**Tổng quan về các công nghệ khảo sát, kiểm định để xác định và phân loại hư hỏng hệ thống pin năng lượng mặt trời đã được ứng dụng trên Thế giới.**

1. **Kiểm tra dựa trên UAV**

Hiệu quả của các công nghệ phát hiện cơ bản đã được kiểm nghiệm trong một số thử nghiệm sơ bộ trong phòng thí nghiệm. Những kết quả đầy hứa hẹn này đã khuyến khích các nhà nghiên cứu khám phá việc sử dụng các kỹ thuật kiểm tra này cho các lắp đặt hệ thống quang điện năng lượng mặt trời lớn. Giải pháp được xác định bởi các chuyên gia trong ngành, đã trở thành tiêu chuẩn trong những năm gần đây, liên quan đến việc sử dụng các phương tiện bay không người lái (UAV) chuyên dụng, chẳng hạn như máy bay không người lái, được trang bị camera để phát hiện lỗi. Phương pháp này có hai ưu điểm chính:

1. nó phù hợp để kiểm tra các cánh đồng, nơi đang lắp đặt hệ thống quang điện năng lượng mặt trời lớn vì toàn bộ hệ thống có thể được khảo sát trong một vài chuyến bay (tùy thuộc vào kích thước của hệ thống và thời lượng pin của UAV)
2. nó giảm đáng kể chi phí và thời gian cần thiết cho phân tích so với các kỹ thuật kiểm tra truyền thống

Tính phù hợp của giải pháp này đã được đánh giá thông qua phân tích định tính trong các cánh đồng thực tế để xác minh những bất thường nào có thể nhìn thấy bằng camera di chuyển và để xác định tác động của các thông số chuyến bay đến khả năng phát hiện, do đó kiểm tra độ tin cậy của UAV chuyên dụng.

Cụ thể, có thể xác định hai loại kiến trúc để phát hiện bất thường:

1. phân tích hình ảnh theo thời gian thực của các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời trong các chuyến bay của UAV
2. phân tích hình ảnh ngoại tuyến, kiểm tra video đã được ghi lại trong quá trình bay lên để kiểm tra.

Đương nhiên, giải pháp đầu tiên nhanh hơn và cho phép người vận hành xác minh theo thời gian thực xem các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời đã được kiểm tra chính xác hay chưa; tuy nhiên, nó đòi hỏi thiết kế phần mềm cần cẩn thận để tăng tốc thuật toán xử lý hình ảnh. Hơn nữa, để kiểm tra theo thời gian thực, UAV cần hoạt động ở độ cao nhất định và vào thời điểm cụ thể trong ngày để chụp rõ các chi tiết mà không bị phản xạ ánh sáng mặt trời và tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình xử lý. Hơn nữa, lưu ý rằng UAV chỉ có thể phát hiện các khuyết tật bên ngoài có thể nhìn thấy, trong khi các khuyết tật bên trong không được xem xét, ví dụ như diode không hoạt động.

UAV thường mang theo camera nhiệt, camera hệ 3 màu RGB ánh sáng nhìn thấy và camera phát quang. Camera nhiệt được sử dụng để phân tích nhiệt độ, trong khi camera ánh sáng nhìn thấy có thể lưu trữ hình ảnh màu liên quan đến các bất thường tiềm ẩn được xác định bởi thuật toán xử lý hình ảnh. Ý tưởng ở đây là hình ảnh của các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời bị lỗi, kèm theo tọa độ địa lý được đo bằng cảm biến GPS, có thể đóng vai trò là một công cụ mạnh mẽ và hiệu quả để kiểm tra quang điện tự động. Tuy nhiên, độ chính xác hiện tại của cảm biến GPS là vào khoảng vài mét, trong khi độ chính xác cần thiết cho việc định vị địa lý của các tấm quang điện phải trong vòng vài cm. Do đó, với trạng thái công nghệ hiện tại, các thuật toán thị giác máy tính không thể sử dụng tọa độ địa lý được tính toán bởi cảm biến GPS để nhận dạng và xác định từng tấm quang điện mà phải cung cấp một cơ chế để theo dõi từng đơn vị và phát hiện các bất thường tiềm ẩn trong hình ảnh. Điều này là một thách thức đang được giải quyết bằng một số kỹ thuật, như được xem xét trong phần sau.

