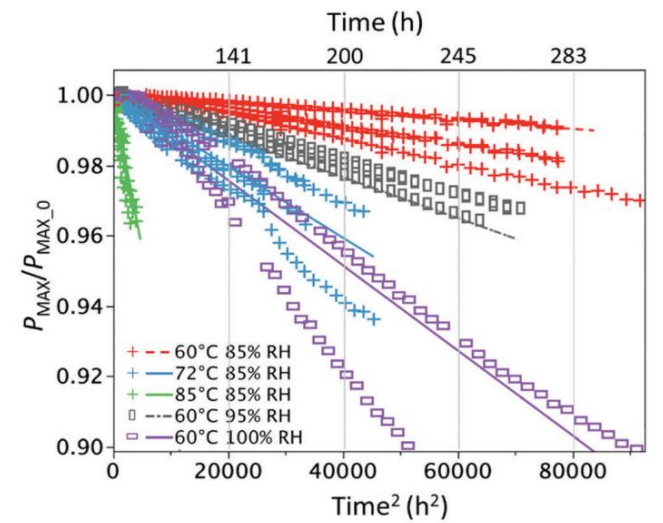
5.4. Mô hình hóa gia tốc

Như đã thảo luận trước đây, các hiệu ứng PID trong các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn phụ thuộc rất nhiều vào điện áp, độ ẩm và nhiệt độ được áp dụng. Dựa trên những phát hiện này, một số mô hình gia tốc được đề xuất trong tài liệu để dự đoán sự tiến triển của PID theo thời gian. Ở đây, hai mô hình gia tốc được trình bày. Hattendorf và cộng sự đã thử nghiệm 4 loại mô-đun PV c-Si 60 cell loại p tiêu chuẩn khác nhau với 12 tổ hợp khác nhau của các biến ứng suất: U (điện áp), T (nhiệt độ) và H (độ ẩm).119 Một điện cực toàn bề mặt (Al) đã được sử dụng để nối đất trong thiết lập thử nghiệm của họ. Bằng cách lập bản đồ dữ liệu thực nghiệm, một mô hình toán học đã được đề xuất (xem phương trình 1-4).119 Dựa trên các thử nghiệm phù hợp của họ, mô hình tạo ra độ chính xác hợp lý để dự đoán công suất mô-đun (P).119

Trong mô hình của họ, người ta đề xuất rằng các mô-đun PV cuối cùng sẽ ngừng suy thoái và đạt đến mức tổn thất công suất tối đa của chúng.119 Mô hình này tiếp tục giả định rằng mức tổn thất công suất tối đa chỉ liên quan đến điện áp được áp dụng.119 Điện áp được áp dụng càng lớn thì mức suy giảm công suất của mô-đun PV càng lớn.119 Mối quan hệ chính xác giữa điện áp được áp dụng và mức tổn thất công suất tối đa được nêu trong phương trình (1) và (2).119 Nhiệt độ và độ ẩm chỉ ảnh hưởng đến tốc độ suy thoái, như được phản ánh trong phương trình (2)-(4).119 Mô hình gia tốc bao gồm sáu tham số chưa biết, được xác định theo kinh nghiệm bằng cách khớp dữ liệu thực nghiệm với mô hình của họ.119 Họ cũng đã phát triển một mô hình tái tạo để phục hồi PID, nhưng các chi tiết không được thảo luận trong bài báo này.120

$$P_{mod}(U,T,H,t) = P_{ini}[1 - p(t)] \tag{1}$$
$$p(t) = \frac{1}{e^{\frac{U}{U_0}} - 1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \tag{2}$$
$$p(t) = \frac{1}{e^{\frac{U}{U_0}} - 1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \tag{3}$$
$$p(t) = \frac{1}{e^{\frac{U}{U_0}} - 1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \tag{4}$$

Hacke và cộng sự cũng đề xuất một mô hình gia tốc, dựa trên các phương trình Peck cổ điển và phương trình mũ.121 Trong các thí nghiệm của họ, điện áp phân cực được duy trì không đổi (1000 V) cho tất cả 20 mô-đun mẫu (60 pin mặt trời loại p c-Si).121 Pmax/Pmax_0 được lập bản đồ dưới dạng hàm của nhiệt độ, độ ẩm tương đối và thời gian (xem phương trình (5)).121 Trong mô hình này, sự suy giảm công suất được đề xuất tuân theo mối quan hệ tuyến tính với thời gian để của 2 (tức 2 có công suất), dựa trên dữ liệu thực nghiệm của họ (Hình 19).121 Họ là, t cũng quan sát thấy rằng nhiệt độ cao hơn không làm tăng mức độ tối đa của PID, trong khi độ ẩm cao hơn thì có.121 Tuy nhiên, dựa trên kết quả của họ, tốc độ PID dường như đi vào một chế độ khác vượt quá độ dẫn bề mặt nhất định, tức là độ ẩm ngưng tụ.121



Hình 19 Công suất PV chuẩn hóa do PID theo hàm số của nhiệt độ, độ ẩm tương đối và thời gian ứng suất. Các đường được lắp là kết quả của việc áp dụng mô hình Peck theo thời gian bình phương. In lại từ tài liệu tham khảo 121. Bản quyền 2014, IEEE.

Mô hình hóa tương tự cũng được áp dụng để dự đoán sự tiến triển của PID trong các mô-đun CdTe tại các trường với độ chính xác cao.⁹² Các mô-đun CdTe có lớp niêm phong cạnh chắn ẩm hiệu quả và khả năng phục hồi PID tối thiểu, giúp tạo điều kiện thuận lợi cho việc mô hình hóa.

$$\frac{P_{max}}{P_{max,0}} = \frac{1}{4} A e^{-\frac{E}{kT}} B t^2 \quad (5)$$

trong đó E là năng lượng hoạt hóa nhiệt; A là tiền mũ; B là hằng số, còn k và T có ý nghĩa thông thường trong thống kê Boltzmann.

Một số mô hình dự đoán khác cũng đã được đề xuất trong tài liệu.^{116,122-124} Nhìn chung, tất cả các mô hình động học này đều đưa ra ước tính thỏa đáng về tiến trình PID trong các mô-đun PV c-Si loại p trong các điều kiện cụ thể, nhưng khả năng áp dụng của chúng vẫn còn hạn chế. Mặc dù các mô hình có thể được sử dụng để dự đoán hiệu suất mô-đun được thử nghiệm trong nhà với độ chính xác cao, nhưng nhiều mô hình vẫn chưa được xác thực ngoài trời.

Sự khác biệt được báo cáo giữa kết quả dự đoán và kết quả thực tế có thể là do một số lý do. Thứ nhất, các mô hình toán học chủ yếu dựa trên các thí nghiệm trong nhà, trong đó buồng khí hậu cung cấp một môi trường tương đối ổn định (nhiệt độ và độ ẩm cố định với các biến thể nhỏ). Tuy nhiên, các điều kiện môi trường liên tục thay đổi trong thực tế. Thứ hai, trong thực tế, nhiệt độ mô-đun thường cao hơn nhiệt độ môi trường xung quanh, tạo ra một môi trường vi mô gần bề mặt mô-đun.

mặt. Vào ban ngày (không mưa), độ ẩm tại bề mặt mô-đun thực tế thấp hơn độ ẩm của khí quyển.⁵¹ Mức độ ẩm trong chất đóng gói, được cân bằng theo thời gian trong thực địa, cũng sẽ khác nhau đối với các điều kiện bên ngoài. Do đó, dữ liệu cụ thể của mô-đun phải được đo hoặc lấy từ dữ liệu khí tượng, điều này đặt ra những thách thức bổ sung cho các dự đoán. Thứ ba, các mô-đun trong buồng thường chịu ứng suất liên tục, nhưng có thể thấy sự phục hồi PID đối với các mô-đun vào ban đêm ngoài thực địa.⁷² Ngoài ra, các mô-đun trong buồng thường được thử nghiệm trong bóng tối, trong khi tỷ lệ PID đã được chứng minh là bị ảnh hưởng bởi ánh sáng, vừa làm tăng tỷ lệ khi áp dụng trước ứng suất PID,⁴⁵ vừa làm giảm tỷ lệ khi áp dụng trong ứng suất PID.⁴⁶ Cuối cùng, các yếu tố khác cũng có thể ảnh hưởng đến thử nghiệm PID trong thực địa, chẳng hạn như bản⁴⁷ và ngưng tụ sương.^{44,51} Nhìn chung, các mô hình dự đoán này cần được phát triển thêm và dự kiến khả năng ứng dụng của chúng sẽ được cải thiện trong tương lai gần.

5.5. Tương quan giữa dòng rò rỉ và PID

Đã có nhiều nỗ lực để liên hệ dòng rò rỉ với PID. Dòng rò rỉ của các mô-đun dưới điện áp hệ thống không phải là chỉ báo phổ quát của PID vì khả năng phục hồi điện năng được thấy trong một số công nghệ cell, một số đường dẫn dòng điện có hại hơn những đường dẫn khác và các giải pháp để ngăn ngừa PID bao gồm giảm điện trở của đường dẫn dòng điện (tức là làm cho lớp phủ SiNx AR dẫn điện tốt hơn, được thảo luận trong Phần 6.1.1). Mặt khác, dòng rò rỉ có thể là chỉ báo tương đối của ứng suất PID được áp dụng trên một loại mô-đun nhất định. Truyền điện tích được coi là một yếu tố trong các quá trình phân hủy điện hóa.

Quá trình phân hủy điện hóa thường phụ thuộc

về sự xâm nhập của độ ẩm và không được coi là có thể phục hồi dễ dàng trong các mô-đun được lắp đặt.

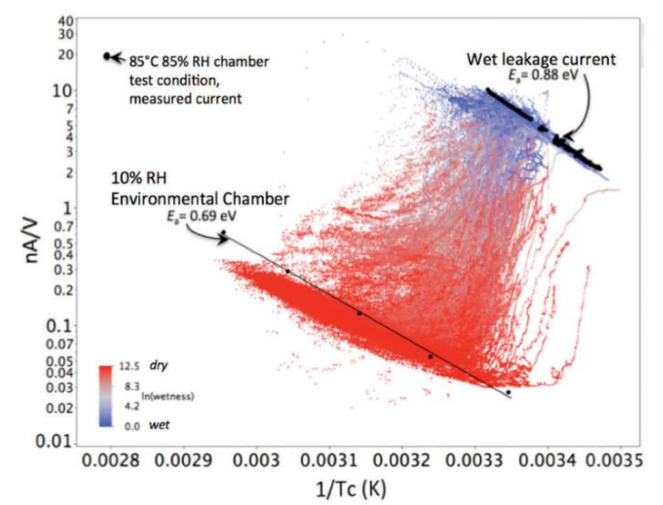
Phòng thí nghiệm Jet Propulsion đã cố gắng tạo ra mối tương quan giữa điện tích rò rỉ trên một đơn vị chiều dài của cạnh khung mô-đun (điện cực nối đất) và sự suy giảm công suất mô-đun. Họ cho rằng sự suy giảm đáng kể (450%) xảy ra trong khoảng từ 1 đến 10 coulomb trên một centimet (C trên một cm) điện tích truyền đi.²⁰ Ngưỡng mất điện 50% là khá lớn. Trong một nghiên cứu khác, ngưỡng mất điện có thể phát hiện được do độ lệch điện áp hệ thống đối với các mô-đun PV thương mại trong điều kiện nhiệt ẩm 85 °C/85% RH được quan sát bằng thực nghiệm là 0,02 C cm¹⁵ Sự truyền điện tích này từ các mô-đun silicon tinh thể 60 cell thông thường (không được tối ưu hóa cho điện trở PID) (chu vi khoảng 500 cm) chuyển thành khoảng 10 coulomb, tương đương với mức thấy trong một năm đối với các mô-đun ở Florida, Hoa Kỳ ở điện áp hệ thống 600 V.¹⁵ Tuy nhiên, mức độ ẩm bên trong mô-đun bên trong buồng khí hậu không đại diện cho môi trường ngoài trời. Hơn nữa, các đường dẫn hiện tại qua các mô-đun trong buồng và ngoài thực địa có thể khác nhau.

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng có thể tạo ra mối tương quan trên cơ sở điện tích được truyền giữa mức độ suy giảm công suất trong quá trình thử nghiệm tăng tốc các mô-đun và các mô-đun chỉ được lắp tại hiện trường trong một số loại mô-đun.^{58,125} Do những mối tương quan này, có thể dự đoán được sự gia tốc trong dòng điện rò rỉ trong nhiều môi trường ngoài trời khác nhau dựa trên điện tích được truyền theo chức năng của điều kiện thời tiết; một phương pháp như vậy đã được đề xuất để ước tính PID tại hiện trường.¹²⁵ Tuy nhiên, có nhiều cơ chế suy thoái có thể xảy ra do ứng suất điện áp hệ thống. Khả năng liên hệ điện tích được truyền từ mạch ô mô-đun với PID một cách phổ quát có giới hạn—có thể thực hiện được đối với một số cơ chế nhưng không thể thực hiện được đối với những cơ chế khác. Mặt khác, người ta dự đoán rằng dòng điện rò rỉ là một chỉ báo tương đối về ứng suất PID trên một loại mô-đun nhất định trong nhiều môi trường khác nhau.