1. **Kiểm tra trực quan bằng giác quan của bản thân**

Kiểm tra trực quan bằng chính giác quan của chính minh là phương pháp nhanh nhất và hiệu quả nhất để xác định các khuyết tật và lỗi trong module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Tuy nhiên, phương pháp này không phù hợp với các module tiếp xúc với điều kiện thời tiết. Hơn nữa, nó phải được thực hiện trước và sau khi các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời tiếp xúc với các ứng suất cơ học, điện hoặc môi trường. Các phương pháp kiểm tra ứng suất khác nhau có thể đánh giá các module trong nhà. Một số phương pháp kiểm tra ứng suất phổ biến bao gồm chu kỳ làm mát bằng độ ẩm, chu kỳ nhiệt, kiểm tra nhiệt chất lỏng, kiểm tra bức xạ tia cực tím (UV), tải trọng cơ học, tác động mưa đá, ứng dụng ứng suất nhiệt, v.v. Các tiêu chuẩn của Ủy ban Kỹ thuật Điện Quốc tế (IEC) 61646 và 61215 yêu cầu chiếu sáng hơn 1000 lux (đơn vị được dùng trong tính công suất của ánh sáng, lượng ánh sáng chiếu trên diện tích cụ thể.) để kiểm tra trực quan, trong khi các khuyết tật có thể nhìn thấy bằng mắt thường được xem xét.

Các khuyết tật phổ biến được phát hiện thông qua kiểm tra trực quan bao gồm sự tách lớp, ố vàng và phồng rộp ở mặt trước của module; vết nứt, bộ phận bị vỡ và sự đổi màu của lớp phủ phản xạ trên các tế bào; cháy và oxy hóa kim loại hóa; uốn cong, gãy, trầy xước và căn chỉnh kém của khung module; tách lớp, ố vàng, trầy xước, cháy và phồng rộp ở mặt sau của module; ăn mòn, oxy hóa và nới lỏng của hộp nối; và sự mong manh, ngắt kết nối và lộ các thành phần điện tại đầu nối hoặc dây dẫn.

Các khuyết tật có thể nhìn thấy như hiện tượng ố vàng của chất đóng gói đã được xác định là nguyên nhân chính gây ra tổn thất điện năng. Tổn thất điện năng có thể được đo bằng cách so sánh các phép đo I-V hiện có (đặc tính dòng điện-điện áp) với các giá trị do nhà sản xuất cung cấp. Các module có khuyết tật có thể nhìn thấy được có thể được so sánh với module tham chiếu (không có khuyết tật) có cùng đặc tính để đánh giá tác động của các khuyết tật đến hiệu suất của module.

Một số nghiên cứu kiểm tra trực quan đã được thực hiện trên các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời tiếp xúc với các điều kiện khí hậu khác nhau. Ví dụ, Bouaichi và cộng sự, trong nghiên cứu của họ, đã phát hiện ra sự đổi màu là nguyên nhân chính gây ra tổn thất điện năng đối với các module tiếp xúc với khí hậu Morroco trong hai năm. Hiện tượng đổi màu được quan sát thấy trên các module phía trên vị trí hộp nối. Họ nhận thấy rằng sự khác biệt về công suất giữa module bị ảnh hưởng bởi sự đổi màu và module tham chiếu có liên quan trực tiếp đến sự đổi màu và cho thấy tổn thất điện năng do sự đổi màu. Với Kahoul và cộng sự, họ cũng tìm thấy hiện tượng ố vàng của chất đóng gói là nguyên nhân chính gây ra tổn thất điện năng đối với các module tiếp xúc với điều kiện khí hậu khắc nghiệt (nhiệt độ mùa hè cao, bức xạ cao vượt quá 1000 W/m² và bão cát) trong khoảng 11 năm. Ngoài ra, các vết nứt trong tế bào, sự suy giảm của lớp phủ phản xạ, sự ăn mòn của các thanh dẫn điện, v.v., đã được quan sát. Với Bouraiou và cộng sự. họ tìm thấy hiện tượng ố vàng của chất đóng gói và bóng râm một phần là nguyên nhân chính gây ra tổn thất điện năng đối với các module tiếp xúc với môi trường Sahara ở Algeria trong khoảng 12 năm. Hơn nữa, sự tách lớp, ăn mòn, vết nứt tế bào có thể nhìn thấy, vỡ kính, sự suy giảm của lớp phủ phản xạ, v.v., đã được quan sát.

Sự đổi màu là một khuyết tật thường xuyên xảy ra ở các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời hoạt động trong môi trường sa mạc. Bouraiou và cộng sự tìm thấy sự đổi màu của chất đóng gói ở 608 (100%) đơn vị được nghiên cứu tiếp xúc với điều kiện ngoài trời ở Algeria. Các khuyết tật được quan sát khác bao gồm vết nứt đường ốc sên, đổi màu, tách lớp, ăn mòn, vết nứt tế bào có thể nhìn thấy, vỡ kính, nhiễm bẩn, v.v. Các khuyết tật được tìm thấy với tỷ lệ cao bao gồm tách lớp và ăn mòn của các thanh dẫn điện. Vết nứt tế bào có thể nhìn thấy và vết trầy xước kính cũng được quan sát thấy ở một số đơn vị.