Dòng điện được truyền từ mạch pin hoạt động xuống đất trong các mô-đun đang trải qua ứng suất suy thoái do điện thế (PID) có thể được quan sát theo dữ liệu khí tượng (Hình 20).¹²⁶ Với dữ liệu này, các chức năng dự đoán chế độ và tốc độ truyền điện tích có thể được phát triển để sử dụng trong việc ước tính ứng suất PID tương đối liên quan đến nhiệt độ, độ ẩm và điện áp hệ thống, sau đó áp dụng cho các điều kiện khí hậu khác.

Sử dụng một mô-đun bản sao của loại mô-đun được hiển thị trong Hình 20, dòng điện được truyền theo hàm của nhiệt độ trong buồng khí hậu khô (10% RH), trong điều kiện thử nghiệm ứng suất 85 °C/85% RH và một lần nữa trong thiết bị thử nghiệm dòng rò ướt áp dụng 1000 V cho mạch ô được đo và chồng lên dữ liệu ngoài trời.¹²⁶ Hành vi dòng rò ướt khớp tốt với giới hạn trên của dòng điện được truyền ra ngoài trời, nhưng có một số không khớp khi mô-đun khô và nóng. Tuy nhiên, có thể thấy rằng hành vi truyền dòng điện của hai thái cực quan trọng được thấy trong môi trường tự nhiên (ướt và khô) có thể được mô tả nhanh chóng và dễ dàng.¹²⁶ Khi so sánh dòng điện truyền từ loại mô-đun trong buồng thử nghiệm môi trường với điều kiện thử nghiệm 85 °C/85% RH, dòng điện truyền giống với chu kỳ mô-đun nóng và ướt trong môi trường tự nhiên, khoảng 20 nA trên một vôn



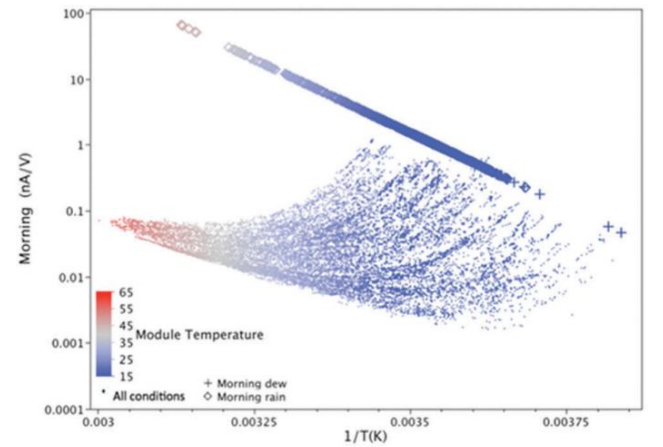


Hình 20 Dòng điện chuẩn hóa điện áp hệ thống trong khoảng thời gian sáu tháng đối với một mô-đun được giữ bằng kẹp cạnh (không có khung) tại Florida, Hoa Kỳ (dữ liệu đỏ-xanh lam, trong đó xanh lam là ướt và đỏ là khô theo cảm biến độ ẩm). Kết quả trong buồng khô (10% RH, nằm điểm dưới), các thử nghiệm dòng rò rỉ ướt (dữ liệu trên) và đối với các điều kiện thử nghiệm buồng 85 1C/85% RH được thực hiện trên một mô-đun chỉ em được chồng lên nhau bằng màu đen.

In lại từ tài liệu tham khảo 126. Bản quyền năm 2016, IEEE.

điện áp hệ thống được áp dụng (nA V1), mặc dù đường dẫn truyền dòng điện có thể không nhất thiết phải giống nhau.

Các mối quan hệ xác định giữa việc truyền dòng điện và các điều kiện mô-đun ở Florida cho các chế độ (1) sương buổi sáng hoặc mưa, trong đó có thể sử dụng hàm Arrhenius đơn giản khi mô-đun bị ướt; (2), buổi sáng, sau khi ngưng tụ đã khô; và (3), buổi chiều, được chiếu lên nhiệt độ mô-đun và dữ liệu khí tượng thực địa ở Colorado, Hoa Kỳ, để hiển thị điện tích được truyền trong một năm ở Colorado trong Hình 21.126 . Tổng hợp dữ liệu truyền dòng điện cho Florida (Hình 20) và Colorado (Hình 21), tổng điện tích được truyền ở Colorado được thấy là thấp hơn, được tính toán là tổng thể bằng 19% so với Florida, chủ yếu liên quan đến sương buổi sáng tối thiểu và độ ẩm thấp hơn.

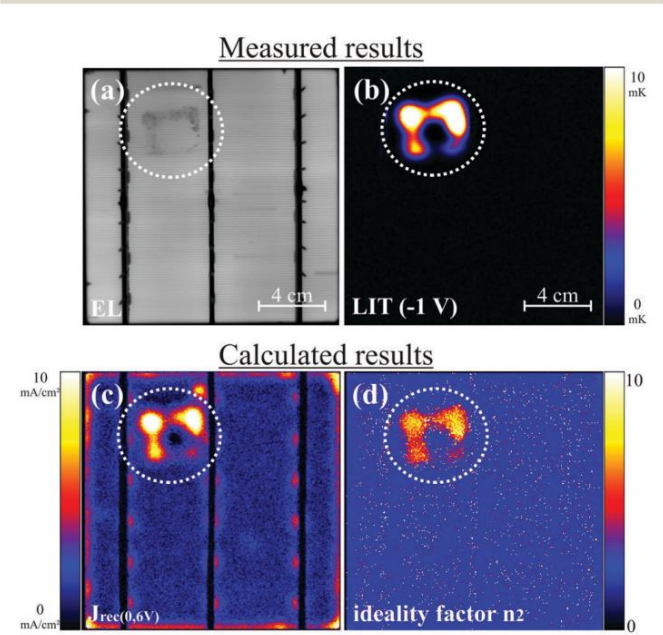


Hình 21 Dòng điện được tính toán truyền từ một mô-đun ở Colorado, hiển thị dòng điện truyền với mối quan hệ Arrhenius khi mô-đun bị ướt và kết quả của hàm hồi quy thu được từ dữ liệu Florida khi độ ẩm không ngưng tụ. In lại từ tham chiếu 126. Bản quyền 2016, IEEE.

5.6. Tương quan giữa điện trở shunt và PID-s

Một kết quả trực tiếp của PID-s trong các mô-đun PV c-Si loại p là sự phân luồng đáng kể trong các tế bào quang điện. Trong phép tính gần đúng đầu tiên, nghịch đảo của điện trở phân luồng tỷ lệ thuận với tổn thất công suất. Một số ấn phẩm đã cố gắng theo dõi tổn thất công suất do PID-s bằng cách đo điện trở phân luồng ômi (Rsh) của các mô-đun PV và sau đó mô phỏng hiệu suất của mô-đun bằng mô hình hai diode chỉ giả định sự giảm điện trở phân luồng ômi.^{36,62} Cả Hacke và cộng sự và Taubitz và cộng sự

báo cáo rằng có sự khác biệt rõ ràng giữa tổn thất điện năng được đo bằng bộ mô phỏng năng lượng mặt trời và được mô phỏng bằng kỹ thuật dựa trên Rsh cho các mô-đun kích thước đầy đủ.^{36,62} Để nghiên cứu mối tương quan kém, Hacke và cộng sự đã khớp các đường cong dòng điện-điện áp tối (I-V) với mô hình hai diode và kết luận rằng J02 và n2 của số hạng diode thứ hai tăng lên (dòng điện kết hợp lại hoặc phân luồng không tuyến tính) sau PID-s.³⁶ Taubitz và cộng sự cũng đưa ra kết luận tương tự, vì mô hình hóa shunt phi tuyến tính mang lại sự thống nhất tốt hơn nhiều giữa kết quả đo được và mô phỏng.⁶² Gần đây hơn, điều này đã được xác minh bằng phép tính đường cong I-V cục bộ thông qua các phép đo DLIT.^{63,127} Người ta đã chỉ ra rằng vùng PID-s biểu hiện J02 tăng mạnh và hệ số lý tưởng n2 (lớn hơn 2) do sự tái hợp tăng lên trong vùng cận kiệt (Hình 22).⁶³ Do đó, giả sử chỉ riêng sự giảm điện trở shunt ômi là không đủ chính xác để ước tính hiệu suất mô-đun khi PID-s tiến triển. Sự gia tăng J02 và n2 của số hạng diode thứ hai do PID-s cần được xem xét để có mối tương quan tốt hơn. Mặt khác, hiệu ứng không khớp giữa các tế bào năng lượng mặt trời bị suy giảm ở các mức độ khác nhau do PID-s gây ra thêm lỗi cho kỹ thuật dựa trên Rsh khi nó được sử dụng cho các mô-đun kích thước đầy đủ.



Hình 22 (a) Ảnh EL của một tế bào quang điện bị suy thoái; (b) Ảnh DLIT ở 1 V; (c) Phân phối J02 được tính toán từ các phép đo DLIT dựa trên phương pháp được báo cáo trong tài liệu tham khảo 128; (d) Phân phối hệ số lý tưởng n2 , được chia tỷ lệ từ 2 đến 10. In lại từ tài liệu tham khảo 63. Bản quyền 2014, IEEE.

6. Các biện pháp phòng ngừa PID trong các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn

Xét đến những tác động tiềm ẩn lên các mô-đun PV, các biện pháp phòng ngừa đã được phát triển để giảm thiểu tác động PID lên các mô-đun PV c-Si loại p thông thường trong điều kiện ngoài trời. Trong phần này, các công nghệ chống PID hoặc không có PID khác nhau cho các mô-đun PV loại p thông thường được tóm tắt, được phân loại thành ba nhóm: một ô, một mô-đun và một hệ thống. Ưu điểm và nhược điểm của chúng cũng được đánh giá chi tiết. Ở cấp độ ô, sự liên quan của các đặc tính của lớp phủ AR SiNx đối với các hiệu ứng PID được thảo luận. Công nghệ ô chống PID có thể đạt được thông qua các sửa đổi của lớp phủ AR. Nó cũng chỉ ra rằng các bước xử lý trước bổ sung trước khi lắng đọng SiNx có thể làm chậm các hiệu ứng PID. Ở cấp độ mô-đun, PID có thể được giảm thiểu hoặc tránh được bằng cách lựa chọn hợp lý chất đóng gói và vật liệu thủy tinh hoặc siêu trạng thái.

Cuối cùng, ở cấp độ hệ thống, các hiệu ứng PID có thể được giảm thiểu bằng các cấu trúc hệ thống phù hợp. Một số phương pháp này cũng có thể áp dụng cho các loại công nghệ mô-đun khác (ví dụ: công nghệ màng mỏng) để ức chế các hiệu ứng PID, đặc biệt là ở cấp độ mô-đun và hệ thống.

6.1 Cấp độ tế bào

6.1.1. Tính chất của màng SiNx. Lớp phủ AR có tác động đáng kể đến điện trở PID của pin mặt trời loại p c-Si.12,13,59,109,128–135 Nhiều ấn phẩm đã chỉ ra rằng việc tăng chiết suất sẽ cải thiện hiệu quả điện trở của pin mặt trời đối với PID-s.12,13,59,109,128–132,134 Điều này có thể đạt được bằng cách tăng tỷ lệ Si/N trong quá trình lắng đọng.136 Nguyên nhân được cho là do độ dẫn điện từ được cải thiện.129,130 Việc tăng tỷ lệ Si/N làm tăng chiết suất, tăng độ dẫn điện và giảm sự vận chuyển các điện tích dương lên lớp phủ AR SiNx; do đó, nó dẫn đến giảm độ nhạy PID ở cấp độ tế bào thông qua việc trung hòa các ion Na+ đang tiến tới và giảm trường điện cho sự trôi Na+ trong lớp SiNx.130,134 Hơn nữa, có báo cáo rằng chiết suất cao 2,2 đối với SiNx có thể ức chế hiệu quả PID-s.13,129,137 Tuy nhiên, có sự đánh đổi giữa hiệu suất tế bào và độ nhạy PID. Hiệu suất tế bào ban đầu bị ảnh hưởng khi chiết suất được điều chỉnh đến giá trị cao như vậy do sự hấp thụ ánh sáng tăng lên trong SiNx khi sử dụng chiết suất cao hơn. Độ dày của lớp phủ AR SiNx và công nghệ lắng đọng của nó đã được phát hiện có một số ảnh hưởng đến điện trở PID của tế bào năng lượng mặt trời.12,13

6.1.2. Tiền xử lý trước khi lắng đọng SiNx. Ở cấp độ tế bào, việc phát triển một lớp SiO2 trung gian giữa lớp phủ Si và AR cũng đã được chứng minh là một cách hiệu quả để giảm khả năng nhạy cảm với PID.109,138–140 Lý do cho khả năng kháng PID tăng lên vẫn chưa rõ ràng. Tuy nhiên, Han et al. đã chế tạo các tế bào với ba quy trình khác nhau: khuếch tán POCl3 thông thường, cấy ion và khuếch tán POCl3 đã được sửa đổi.138 Quy trình khuếch tán POCl3 đã được sửa đổi bao gồm một bước bổ sung là phát triển một lớp màng SiO2 mỏng (10 nm) sau bước loại bỏ thủy tinh silicat phốt pho (PSG), trước khi lắng đọng SiNx.138 Một lớp màng SiO2 mỏng đã được

cũng được xác nhận là phát triển trong quá trình cấy ion (do ủ nhiệt).138 Các mô-đun khác nhau đã được chế tạo bằng ba loại ô này và được thử nghiệm về hiệu suất PID trong điều kiện 85 ° C, 85% RH và 1000 V.

Các thí nghiệm này cho thấy rằng, các mô-đun được chế tạo bằng các cell có thêm lớp màng SiO2 giữa lớp phủ Si và lớp phủ AR thể hiện khả năng chống PID tuyệt vời (mất công suất 0,5%), trong khi công suất của các mô-đun có cell pin mặt trời khuếch tán POCl3 thông thường bị suy giảm 70% sau 96 giờ.138 Ngoài ra, Nagel và cộng sự đã so sánh sự khác biệt giữa hai phương pháp phát triển màng SiO2: oxy hóa bằng tia cực tím (UV) và oxy hóa nhiệt trực tuyến.139 Từ nghiên cứu của họ, trong khi cả cell pin mặt trời oxy hóa bằng tia UV và oxy hóa nhiệt đều thể hiện độ ổn định PID tuyệt vời, thì các cell pin mặt trời oxy hóa bằng nhiệt thể hiện hiệu suất PID vượt trội hơn so với các cell pin oxy hóa bằng tia UV.139 Hơn nữa, các cell pin oxy hóa bằng nhiệt đạt được hiệu suất tăng 0,2% so với các cell tham chiếu không oxy hóa trước khi thử nghiệm PID; nhưng hiệu suất giảm 0,3% đã được quan sát thấy ở các cell pin oxy hóa bằng tia UV.139 Ưu điểm của quy trình oxy hóa bằng tia UV là nó có thể được lắp thêm vào các dây chuyền sản xuất cell hiện có với những sửa đổi tối thiểu trong hệ thống. Họ tiếp tục chế tạo các mô-đun với các ô được oxy hóa bằng tia UV và căng chúng trong điều kiện 85 °C, 2000 V với lá nhôm trên cùng của kính phủ.139 Các mô-đun này không bị suy giảm công suất trong 6 ngày đầu tiên. Tuy nhiên, chúng mất hơn 10% công suất ban đầu sau 9 ngày.139 Điều này có thể ngụ ý rằng tác động của SiO2 bổ sung làm chậm PID-s thay vì ngăn chặn nó xảy ra. Do đó, độ tin cậy lâu dài của kỹ thuật này phải được kiểm tra. Cũng cần lưu ý rằng lớp màng SiO2 trong phần này được phát triển có chủ đích, trong khi lớp SiOx trong Hình 6 là lớp oxit tự nhiên. Lớp được phát triển có chủ đích có nhiều khả năng dày hơn lớp oxit tự nhiên.

Ngoài ra còn có một phương pháp khác được báo cáo trong tài liệu để giảm độ nhạy PID-s trước khi lắng đọng SiNx. Mehlich và cộng sự đã áp dụng một kỹ thuật cải thiện chất lượng bề mặt, sử dụng tia cực tím giàu năng lượng, để cải thiện độ tin cậy của pin mặt trời dưới ứng suất điện áp cao.109,141 Tuy nhiên, các nguyên tắc cơ bản của điện trở PID tăng lên không được thảo luận trong các ấn phẩm của họ.

6.2. Cấp độ mô-đun

6.2.1. Vật liệu thủy tinh. Thủy tinh silicat soda-vôi được sử dụng để đóng gói mô-đun trong các mô-đun loại p c-Si thông thường, do chi phí tương đối thấp và các tính chất vật lý tốt.53 Tuy nhiên, loại thủy tinh này góp phần thuận lợi vào các hiệu ứng PID trong các mô-đun PV loại p c-Si vì nó chứa một lượng đáng kể các ion kiềm (chủ yếu là Na+, v.v.) và chỉ có điện trở suất khối vừa phải. Điều này dẫn đến dòng rò rỉ cao khi các ô được phân cực với điện áp cao so với khung mô-đun. Một cách trực quan để giảm độ nhạy PID ở cấp độ mô-đun là thay thế thủy tinh silicat soda-vôi bằng thủy tinh thương mại thay thế có các tính chất vật lý tốt hơn.

Ý tưởng này đã được Kambe và cộng sự triển khai và nghiên cứu.142 Họ chế tạo các mô-đun bằng hai loại kính: kính aluminosilicate được gia cường hóa học (dày 0,85 mm) và kính soda-lime tôi nhiệt (dày 3,2 mm). Sau đó, các mô-đun được phân cực với 1000 V và chịu ứng suất dưới 60 °C, 85% RH



điều kiện, trong khi vẫn giữ cho bề mặt kính ướt. Công suất của các mô-đun có kính aluminosilicate giảm xuống dưới 5% sau 100 giờ, trong khi các mô-đun được chế tạo bằng kính soda-lime mất gần 80% công suất ban đầu trong vòng 50 giờ đầu tiên.¹⁴² Sự khác biệt lớn này về hiệu suất PID bắt nguồn từ kính. Kính aluminosilicate chứa ít hơn 3% (phần trăm trọng lượng) Na₂O và do đó điện trở suất khối cao hơn từ 2 đến 3 bậc độ lớn so với kính soda-lime.¹⁴² Kính borosilicate và kính thạch anh cũng được báo cáo là có thể ngăn ngừa PID do các đặc tính vật lý vượt trội của chúng.^{15,43,143} Tuy nhiên, việc sử dụng kính chống PID này trong chế tạo mô-đun sẽ dẫn đến chi phí cao hơn nhiều, điều này không mong muốn đối với các nhà sản xuất mô-đun.

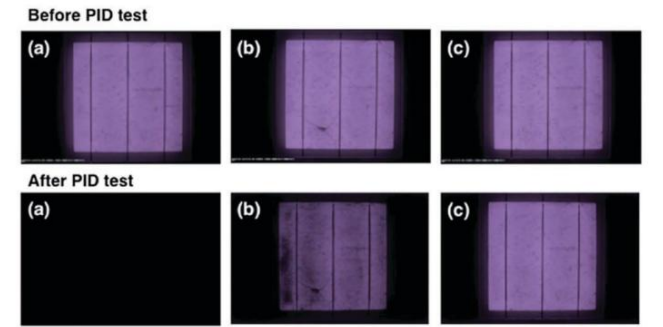
Một giải pháp thay thế là phủ một lớp lên kính để ức chế sự di chuyển của ion và do đó làm giảm dòng điện rò rỉ. Hacke và các cộng sự đã thử nghiệm độ nhạy PID bằng kính thương mại được phủ một lớp SiO₂ mỏng, lớp này chỉ cho thấy khả năng chống PID khiêm tốn.¹⁵ Hara và cộng sự đã lắng đọng một lớp TiO₂ mỏng trên mặt cell của kính soda-với phía trước để ngăn chặn sự trôi của các ion kim loại.¹⁴⁴ Các mô-đun được chế tạo bằng các tấm kính phủ TiO₂ này cho thấy khả năng bảo vệ tuyệt vời chống lại ứng suất điện áp cao (Hình 23).¹⁴⁴ Một nghiên cứu tương tự cũng được Pop và cộng sự thực hiện bằng cách sử dụng các vật liệu phủ khác nhau.¹⁴⁵ Nghiên cứu của họ cũng cho thấy khả năng chống PID được cải thiện khiêm tốn.¹⁴⁵ Tuy nhiên, hiệu suất quang học của các mô-đun này giảm đáng kể vì lớp màng bổ sung phản xạ, tán xạ và hấp thụ ánh sáng tới. Điều này dẫn đến cường độ ánh sáng mà các cell pin mặt trời hoạt động nhận được giảm và do đó làm giảm hiệu suất mô-đun. Ngoài ra còn có một phương pháp thứ ba được báo cáo trong tài liệu để giải quyết PID ở cấp độ kính trong tài liệu. Trong phương pháp này, các hiệu ứng PID được giảm thiểu bằng cách phá vỡ độ dẫn điện của bề mặt kính trong điều kiện nhiệt ẩm¹⁰⁶ bằng các dải kính¹⁴⁶ hoặc tác nhân hóa học.¹⁴⁷ 6.2.2. Vật liệu đóng gói. Trong các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn, các tế bào quang điện được nhúng vào vật liệu đóng gói, cung cấp độ ổn định nhiệt, khả năng chống ẩm, độ ổn định chống lại sự suy giảm của tia UV và bảo vệ điện cho mô-đun

Bảng 1 Tóm tắt các tính chất vật lý có liên quan của các vật liệu đóng gói được đề xuất khác nhau. Được sao chép từ tài liệu tham khảo 150. Bản quyền 2016, Elsevier

Vật liệu đóng gói	Â m lượng điện trở suất (0 cm)	Độ truyền dẫn (%)	WVTR (g (m2 ngày1))
EVA	1,0 1014	91,0	34,00
PVB	4,8 1012	91,0	40,05
TPU	2,7 1014	90,0	
Silicon	6,0 1015	98,9	
Polyolefin	2,0 1016	92,0	3,30
Ionomer	7,1 1016	93,4	0,19

linh kiện,^{53,148} Có nhiều loại vật liệu đóng gói khác nhau trên thị trường, trong đó EVA hiện là loại phổ biến nhất. Nhiều ấn phẩm đã chứng minh tầm quan trọng của vật liệu đóng gói đối với điện trở PID của mô-đun.^{19,42,59,132,149–157} Trong số tất cả các tính chất vật lý của vật liệu đóng gói, điện trở suất khối đã được xác định là thông số có liên quan nhất đến hiệu ứng PID.^{42,150,154} Điện trở suất khối cao hơn dẫn đến dòng rò rỉ nhỏ hơn đối với cùng một hiệu điện thế, giúp giảm sự tích tụ điện áp trên bề mặt tế bào quang điện đến tế bào quang điện và do đó làm giảm hiệu ứng PID.

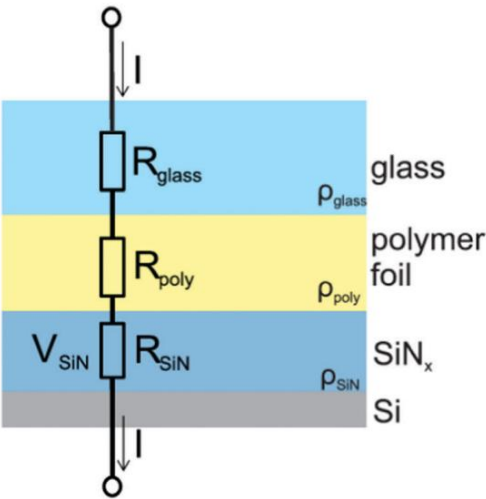
Nhìn chung, vật liệu đóng gói gốc polyolefin, ionomer và silicon có điện trở suất khối cao hơn từ 1 đến 3 bậc độ lớn so với vật liệu EVA tiêu chuẩn ở nhiệt độ môi trường, xem Bảng 1.^{42,149–151,154,158,159} Bảng 1 cũng cho thấy chúng có độ truyền dẫn cao hơn so với EVA tiêu chuẩn. Do đó, các vật liệu đóng gói này có thể được sử dụng để thay thế EVA nhằm giảm thiểu hiệu ứng PID ở cấp độ mô-đun mà không bị mất quang. Điều này đã được xác minh trong một số báo cáo,^{42,86,150,151,154,160} trong đó các mô-đun được chế tạo bằng các vật liệu này cho thấy hiệu suất cao và suy giảm công suất không đáng kể sau khi thử nghiệm PID trong môi trường khắc nghiệt. Ngoài ra, thay vì thay thế hoàn toàn EVA bằng các vật liệu khác, Kapur et al. đã thiết kế cấu trúc hai lớp của ionomer (50/100/150 mm) và EVA (450 mm) để giảm chi phí.¹⁵⁵ Đối với một số loại ionomer, cấu hình ionomer 50 mm và EVA 450 mm cho thấy độ nhạy PID cao.¹⁵⁵ Tuy nhiên, khi độ dày của ionomer tăng lên 100 mm hoặc 150 mm, thiết kế cải tiến này có thể cải thiện đáng kể khả năng chống PID.^{149,155,157} Trong những năm gần đây, vật liệu EVA chống PID cũng đã được phát triển với điện trở suất khối cao hơn (vào khoảng 10¹⁵ 0 cm) và chúng cũng cho thấy các đặc tính ức chế PID được cải thiện.^{42,149,154,155,161} Hiệu ứng nhiệt độ đối với điện trở suất khối của vật liệu đóng gói cũng phải được xem xét. Nhiệt độ hoạt động của các tấm pin mặt trời tại các cánh đồng có thể vượt quá 60 1C ở những vùng khí hậu nóng,⁵² dẫn đến điện trở suất khối của vật liệu đóng gói giảm (mối quan hệ kiểu Arrhenius).^{149,161} Điện trở suất khối của EVA tiêu chuẩn có thể giảm xuống trong khoảng từ 10¹¹ đến 10¹³ 0 cm trong điều kiện ngoài trời, không đủ để ngăn ngừa PID.^{42,149,151,161} Tuy nhiên, vật liệu đóng gói polyolefin, ionomer và silicon ít nhạy cảm hơn với nhiệt độ. Chúng vẫn sở hữu điện trở suất khối trên 10¹⁵ 0 cm trong các điều kiện liên quan đến cánh đồng, điều này khiến chúng trở nên lý tưởng hơn để giải quyết PID ở cấp độ mô-đun.^{42,149,151}



Hình 23. Ảnh EL của một mô-đun chuẩn và các mô-đun có kính phủ TiO₂ trước và sau thử nghiệm PID: (a) mô-đun chuẩn, (b) mô-đun có màng TiO₂ 50 nm được lắng đọng trên mặt cell của kính phủ và (c) mô-đun có màng TiO₂ 100 nm được lắng đọng trên mặt cell của kính phủ. Mô-đun chuẩn bị chuyển hướng nghiêm trọng sau thử nghiệm PID, trong khi mô-đun có TiO₂ 50 nm bị ảnh hưởng ít hơn và mô-đun có TiO₂ 100 nm dường như không bị ảnh hưởng. In lại từ tài liệu tham khảo 144. Bản quyền năm 2014, RSC Advances.

Hơn nữa, tỷ lệ truyền hơi ẩm (MVTR) của vật liệu đóng gói là một thông số hữu ích để đánh giá độ nhạy PID. Người ta đều biết rằng sự xâm nhập của hơi ẩm sẽ thúc đẩy sự tiến triển của PID trong các mô-đun PV.^{42,66,159} Vật liệu đóng gói có MVTR thấp hơn cung cấp khả năng bảo vệ tốt hơn chống lại sự xâm nhập của hơi ẩm và do đó có lợi cho việc giảm PID. Tính chất này sẽ trở nên quan trọng hơn khi các mô-đun được đặt trong môi trường ẩm ướt. Reid và cộng sự đã so sánh khả năng chống PID của hai vật liệu polyolefin có cùng điện trở suất khối nhưng MVTR khác nhau và kết luận rằng MVTR thấp có thể làm giảm các tác động của PID trong thời gian dài.¹⁵⁴ Tuy nhiên, MVTR cao không nhất thiết có nghĩa là vật liệu nhạy cảm với PID. Berghold và cộng sự tiết lộ rằng vật liệu đàn hồi silicon nhiệt dẻo có giá trị MVTR cao (38,5 g m² d¹) hoạt động tốt hơn nhiều dưới ứng suất điện áp cao so với EVA tiêu chuẩn (010 g m² d¹).⁴² Điều này là do điện trở suất khối của chúng khác nhau.⁴² Do đó, không đủ để đánh giá tính chất ức chế PID của vật liệu đóng gói chỉ dựa trên MVTR của chúng. Thay vào đó, cả ba tính chất (điện trở suất khối, hệ số nhiệt độ và WVTR) đều phải được xem xét cẩn thận khi lựa chọn vật liệu đóng gói phù hợp cho các mô-đun PV không có PID. Hơn nữa, chi phí sản xuất và các tính năng độ bền khác như độ bám dính, tính chất cơ học, khả năng hấp thụ tia UV cũng cần được cân nhắc cẩn thận. Các vật liệu đóng gói chống PID này phải có khả năng cạnh tranh về chi phí để giành được thị phần.

Các biện pháp đối phó PID ở cả cấp độ ô và mô-đun có thể được giải thích một cách nhất quán bằng mô hình bộ chia điện áp.^{134,135} Mô hình này dựa trên giả định nổi tiếng rằng cường độ điện trường trong lớp SiNx là động lực thúc đẩy sự tiến hóa của PID-s.¹³⁴ Một mô hình đơn giản hóa cho đường dẫn dòng rò rỉ chính bao gồm kết nối nối tiếp ba điện trở ômi, một điện trở cho mỗi lớp (kính, lá nhôm đóng gói, lớp phủ SiNx AR trên tế bào quang điện).¹³⁴ Trong phép tính gần đúng đầu tiên, dòng rò rỉ giống nhau ở tất cả các lớp (đường dẫn 1 trong Hình 2, xem Mục 2).



Hình 24. Lớp chồng lên nhau ở mặt trước của mô-đun năng lượng mặt trời c-Si biểu diễn bộ chia điện áp khi có dòng điện rò rỉ. Mỗi lớp được mô phỏng như một điện trở đơn.

Theo Hình 24, điện áp trên lớp SiNx có thể được ước tính gần đúng bằng:¹³⁴

$$V_{SiNx} \approx \frac{R_{SiNx}}{R_{glass} + R_{polymer} + R_{SiNx}} V_{ext} \tag{6}$$

trong đó Vext là điện áp bên ngoài tồn tại giữa bề mặt của kính trước và ô Si được đóng gói tương ứng trong điều kiện ứng suất điện áp cao. Với phương trình này, các hiệu ứng của lớp kính hoặc polyme có điện trở cao, cũng như lớp SiNx có độ dẫn điện cao, mỗi lớp dẫn đến sự ổn định chống lại PID-s bằng cách giảm điện áp trên màng SiNx, có thể được tính toán bán định lượng.

6.3. Mức hệ thống

Trong hệ thống PV, biến tần là bộ phận thiết yếu của hệ thống cân bằng (BOS), có chức năng chuyển đổi đầu ra DC thành đầu ra AC. Dựa trên cấu trúc, bộ biến tần có thể được phân loại thành hai nhóm chính: bộ biến tần dựa trên máy biến áp và bộ biến tần không có máy biến áp.^{162,163} Đối với công nghệ bộ biến tần dựa trên máy biến áp, cực hệ thống âm hoặc dương phải được nối đất, dẫn đến pin mặt trời có điện áp dương hoặc điện áp âm so với đất.^{12,13} Như đã thảo luận trong Mục 3.1.1 và 5.3, các mô-đun PV c-Si loại p có điện áp âm dễ bị PID, nhìn chung có hại hơn cho hiệu suất của mô-đun ngoài thực địa. Do đó, một giải pháp đơn giản cho PID đối với các hệ thống PV có bộ biến tần dựa trên máy biến áp là nối đất cực hệ thống âm. Điều này sẽ đảm bảo rằng tất cả các mô-đun sẽ có điện áp dương, loại bỏ PID trong các mô-đun PV c-Si loại p thông thường.

Tuy nhiên, có một xu hướng mạnh mẽ trong ngành công nghiệp PV là sử dụng các cấu trúc không có máy biến áp.^{162,164–166} Biến tần không có máy biến áp không chỉ nhỏ gọn và nhẹ mà quan trọng hơn là công nghệ này còn làm tăng hiệu suất chuyển đổi của hệ thống PV từ 1% đến 2%.¹⁶² Đối với biến tần không có máy biến áp, hệ thống PV không có cách ly điện hóa và cũng không yêu cầu nối đất.

Cấu trúc này tạo ra điện thế nổi, nghĩa là một số cell bị phân cực âm và một số cell khác bị phân cực dương so với mặt đất.^{12,13} Do đó, giải pháp PID-s cho các hệ thống PV sử dụng bộ biến tần dựa trên máy biến áp không áp dụng được cho những hệ thống sử dụng bộ biến tần không có máy biến áp. Một biện pháp khắc phục vấn đề PID-s cho các hệ thống có bộ biến tần không có máy biến áp có thể là áp dụng điện áp phân cực ngược (ví dụ: +1000 V) cho các mô-đun vào ban đêm.^{12,13,137} Điều này có thể đẩy nhanh quá trình phục hồi của các mô-đun PV và tái tạo hiệu suất PV bị mất vào ban ngày. Phương pháp này cũng áp dụng được cho các hệ thống có bộ biến tần dựa trên máy biến áp. Tuy nhiên, nhược điểm là nó yêu cầu các thành phần điện tử bổ sung. Một giải pháp cải tiến khác là khái niệm bus DC ảo cho bộ biến tần không có máy biến áp.¹⁶⁷ Cấu trúc này cho phép cực hệ thống âm được nối đất ảo và do đó chuyển điện thế của các tế bào năng lượng mặt trời sang cực dương; do đó, các mô-đun PV có thể được bảo vệ chống lại PID-s.

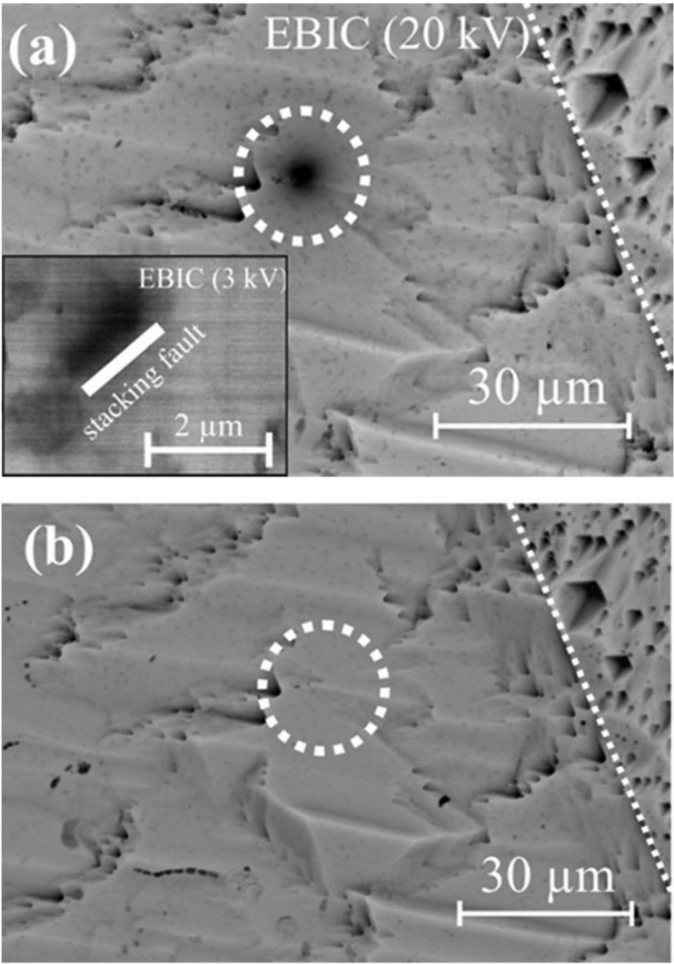
Ngành công nghiệp PV cũng ngày càng quan tâm đến việc sử dụng bộ biến tần vi mô. Các bộ biến tần này được đặt trên mọi mô-đun sao cho điện áp của mỗi mô-đun được tối ưu hóa đến điện áp công suất tối đa,¹⁶⁸ trong phạm vi từ 30 V đến 40 V cho

các mô-đun PV c-Si thông thường. Động lực cho PID trong lĩnh vực này sau đó được giảm xuống và các mô-đun có thể cho thấy độ nhạy ở điện áp chuỗi cao hơn (600 V, 1000 V, 1500 V) có thể hoạt động tốt đối với PID trong thời gian dài ở điện áp hệ thống thấp hơn nhiều khi được điều khiển bằng bộ vi biến tần.⁵⁹

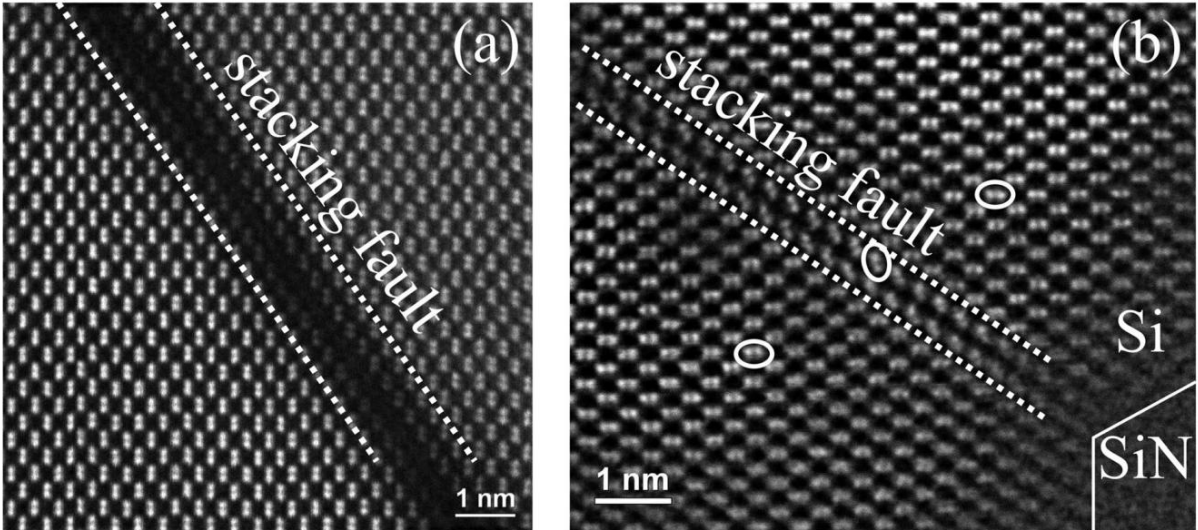
7. Phục hồi PID trong các mô-đun PV c-Si tiêu chuẩn

PID-s gây ảnh hưởng xấu đến hiệu suất của mô-đun PV c-Si loại p. Tuy nhiên, khác với sự ăn mòn TCO của các mô-đun màng mỏng, người ta thấy rằng nó có thể đảo ngược.^{12,13} Cơ chế cơ bản để phục hồi PID-s trong các mô-đun PV c-Si loại p thông thường đã được Lausch và cộng sự kiểm tra rộng rãi.⁷² Trong Hình 25, hình ảnh EBIC của một shunt PID trước và sau khi phục hồi được hiển thị. Vị trí PID-shunted đã biến mất sau 2,5 giờ phục hồi nhiệt trong môi trường 250 1C. Sự khuếch tán ra ngoài của các nguyên tử Na từ các lỗi xếp chồng đã được đề xuất là nguyên nhân gây ra sự tái tạo hiệu suất PV. Người ta nhận thấy rằng các nguyên tử Na di chuyển chậm ra khỏi các lỗi xếp chồng vào lớp oxit do sự chênh lệch nồng độ sau

quá trình phân hủy đã dừng lại.⁷² Giả định này được hỗ trợ thêm bởi cuộc điều tra của họ về các vị trí PID-shunted ở cấp độ nguyên tử bằng cách sử dụng trường tối hình khuyên góc cao (HAADF) STEM.^{71,72} Trước quá trình phục hồi, cấu trúc tinh thể của lỗi xếp chồng không thể được hình dung rõ ràng (vùng tối xung quanh lỗi xếp chồng, Hình 26a), vì cấu trúc silicon bị nhiễu loạn mạnh, rất có thể là do các nguyên tử Na trong ma trận Si.^{71,72} Tuy nhiên, một lỗi xếp chồng sạch đã được giữ lại (Hình 26b) sau quá trình phục hồi và sự rối loạn của cấu trúc tinh thể có thể được hình dung dễ dàng, cho thấy các nguyên tử Na đã khuếch tán ra khỏi lỗi xếp chồng.^{71,72} Khi các nguyên tử Na khuếch tán ra khỏi lỗi xếp chồng, các đặc tính điện tử của pin mặt trời được phục hồi.⁷² Những phát hiện này một lần nữa xác nhận mô hình lỗi xếp chồng cho PID-s trong các mô-đun PV c-Si loại p. Hơn nữa, trước đây đã có thảo luận rằng lỗi xếp chồng có thể không tồn tại trong Si trước ứng suất PID,⁸³ nhưng sau khi phục hồi, lỗi xếp chồng bên ngoài không biến mất trong một mẫu được báo cáo.^{63,71} Điều này có thể ngụ ý rằng các ô/mô-đun được phục hồi có thể xuống cấp nhanh hơn trong vòng ứng suất PID thứ hai vì lỗi xếp chồng đã có trong Si. Tuy nhiên, dữ liệu thực nghiệm cho thấy hiệu ứng ngược lại. Sau khi phục hồi công suất từ PID-s, theo dõi với mức ứng suất PID-s cao hơn hoặc dài hơn



Hình 25 Các phép đo EBIC (20 kV) tại vị trí phản luồng PID trước (a) và sau (b) quá trình phục hồi nhiệt. PID-s biến mất sau khi phục hồi. Phần chèn trong (a) cho thấy khuyết tật PID-s trước khi phục hồi ở điện áp tăng tốc electron thấp (3 kV) và do đó có độ phân giải ngang tăng lên. Đường chấm chấm biểu thị ranh giới hạt để hướng dẫn cho mắt. In lại từ tài liệu tham khảo 72. Bản quyền năm 2014, Elsevier.



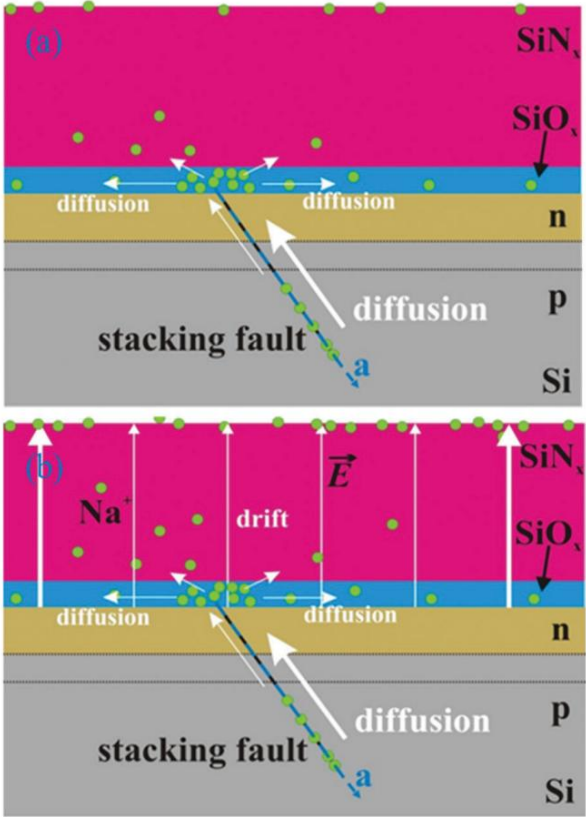
Hình 26 Nghiên cứu STEM HAADF về đứt gãy xếp chồng được trang trí bằng Na trước (a) và sau (b) phục hồi nhiệt. Trước khi phục hồi, đứt gãy xếp chồng bị xáo trộn mạnh, gây ra vùng tối xung quanh đứt gãy xếp chồng. Sau khi phục hồi, có thể dễ dàng xác định được sự hỗn loạn của đứt gãy xếp chồng, điều này có thể được giải thích bằng sự khuếch tán ra ngoài của Na trong quá trình phục hồi. In lại từ tài liệu tham khảo 72. Bản quyền năm 2014, Elsevier.

dẫn đến tổn thất công suất ít hơn so với lần ứng dụng ứng suất đầu tiên.^{32,43} Cần nghiên cứu thêm để giải thích những quan sát này.

Thu hồi nhiệt, thu hồi điện áp phân cực ngược và sự kết hợp của chúng đã được xác định là có thể phục hồi hiệu suất của các mô-đun PV c-Si loại p.^{12,13} Các kỹ thuật này cũng có thể áp dụng cho các công nghệ PV khác (ví dụ: CIGS).^{91,137} Thu hồi nhiệt là quá trình tái tạo được kích hoạt bằng nhiệt độ của công suất bị mất do PID. Tốc độ quá trình tái tạo tăng theo nhiệt độ mô-đun,^{62,116,120,122,169} nhưng không quan sát thấy độ ẩm làm tăng tốc độ phục hồi.¹²⁰ Taubitz và cộng sự quan sát thấy rằng quá trình tái tạo giống như Arrhenius.^{62,169} Hành vi này phù hợp với mô hình khuếch tán ra, trong đó giả định rằng các nguyên tử Na khuếch tán ra khỏi các lỗi xếp chồng do sự chênh lệch nồng độ (Hình 27a).⁷² Người ta đều biết rằng khuếch tán là một quá trình được kiểm soát nhiệt độ;¹¹⁴ do đó, nhiệt độ tăng sẽ dẫn đến tốc độ phục hồi nhanh hơn. Ngay cả ở nhiệt độ phòng, các mô-đun bị hỏng PID vẫn có thể lấy lại hầu hết công suất ban đầu của chúng ở STC sau một thời gian dài ổn định.^{137,143,170}

Điều này chỉ ra rằng các mô-đun bị ảnh hưởng bởi PID trong các trường hợp có thể phục hồi vào ban đêm khi không có điện áp phân cực nào được áp dụng. Ngoài ra, quá trình tái sinh cũng bị ảnh hưởng bởi mức độ hư hỏng trước PID.¹²⁰ Hattendorf và cộng sự đã ứng suất bốn mô-đun PV c-Si loại p kích thước đầy đủ ở các mức độ khác nhau trong cùng điều kiện khí hậu và với các điện áp phân cực khác nhau, trước khi phục hồi nhiệt.¹²⁰ Sau đó, các mô-đun bị ảnh hưởng bởi PID này đã được phục hồi trong điều kiện 70 °C và 50% RH. Người ta thấy rằng quá trình phục hồi phụ thuộc vào lịch sử PID của mô-đun;¹²⁰ do đó, lượng hư hỏng PID trước đó đóng vai trò quan trọng.

Một phương pháp phục hồi khác là áp dụng điện áp dự phòng (ví dụ +1000 V) cho các tế bào năng lượng mặt trời trong các mô-đun bị hỏng PID.^{12,13,137,143,170,171} Điều này một lần nữa có thể được giải thích bằng mô hình khuếch tán ra (Hình 27b).⁷² Khi áp dụng điện áp ngược, Na⁺ bị đẩy ra khỏi giao diện, tạo ra một



Hình 27 Sơ đồ quy trình đề xuất để thu hồi nhiệt (a) và thu hồi điện (b). Các chấm màu xanh lá cây biểu thị loài Na. Na khuếch tán ra khỏi các đứt gãy xếp chồng, dẫn đến tái tạo năng lượng. Chuyển động của Na được đánh dấu bằng các mũi tên màu trắng. Được sao chép từ tài liệu tham khảo 72. Bản quyền năm 2014, Elsevier.

gradient nồng độ của Na giữa các lỗi xếp chồng được trang trí bằng Na và giao diện. Kết quả là, quá trình khuếch tán

sẽ được tăng tốc. Thậm chí, người ta còn quan sát thấy khả năng phục hồi công suất gần 100% tại STC,12,13 khi các mô-đun PV loại p c-Si chịu điện thế dương 1000 V trong thời gian dưới 100 giờ. Hơn nữa, kỹ thuật này đã được áp dụng trong một số sản phẩm công nghiệp (ví dụ hộp bù PV của SMA172 và hộp PID của iLUMEN173) để ngăn ngừa các hiệu ứng PID trong điều kiện thực tế. Các sản phẩm này áp dụng điện áp ngược (ví dụ +1000 V) vào chuỗi mô-đun vào ban đêm để phục hồi công suất PV bị mất vào ban ngày, do đó ngăn ngừa các hiệu ứng PID trong thực tế.

Tuy nhiên, phương pháp áp dụng điện áp ngược vào ban đêm khi không có ánh nắng mặt trời để làm khô các mô-đun bảo hòa cũng gây ra ứng suất dẫn đến dòng rò rỉ tăng cao theo hướng ngược lại, theo thời gian có thể dẫn đến sự xuống cấp của mô-đun, chẳng hạn như do ăn mòn điện hóa.105

Quá trình phục hồi có thể không được bắt đầu ngay lập tức sau khi điện áp phân cực dừng lại. Taubitz và cộng sự đã quan sát thấy rằng điện trở phân luồng của một mô-đun nhỏ bị ảnh hưởng bởi PID tiếp tục giảm ngay cả sau khi điện áp dừng lại,62,169 và xác định rằng có một pha chuyển tiếp giữa quá trình suy thoái và phục hồi, dựa trên các phép đo điện trở phân luồng của họ (Hình 28).62,169 Điều này có thể được giải thích bằng một quá trình khuếch tán do gradient nồng độ của Na+ tiếp tục vào Si, kết thúc khi gradient nồng độ tiêu tan đủ. Thời gian của pha chuyển tiếp cũng được phát hiện là phụ thuộc vào nhiệt độ (giống như Arrhenius).169 Tuy nhiên, pha chuyển tiếp không được quan sát thấy trong một mẫu khác. Có thể là do lịch sử PID khác nhau của chúng, nhưng nguyên nhân gốc rễ không được điều tra trong các ấn phẩm.169 Hơn nữa, việc phục hồi không hoàn toàn hiệu suất PV ở mức độ chiếu xạ thấp và điện trở phân luồng cũng đã được báo cáo, ngay cả sau thời gian ổn định dài và công suất phục hồi gần như hoàn toàn tại STC.143,170 Oh và cộng sự đã theo dõi quá trình phục hồi

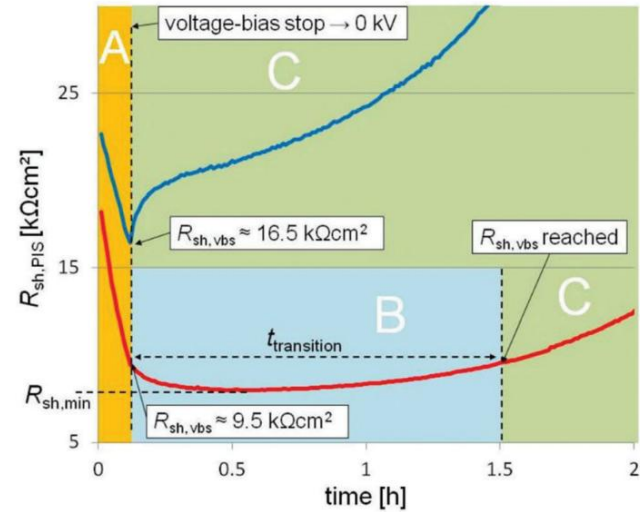
(nhiệt độ phòng và không có điện áp ngược) của mẫu bị ảnh hưởng bởi PID trong hơn 200 ngày, nhưng không thu được sự phục hồi hoàn toàn.143,170 Người ta nghi ngờ rằng Na dư vẫn còn trong lõi xếp chồng và gây ra sự phục hồi không hoàn toàn.143,170 Tuy nhiên, giả định này vẫn chưa được xác minh bằng bằng chứng thực nghiệm. Do đó, cần có thêm công việc trong tương lai để hiểu rõ hơn về quá trình phục hồi.

8. Tóm tắt

Trong bài báo này, tiến trình nghiên cứu mới nhất về PID của các mô-đun PV được xem xét. Do chênh lệch điện thế cao, năm đường dẫn dòng rò đã được xác định trong các mô-đun PV.

Tầm quan trọng tương đối của chúng phụ thuộc vào các điều kiện môi trường cũng như vật liệu đóng gói. Đã có những tiến bộ đáng kể trong việc hiểu các nguyên lý cơ bản gây ra tình trạng mất hiệu suất PV do PID trong các loại mô-đun khác nhau. Cho dù đó là công nghệ màng mỏng hay công nghệ dựa trên c-Si, sự di chuyển của ion natri (Na+) đóng vai trò quan trọng trong quá trình tiến hóa của PID. Ăn mòn điện hóa của lớp TCO, hiệu ứng phân cực bề mặt và PID-shunting (PID-s) lần lượt là ba trong số các cơ chế PID phổ biến nhất trong các mô-đun màng mỏng, mô-đun c-Si loại n và mô-đun c-Si loại p tiêu chuẩn. Đặc biệt, mô hình lõi xếp chồng được trang trí bằng Na cung cấp lời giải thích cho các hiệu ứng PID thường được quan sát thấy trong các mô-đun c-Si loại p. Có bốn loại phương pháp thử nghiệm để đánh giá độ nhạy của PID ở cả cấp độ ô và mô-đun. Ở cấp độ mô-đun, các thử nghiệm PID buổi và PID AI thường được sử dụng, trong khi ở cấp độ ô, độ nhạy của PID có thể được kiểm tra bằng cách thiết lập PID phóng điện corona hoặc ứng dụng điện áp phân cực trên một chồng lớp giống như mô-đun.

Phần lớn các nghiên cứu PID được thực hiện cho đến nay đều liên quan đến các mô-đun c-Si loại p tiêu chuẩn, vì chúng chiếm ưu thế trên thị trường PV hiện tại. Sự tiến triển của PID trong các mô-đun c-Si tiêu chuẩn phụ thuộc vào điện áp, độ ẩm và nhiệt độ được áp dụng. Dòng rò rỉ cho thấy mối quan hệ kiểu Arrhenius với nhiệt độ. Độ ẩm và điện áp được áp dụng cũng ảnh hưởng đến PID theo nhiều cách. Một số mô hình động học đã được đề xuất để dự đoán tốc độ PID trong các mô-đun c-Si loại p với dữ liệu khí tượng. Nhiều phương pháp khác nhau cũng đã được tìm thấy để ngăn ngừa hiệu quả PID trong các mô-đun c-Si loại p. Ở cấp độ ô, điện trở PID có thể được cải thiện bằng cách: (1) điều chỉnh tỷ lệ Si/N của lớp phủ AR lên giá trị cao hơn để tăng độ dẫn điện; (2) phát triển một lớp xen kẽ (SiO2) giữa lớp phủ AR Si và SiNx ; và (3) làm sạch bề mặt ô bằng tia UV giàu năng lượng trước khi lắng đọng SiNx. Ở cấp độ mô-đun, PID có thể được ngăn ngừa bằng cách sử dụng vật liệu đóng gói hoặc/và tấm kính có điện trở suất khối cao. Ở cấp độ hệ thống, PID có thể được giảm thiểu bằng cách đảm bảo rằng mạch hoạt động của các mô-đun PV không bị phân cực âm so với mặt đất hoặc áp dụng điện áp ngược vào ban đêm. Ngoài ra, nó có thể được ngăn ngừa hiệu quả bằng cách áp dụng các bộ vi biến tần. Hơn nữa, PID-s trong các mô-đun PV c-Si loại p được phát hiện là có thể đảo ngược; khả năng phục hồi nhiệt, phục hồi điện áp phân cực ngược và sự kết hợp của chúng đã được chứng minh là có thể tái tạo



Hình 28 Các phép đo Rsh (chuẩn hóa) của hai mô-đun một tế bào trong quá trình phân hủy và tái sinh. Một mô-đun thể hiện pha chuyển tiếp (được đánh dấu bằng màu đỏ) trong khi mô-đun kia thì không (được đánh dấu bằng màu xanh). Pha phân luồng (A), pha chuyển tiếp (B) và pha tái sinh (C) được hiển thị bằng các màu khác nhau. Giá trị Rsh ban đầu (chuẩn hóa) của cả hai mô-đun đều lớn hơn 1 MΩ cm2, giá trị này không được hiển thị trong hình. In lại từ tài liệu tham khảo 62. Bản quyền năm 2013, WIP.

mất hiệu suất PV. Cần lưu ý rằng hầu hết các phát hiện từ các mô-đun loại p-c-Si cũng có thể áp dụng cho các loại công nghệ PV khác (ví dụ như công nghệ màng mỏng). Ví dụ, PID trong các mô-đun màng mỏng cũng có thể được ngăn ngừa bằng cách sử dụng chất đóng gói ionomer.

Nhìn chung, hiểu biết về PID trong các mô-đun PV đã được nâng cao thông qua các nghiên cứu liên tục trong những năm gần đây. Dự kiến sẽ có nhiều nghiên cứu liên quan đến PID hơn nữa để cung cấp thông tin chi tiết về những câu hỏi chưa có lời giải đáp vẫn chưa được hiểu đầy đủ. Sau đây là một số câu hỏi chưa có lời giải: (1) có rất ít hiểu biết về cấu trúc điện tử của các lỗi xếp chồng nhiễm natri (Na) được cho là do sự phân luồng của mối nối n+ p trong các ô c-Si nối trước thông thường trong một số báo cáo; (2) sự phục hồi một phần công suất thường được quan sát thấy đối với PID của loại phân luồng (PID-s) vẫn chưa được hiểu đầy đủ về mặt cơ chế; (3) mặc dù có một số mối tương quan đã được công bố giữa các thử nghiệm trong buồng và kết quả thực địa, nhưng cần phải nghiên cứu thêm để liên hệ kết quả thử nghiệm với độ bền của PID trong các điều kiện khí hậu cụ thể để có thể thiết kế các mô-đun chống PID phù hợp; và (4) các thiết kế và vật liệu chống PID phù hợp có các yêu cầu về hiệu suất, độ bền và chi phí vẫn đang được khám phá. Quan trọng hơn, ngành công nghiệp PV đang phải đối mặt với thách thức lớn trong việc ngăn ngừa PID của các mô-đun PV, vì nhiều giải pháp được đề xuất hoặc làm giảm hiệu quả hoặc làm tăng chi phí. Vẫn còn một chặng đường dài để phát triển các công nghệ PV hoàn toàn không có PID với chi phí thấp.

Lời cảm ơn

Công trình tại Viện nghiên cứu năng lượng mặt trời Singapore (SERIS) được tài trợ bởi Đại học quốc gia Singapore (NUS) và Quỹ nghiên cứu quốc gia Singapore thông qua Hội đồng phát triển kinh tế Singapore. Công trình tại Phòng thí nghiệm năng lượng tái tạo quốc gia (Peter Hacke và Steven P. Harvey) được Bộ năng lượng Hoa Kỳ hỗ trợ theo Hợp đồng số DE-AC36-08G028308. Nguồn tài trợ được cung cấp bởi chương trình SuNLAMP của Văn phòng hiệu quả năng lượng và năng lượng tái tạo.

Tài liệu tham khảo

- 1 Solar Power Europe, Triển vọng thị trường năng lượng mặt trời toàn cầu 2016-2020, 2016.
- 2 IEA, Bức tranh tổng quan về PV toàn cầu năm 2015, OECD/IEA, Paris, 2016.
- 3 IEA, Lộ trình công nghệ: năng lượng quang điện mặt trời, OECD/IEA, Paris, 2014.
- 4 DC Jordan và SR Kurtz, Tiến trình. Quang điện, 2013, 21, 12-29.
- 5 D. Polverini, M. Field, E. Dunlop và W. Zsaiman, Tiến trình. Quang điện, 2013, 21, 1004-1015.
- 6 A. Pozza và T. Sample, Prog. Photovoltaics, 2015, 24, 368-378.
- 7 T. Ishii, T. Takashima và K. Otani, Tiến trình. Quang điện, 2011, 19, 170-179.

- 8 V. Sharma và S. Chandel, Năng lượng bền vững tái tạo Sửa đổi, 2013, 27, 753-767.
- 9 A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, CM Ke be ´, PA Ndiaye và V. Sambou, Sol. Năng lượng, 2013, 96, 140-151.
- 10 M. Munoz, M. Alonso-Garcia, N. Vela và F. Chenlo, Sol. Năng lượng, 2011, 85, 2264-2274.
- 11 C. Dechthummarong, B. Wiengmoon, D. Chenvidhya, C. Jivacate và K. Kirtikara, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2010, 94, 1437-1440.
- 12 J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson và M. Winkler, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 25, Valencia, Tây Ban Nha, 2010, trang 3753-3759.
- 13 S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne và J. Berghold, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 35, Honolulu, HI, Hoa Kỳ, 2010, trang 2817-2822.
- 14 P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, D. Trudell, N. Bosco, S. Johnston và S. Kurtz, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 35, Honolulu, HI, Hoa Kỳ, 2010, trang 000244-000250.
- 15 P. Hacke, M. Kempe, K. Terwilliger, S. Glick, N. Call, S. Johnston, S. Kurtz, I. Bennett và M. Kloos, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 25, Valencia, Tây Ban Nha, 2010, trang 3760-3765.
- 16 J. Berghold, S. Koch, S. Pingel, S. Janke, A. Ukar, P. Grunow và T. Shioda, Biên bản báo cáo của SPIE, San Diego, CA, Hoa Kỳ, tập. 9563, trang. 95630A.
- 17 E. Schneller, NS Shiradkar và NG Dhere, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 40, Denver, CO, Hoa Kỳ, 2014, trang 3216-3219.
- 18 R. Malachi, S. Scho¨nberger, J. Mayer và M. Kasemann, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29, Amsterdam, Hà Lan, 2014, tr. 2323-2326.
- 19 G. Mon, L. Wen, R. Ross và D. Adent, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 18, Las Vegas, NV, Hoa Kỳ, 1985, trang 1179-1185.
- 20 G. Mon và R. Ross, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 18, Las Vegas, NV, Hoa Kỳ, 1985, trang 1142-1149.
- 21 D. Carlson, R. Romero, F. Willing, D. Meakin, L. Gonzalez, R. Murphy, H. Moutinho và M. Al Jassim, Tiến trình. Quang điện, 2003, 11, 377-386.
- 22 C. Osterwald, T. McMahon và J. Del Cueto, Sol. Năng lượng Mater. Sol. Cells, 2003, 79, 21-33.
- 23 J. Del Cueto và T. McMahon, Tiến trình. Quang điện, 2002, 10, 15-28.
- 24 NG Dhere, SM Bet và HP Patil, Biên bản Hội nghị thế giới lần thứ 3 về chuyển đổi năng lượng quang điện, Osaka, Nhật Bản, 2003, tập 2, trang 1923-1926.
- 25 NG Dhere, MB Pandit, AH Jahagirdar, VS Gade, AA Kadam, SS Kulkarni, NS Mehta, SM Bet và HP Patil, Kỳ yếu của Cuộc họp đánh giá chương trình NCPV, Lakewood, CO, USA, 2001, trang 313-314.



26 T. McMahon và G. Jorgensen, Biên bản cuộc họp đánh giá chương trình NCPV năm 2001, Lakewood, CO, Hoa Kỳ, 2001, trang 137-138.

27 R. Swanson, M. Cudzinovic, D. DeCeuster, V. Desai, J. Juergens, N. Kaminar, W. Mulligan, L. Barbarosa, D. Rose và D. Smith, Biên bản Hội nghị Khoa học và Kỹ thuật Quang điện Quốc tế lần thứ 15, Thượng Hải, Trung Quốc, 2005, trang 410-411.

28 I. Rutschmann, Photon, 2008, 1, 122-123.

29 I. Rutschmann, Photon, 2008, 8, 124-125.

30 P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, S. Glick, D. Jordan, S. Johnston, M. Kempe và S. Kurtz, Biên bản Hội nghị Vật lý Độ tin cậy Quốc tế IEEE năm 2013 (IRPS), Anaheim, CA, Hoa Kỳ, 2013, tr. 4B.1.1-4B.1.5.

31 P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, G. Perrin, B. Sekulic và S. Kurtz, Tiến trình quang điện, 2014, 22, 775-783.

32 P. Hacke, K. Terwilliger, R. Smith, S. Glick, J. Pankow, M. Kempe, SKI Bennett và M. Kloos, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 37, Seattle, WA, Hoa Kỳ, 2011, trang 000814-000820.

33 V. Naumann, C. Hagendorf, S. Grosser, M. Werner và J. Bagdahn, Energy Procedia, 2012, 27, 1-6.

34 V. Naumann, D. Lausch, S. Großer, M. Werner, S. Swatek, C. Hagendorf và J. Bagdahn, Energy Procedia, 2013, 33, 76-83.

35 V. Naumann, D. Lausch, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, J. Bauer, A. Hähnel, O. Breitenstein, S. Großer và J. Bagdahn, Phys. Trạng thái Solidi RRL, 2013, 7, 315-318.

36 P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, S. Glick, D. Jordan, S. Johnston, M. Kempe và S. Kurtz, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 38, Austin, TX, Hoa Kỳ, 2012, trang 1-8.

37 M. Gossila, T. Hälker, S. Krull, F. Rakusa, F. Roth và I. Sinicco, Proc. SPIE, San Diego, CA, Hoa Kỳ, 2010, tập 7773, tr.777300.

38 S. Voswinckel, P. Manz, C. Schmidt, V. Wesselak, E. Fokuhl và B. Trautmann, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, trang 2478-2483.

39 TM Walsh, Z. Xiong, YS Khoo, AA Tay và AG Aberle, Energy Procedia, 2012, 15, 388-395.

40 Z. Xiong, TM Walsh và AG Aberle, Energy Procedia, 2011, 8, 384-389.

41 V. Fjällström, P. Salome', A. Hultqvist, M. Edoff, T. Jarmar, B. Aitken, K. Zhang, K. Fuller và CK Williams, Tạp chí quang điện IEEE, 2013, 3, 1090-1094.

42 J. Berghold, S. Koch, B. Frohmann, P. Hacke và P. Grunow, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 40, Denver, CO, Hoa Kỳ, 2014, tr. 1987-1992.

43 M. Schütze, M. Jungha'nel, M. Koentopp, S. Cwikla, S. Friedrich, J. Müller và P. Wawer, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 37, Seattle, WA, Hoa Kỳ, 2011, trang 000821-000826.

44 NG Dhere, NS Shiradkar và E. Schneller, Tạp chí IEEE của Quang điện, 2014, 4, 654-658.

45 MB Koentopp, M. Krober và C. Taubitz, Tạp chí IEEE Quang điện, 2016, 6, 252-257.

46 P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, G. Tamizhmani, S. Tatapudi, C. Stark, S. Koch, T. Weber, J. Berghold và S. Hoffmann, Tạp chí quang điện IEEE, 2015, 5, 94-101.

47 P. Hacke, P. Burton, A. Hendrickson, S. Spataru, S. Glick và K. Terwilliger, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 42, New Orleans, LA, Hoa Kỳ, 2015, trang 1-4.

48 NG Dhere, NS Shiradkar và E. Schneller, Appl. Vật lý Thư, 2014, 104, 112103.

49 M. Schütze, M. Jungha'nel, O. Friedrichs, R. Wichtendahl, M. Scherff, J. Müller và P. Wawer, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 26, Hamburg, Đức, 2011, tr. 3097-3102.

50 N. Shiradkar, E. Schneller và N.G. Dhere, Proc. SPIE, San Diego, CA, Hoa Kỳ, 2013, tập. 8825, trang. 88250G.

51 S. Hoffmann và M. Koehl, Tiến trình. Quang điện, 2014, 22, 173-179.

52 S. Hoffmann và M. Köhl, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, trang 3336-3339.

53 A. McEvoy, T. Markvart, L. Castaner, T. Markvart và L. Castaner, Sổ tay thực hành về quang điện: nguyên tắc cơ bản và ứng dụng, Elsevier, 2003.

54 T. McMahon, Tiến trình quang điện, 2004, 12, 235-248.

55 NG Dhere, VV Hadagali và SM Bet, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 19, Paris, Pháp, 2004.

56 S. Voswinckel, V. Wesselak, E. Fokuhl, C. Schmidt và K. Watzlawik, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 31, Hamburg, Đức, 2015, tr. 2508-2512.

57 P. Manz, V. Wesselak, S. Voswinckel, B. Trautmann, E. Fokuhl và C. Schmidt, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29, Amsterdam, Hà Lan, 2014, tr. 3194-3199.

58 P. Lechner, S. Hummel, D. Geyer và H. Mohring, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, tr. 2810-2815.

59 H. Nagel, A. Metz và K. Wangemann, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 26, Hamburg, Đức, 2011, trang 3107-3112.

60 NG Dhere, SA Pethe và A. Kaul, Proc. SPIE, San Diego, CA, Hoa Kỳ, 2011, tập. 8112, trang. 811200.

61 G. Mathiak, S. Kammer, M. Schweiger và W. Herrmann, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, trang 3332-3335.

62 C. Taubitz, M. Schütze và MB Koentopp, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27, Frankfurt, Đức, 2012, trang 3172-3176.

63 D. Lausch, V. Naumann, O. Breitenstein, J. Bauer, A. Graff, J. Bagdahn và C. Hagendorf, Tạp chí IEEE về quang điện, 2014, 4, 834-840.

64 J. Bauer, V. Naumann, S. Großer, C. Hagendorf, M. Schütze và O. Breitenstein, Phys. Trạng thái Solidi RRL, 2012, 6, 331-333.

65 V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer và J. Bagdahn, Sol. Vật liệu năng lượng. Sol. Cells, 2014, 120, 383-389.

66 S. Koch, C. Seidel, P. Grunow, S. Krauter và M. Schoppa, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 26, Hamburg, Đức, 2011, trang 1726-1731.

67 UK Krieger và WA Lanford, J. Chất rắn không tinh thể, 1988, 102, 50-61.

68 V. Naumann, D. Lausch và C. Hagendorf, Energy Procedia, 2015, 77, 397-401.

69 A. Raykov, H. Hahn, KH Stegemann, M. Kutzer, O. Storbeck, H. Neuhaus và W. Bergholz, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, tr. 2998-3002.

70 P. Saint-Cast, H. Nagel, D. Wagenmann, J. Schön, P. Schmitt, C. Reichel, SW Glunz, M. Hofmann, J. Rentsch và R. Preu, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, trang 789-792.

71 V. Naumann, D. Lausch, A. Hähnel, O. Breitenstein và C. Hagendorf, Phys. Trạng thái Solidi C, 2015, 12, 1103-1107.

72 D. Lausch, V. Naumann, A. Graff, A. Hähnel, O. Breitenstein, C. Hagendorf và J. Bagdahn, Energy Procedia, 2014, 55, 486-493.

73 B. Ziebarth, M. Mrovec, C. Elsaesser và P. Gumbsch, Tạp chí Y học ứng dụng, 2014, 116, 093510.

74 S. Steingrube, O. Breitenstein, K. Ramspeck, S. Glunz, A. Schenk và PP Altermatt, J. Appl. Vật lý, 2011, 110, 014515.

75 SP Harvey, J. Aguiar, P. Hacke, H. Guthrey, S. Johnston và M. Al-Jassim, Tạp chí IEEE về quang điện, 2016, 6, 1440-1445.

76 A. Armigliato, M. Servidori, S. Solmi và I. Vecchi, J. Appl. Sinh lý học, 1977, 48, 1806-1812.

77 W. Tseng, S. Lau và J. Mayer, Phys. Lett. A, 1978, 68, 93-94.

78 V. Ravi, Philos. Tạp chí, 1974, 30, 1081-1090.

79 S. Hu, J. Appl. Phys., 1974, 45, 1567-1573.

80 AMR Lin, RW Dutton, DA Antoniadis và WA Tiller, J. Electrochem. Soc., 1981, 128, 1121-1130.

81 J. Hornstra, J. Phys. Chem. Chất rắn, 1958, 5, 129-141.

82 O. Krivanek và D. Maher, Appl. Phys. Lett., 1978, 32, 451-453.

83 V. Naumann, C. Brzuska, M. Werner, S. Großer và C. Hagendorf, Energy Procedia, 2016, 92, 569-575.

84 A. Halm, A. Schneider, VD Mihailetchi, LJ Koduvelikulathu, LM Popescu, G. Galbiati, H. Chu và R. Kopecek, Energy Procedia, 2015, 77, 356-363.

85 K. Hara, S. Jonai và A. Masuda, Sol. Vấn đề năng lượng. Sol. Tế bào, 2015, 140, 361-365.

86 S. Yamaguchi, A. Masuda và K. Ohdaira, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2016, 151, 113-119.

87 V. Naumann, T. Geppert, S. Großer, D. Wichmann, H.-J. Krokoszinski, M. Werner và C. Hagendorf, Energy Procedia, 2014, 55, 498-503.

88 S. Yamaguchi, S. Jonai, K. Hara, H. Komaki, Y. Shimizu-Kamikawa, H. Shibata, S. Niki, Y. Kawakami và A. Masuda, Tạp chí Y khoa Ứng dụng Nhật Bản, 2015, 54, 08KC13.

89 S. Voswinckel, P. Manz, C. Schmidt và V. Wesselak, Biên bản báo cáo năng lượng, 2014, 57, 56-64.

90 K. Jansen và A. Delahoy, Phim răn mỏng, 2003, 423, 153-160.

91 V. Fja'llstro'm, P. Szaniawski, B. Vermang, PM Salome, F. Rostvall, U. Zimmermann và M. Edoff, Tạp chí quang điện IEEE, 2015, 5, 664-669.

92 P. Hacke, S. Spataru, S. Johnston, K. Terwilliger, K. VanSant, M. Kempe, J. Wohlgemuth, S. Kurtz, A. Olsson và M. Propst, Tạp chí IEEE về quang điện, 2016, 6, 1635-1640.

93 NG Dhere, VV Hadagali và K. Jansen, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 31, Orlando, FL, Hoa Kỳ, 2005, trang 507-510.

94 C. Osterwald, T. McMahon, J. del Cueto, J. Adelstein và J. Pruett, Cuộc họp đánh giá chương trình năng lượng mặt trời của Trung tâm quang điện quốc gia, Denver, CO, Hoa Kỳ, 2003.

95 K. Sato, Y. Matsui, K. Adachi, Y. Gotoh, Y. Hayashi và H. Nishimura, Biên bản Hội nghị của Hội nghị Chuyên gia Quang điện IEEE lần thứ 23, Louisville, KY, Hoa Kỳ, 1993, trang 855-859.

96 IEC 61215, Phiên bản thứ hai, 2005.

97 IEC 61646, 2008.

98 P. Hacke, K. Terwilliger, S. Koch, T. Weber, J. Berghold, S. Hoffmann, M. Koehl, S. Dietrich, M. Ebert và G. Mathiak, Kết quả thử nghiệm vòng tròn dự thảo IEC 62804, 2013, <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/60493.pdf>, truy cập ngày 03/11, 2016.

99 IEC TS 62804-1, Phiên bản 1.0, 2015.

100 IEC NP 62804-2 TS, 2015.

101 FA Lindholm, JG Fossum và EL Burgess, IEEE Trans. Thiết bị điện tử, 1979, 26, 165-171.

102 S. Spataru, P. Hacke, D. Sera, C. Packard, T. Kerekes và R. Teodorescu, Tiến trình. Quang điện, 2015, 23, 1536-1549.

103 J. Berghold, P. Grunow, P. Hacke, W. Herrmann, S. Hoffmann, S. Janke, B. Jaeckel, S. Koch, M. Köhl và G. Mathiak, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28, Paris, Pháp, 2013, tr. 3003-3011.

104 K. Morita và K. Ohnaka, Ind. Eng. Chem. Res., 2000, 39, 4684-4688.

105 P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, R. Smith, G. Perrin, S. Kurtz, N. Bosco và J. Wohlgemuth, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 40, Denver, CO, Hoa Kỳ, 2014, trang 0930-0936.

106 F. Ebneali, S. Tatapudi và G. Tamizhmani, Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 39, Tampa, FL, Hoa Kỳ, 2013, trang 1548-1553.

107 H.-C. Liu, C.-T. Huang, W.-K. Lee và M.-H. Lin, Năng lượng Kỹ thuật điện, 2013, 5, 455.

108 S. Pingel, S. Janke, J. Seydewitz, R. Alam, S. Koch, J. Kupke và J. Berghold, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29, Amsterdam, Hà Lan, 2014, tr. 2335-2341.

109 H. Mehlich, D. Decker, U. Scheit, M. Uhlig, S. Frigge, M. Runge, B. Heinze, H.-P. Sperlich, J. Mai, H. Schlemm, E. Vetter, J. Höhne, S. Reichel và W. Stein, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27, Frankfurt, Đức, 2012, tr. 3411-3413.

110 V. Naumann, D. Lausch, K. Ilse, O. Breitenstein, J. Bauer, S. Grosser, J. Bagdahn và HC Golden, *Biên bản Hội thảo về độ tin cậy của mô-đun PV NREL*, Denver, CO, Hoa Kỳ, 2014.

111 J. Bagdahn, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 43 (sắp xuất bản)*, Portland, OR, Hoa Kỳ, 2016.

112 M. Koentopp, Hanwha Q-cells, giao tiếp cá nhân.

113 H. Nagel, *Bảng sáng chế*, WO 2012168249 A3, 2012.

114 H. Mehrer, *Sự khuếch tán trong chất rắn: nguyên tắc cơ bản, phương pháp, vật liệu, quy trình kiểm soát khuếch tán*, Springer Science & Business Media, 2007.

115 J. Del Cueto và S. Rummel, *Proc. SPIE*, San Diego, CA, Hoa Kỳ, 2010, tập. 7773, trang. 77730J.

116 A. Raykov, H. Nagel, D. Amankwah và W. Bergholz, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27*, Frankfurt, Đức, 2012, trang 3399-3404.

117 Z. Boksay, M. Varga và A. Wikby, *J. Chất rắn không phải tinh thể*, 1975, 17, 349-358.

118 MD Kempe, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2006, 90, 2720-2738.

119 J. Hattendorf, R. Loew, W. Gnehr, L. Wulff, M. Koekten, D. Kosnisharov, A. Blauaermel và J. Esquivel, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27*, Frankfurt, Đức, 2012, trang 3405-3410.

120 J. Hattendorf, W. Gnehr, R. Loew, R. Roth, D. Kosnisharov và M. Zentgraf, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 3303-3308.

121 P. Hacke, S. Spataru, K. Terwilliger, G. Perrin, S. Glick, S. Kurtz và J. Wohlgemuth, *Tạp chí quang điện IEEE*, 2015, 5, 1549-1553.

122 C. Taubitz, M. Schuettze, M. Kroeber và MB Koentopp, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, tr. 2490-2494.

123 S. Koch, J. Berghold, B. Abdullah, C. Hinz và P. Grunow, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, trang 3327-3333.

124 C. Taubitz, M. Kroeber, D. Buß và MB Koentopp, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 31*, Hamburg, Đức, 2015, tr. 1807-1812.

125 T. Weber, J. Berghold, F. Heilmann, M. Roericht, S. Krauter và P. Grunow, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 3324-3331.

126 P. Hacke, R. Smith, S. Kurtz, D. Jordan và J. Wohlgemuth, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 43 (sắp xuất bản)*, Portland, OR, Hoa Kỳ, 2016.

127 O. Breitenstein, *Sol. Vật liệu năng lượng. Sol. Tế bào*, 2011, 95, 2933-2936.

128 S. Koch, D. Nieschalk, J. Berghold, S. Wendlandt, S. Krauter và P. Grunow, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27*, Frankfurt, Đức, 2012, tr. 1985-1990.

129 X. Gou, X. Li, S. Zhou, S. Wang, W. Fan và Q. Huang, *Int. J. Năng lượng quang*, 2015, 2015, 863248.

130 K. Mishina, A. Ogishi và K. Ueno, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 1139-1143.

131 T.-M. Kuan, C.-C. Huang, L.-G. Wu, Y.-C. Chan và C.-Y. Yu, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 39*, Tampa, FL, Hoa Kỳ, 2013, trang 2224-2226.

132 SC Pop, R. Schulze, X. Wang, H. Wang, J. Nee, D. Inns, A. Meisel, J. Kapur và H. Antoniadis, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 31*, Hamburg, Đức, 2015, trang 15-19.

133 M. Wilson, A. Savthouck, J. D'Amico, J. Lagowski, S. Schmitt, A. Schneider và S. Olibet, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 39*, Tampa, FL, Hoa Kỳ, 2013, trang 0218-0222.

134 V. Naumann, K. Iise và C. Hagendorf, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, tr. 2994-2997.

135 RM Swanson, D. De Ceuster, V. Desai, DH Rose, DD Smith và N. Kaminar, *Bảng sáng chế*, US7554031 B2, 2009.

136 W. Soppe, H. Rieffe và A. Weeber, *Tiến trình. Quang điện*, 2005, 13, 551-569.

137 S. Pingel, S. Janke và O. Frank, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27*, Frankfurt, Đức, 2012, trang 3379-3383.

138 W. Han, W. Shan, X. Niu, Q. Jiang, Y. Li, C. Lu, Z. Qiu và J. Li, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, tr. 3309-3312.

139 H. Nagel, P. Saint-Cast, M. Glatthaar và S. Glunz, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, trang 2351-2355.

140 J. D. Moschner, H. Nagel, A. Lachowicz và M. Fiedler, *Bảng sáng chế*, US20150064835 A1, 2015.

141 <http://www.meyerburger.com/en/products-systems/compe-tences/coating/photovoltaics/industrial-coating-systems/sqi/>, truy cập ngày 15/07, 2016.

142 M. Kambe, K. Hara, K. Mitarai, S. Takeda, M. Fukawa, N. Ishimaru và M. Kondo, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 42*, Tampa, FL, Hoa Kỳ, 2013, trang 3500-3503.

143 J. Oh, S. Bowden và G. Tamizhmani, *Tạp chí IEEE Quang điện*, 2015, 5, 1540-1548.

144 K. Hara, H. Ichinose, TN Murakami và A. Masuda, *RSC Adv.*, 2014, 4, 44291-44295.

145 SC Pop, R. Schulze, B. Brophy, S. Maghsoodi, YS Yang, ZR Abrams và P. Gonsalves, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 42*, New Orleans, LA, Hoa Kỳ, 2015, trang 1-6.

146 J. Oh, G. Tamizhmani, S. Bowden và S. Garner, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 42*, New Orleans, LA, Hoa Kỳ, 2015, trang 1-4.

147 T. Yoshida và T. Hirano, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 31*, Hamburg, Đức, 2015, trang 146-148.

148 A. Luque và S. Hegedus, *Sổ tay khoa học và kỹ thuật quang điện*, John Wiley & Sons, 2011.

149 J. Kapur, KM Stika, CS Westphal, JL Norwood và B. Hamzavytehrany, *Tạp chí IEEE về quang điện*, 2015, 5, 219-223.

Vật liệu năng lượng. Mặt trời.

Tế bào, 2016, 144, 691-699.

151 K. Nanjundiah, J. Naumovitz, M. White và T. Burns, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27*, Frankfurt, Đức, 2012, trang 3384-3387.

152 S.-H. Schulze, A. Apel, R. Meitzner, M. Schak, C. Ehrich và J. Schneider, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 503-507.

153 S. Koch, J. Berghold, O. Okoroafor, S. Krauter và P. Grunow, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 27*, Frankfurt, Đức, 2012, tr. 1991-1995.

154 CG Reid, SA Ferrigan, JIF Martinez và T. Woods, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 3340-3346.

155 J. Kapur, A. Bennett, J. Norwood, B. Hamzavytehrany và I. Kueppenbender, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 476-479.

156 G. Stollwerck, W. Schoepel, A. Graichen và C. Jaeger, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 3318-3320.

157 SC Pop, R. Schulze, X. Wang, B. Yuan, J. Kapur, KM Stika, C. Westphal, H. Antoniadis và A. Meisel, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, trang 152-157.

158 M. Schwark, K. Berger, R. Ebner, G. Ujvari, C. Hirschl, L. Neumaier và W. Muhleisen, *Hội nghị thường niên lần thứ 39 của Hiệp hội Điện tử Công nghiệp IEEE (IECON)*, Vienna, 2013, trang 8090-8097.

159 M. Kempe, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 37*, Seattle, WA, Hoa Kỳ, 2011, trang 000085-000090.

160 Y.-H. Lee, *Thạc sĩ Nghệ thuật Tsai, K.-W. Lu, W.-L. Dương, S.-H. Trần, M.-F. Lin, H.-Y. Sung và H.-S. Wu, Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, trang 3357-3359.

161 C. Liciotti, M. Cardinali và JD Lavandera Antolin, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, tr. 3093-3099.

162 T. Kerekes, R. Teodorescu, P. Rodríguez, G. Vázquez và E. Aldabas, *IEEE Trans. TRONG. Điện tử*, 2011, 58, 184-191.

163 JM Carrasco, LG Franquelo, JT Bialasiewicz, E. Galván, RCP Guisado, M. A. M. Prats, JI Leon và N. Moreno-Alfonso, *IEEE Trans. Ấn Độ Điện tử.*, 2006, 53, 1002-1016.

164 SV Araújo, P. Zacharias và R. Mallwitz, *IEEE Trans. Ind. Điện tử.*, 2010, 57, 3118-3128.

165 I. Patrao, E. Figueres, F. González-Espín và G. Garcera, *Năng lượng bền vững tái tạo*, 2011, 15, 3423-3431.

166 M. Islam, S. Mekhilef và M. Hasan, *Năng lượng tái tạo bền vững Tạp chí Năng lượng*, 2015, 45, 69-86.

167 Y. Gu, W. Li, Y. Zhao, B. Yang, C. Li và X. He, *Giao dịch IEEE về Điện tử công suất*, 2013, 28, 793-805.

168 HP Ikkurti và S. Saha, *Năng lượng bền vững tái tạo Sửa đổi*, 2015, 47, 997-1006.

169 C. Taubitz, M. Schüttze, M. Krober và MB Koentopp, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 28*, Paris, Pháp, 2013, trang 3321-3323.

170 J. Oh, S. Bowden và G. Tamizhmani, *Biên bản Hội nghị chuyên gia quang điện IEEE lần thứ 40*, Denver, CO, Hoa Kỳ, 2014, trang 0925-0929.

171 B. Jaekel, M. Cosic và J. Arp, *Biên bản Hội nghị và Triển lãm Năng lượng Mặt trời Quang điện Châu Âu lần thứ 29*, Amsterdam, Hà Lan, 2014, trang 3350-3354.

172 PID - Vấn đề và cách giải quyết, <http://files.sma.de/dl/7418/PID-PV0Box-TI-en-10.pdf>, truy cập ngày 14/03, 2016. 173 <http://www.ilumen.be/en/all-products/pid-box-mini/>, truy cập ngày 20/07, 2016.