1. **Đo đường cong I-V**

Đo đường cong dòng điện-điện áp (I-V) là một trong những phương pháp chính để mô tả đặc tính của pin mặt trời, và nó cũng được coi là phương pháp kiểm tra toàn diện nhất. Trong những trường hợp như vậy, các phép đo trước tiên được chuyển đổi sang điều kiện kiểm tra tiêu chuẩn (STC) và sau đó so sánh với các giá trị do nhà sản xuất cung cấp. Các nguồn ánh sáng nhân tạo được kiểm soát trong nhà và hệ thống kiểm soát nhiệt độ được sử dụng, cho phép duy trì các điều kiện tiêu chuẩn. Nghiên cứu những thay đổi (độ lệch) trong đường cong dòng điện-điện áp trước và sau lỗi có thể dẫn đến việc xác định và điều tra sự suy giảm của module. Nếu mức độ biến thiên trong đặc tính dòng điện-điện áp nhỏ, thì có thể khó phân tích lỗi, vì các lỗi nhỏ trong module hoặc tế bào không ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính dòng điện-điện áp. Do đó, việc phát hiện các lỗi nhỏ bằng phép đo dòng điện-điện áp là một thách thức. Một nhược điểm khác của phương pháp này là vị trí lỗi không thể được xác định chính xác thông qua đặc tính dòng điện-điện áp.

Có các phương pháp chẩn đoán khác liên quan đến phép đo điện, được phân loại là kiểm tra điện từ. Kiểm tra điện từ được sử dụng để xác định sự suy giảm bên trong và các đặc tính liên quan bằng cách phân tích những thay đổi trong tính chất từ hoặc điện. Các phương pháp này bao gồm kiểm tra tham số DC, kiểm tra tham số AC, phương pháp dòng điện cảm ứng chùm sáng, phương pháp dòng điện cảm ứng chùm điện tử và kỹ thuật thiết bị giao thoa lượng tử siêu dẫn. Trong kiểm tra DC, phương pháp mô hình hóa có thể được sử dụng để xác định các tham số DC của pin mặt trời và các tham số có thể được phân tích bằng đồ thị hoặc lý thuyết. Trong kiểm tra AC, các tham số AC của pin mặt trời được xác định. . Kỹ thuật dòng điện cảm ứng chùm sáng có thể lập bản đồ dòng ánh sáng trong pin mặt trời. Phương pháp dòng điện cảm ứng chùm điện tử có thể xác định các vùng tái hợp, tính không đồng nhất và bất thường trong đặc tính điện của tế bào. Kết hợp phương pháp dòng điện cảm ứng chùm điện tử với kính hiển vi âm thanh quét có thể giúp xác định điện và hình dung ra sự chố hỏng hóc trong pin mặt trời sẽ thể hiện qua như nào. Cuối cùng, thiết bị giao thoa lượng tử siêu dẫn là một dụng cụ được sử dụng để đo sự thay đổi thông lượng từ. Ngoài ra, các phép đo khác như điện trở, dòng điện, điện áp và cảm ứng từ có thể được thực hiện và cũng được sử dụng để phân tích pin mặt trời vì chúng có thể đo dòng điện kích thích trong tế bào và xác định các vết nứt siêu nhỏ.

Phương pháp cuối cùng để kết luận danh mục này được gọi là phân tích dòng điện vi sai, được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của sự đổi màu không đồng đều lên các tế bào quang điện, Sự đổi màu không đồng đều trong các tế bào dẫn đến sự truyền ánh sáng không đồng đều trên các tế bào, dẫn đến sự không phù hợp điện. Nghiên cứu các tế bào riêng lẻ trong module có thể cung cấp thông tin về mức độ đổi màu trong mỗi tế bào. Để nghiên cứu không phá hủy từng tế bào, người ta sử dụng phương pháp che bóng một phần. Trong quy trình này, từng tế bào được che bóng một phần, và dòng điện ngắn mạch tương ứng của module được đo trong điều kiện kiểm tra tiêu chuẩn. Vì các tế bào được kết nối nối tiếp, dòng điện của tế bào bị che bóng giới hạn dòng điện của module. Điều này cho thấy tác động kết hợp của sự đổi màu và che bóng. Vì độ che bóng là như nhau đối với tất cả các tế bào trong quá trình đo, sự biến thiên dòng điện trong mỗi tế bào cung cấp thông tin về tác động tương ứng của sự đổi màu. Độ che bóng một phần 50% có thể được duy trì cho tất cả các tế bào, và tác động của nó lớn hơn đáng kể so với tác động của sự đổi màu trên bất kỳ tế bào nào.

1. **Nhiệt xạ hồng ngoại**

Nhiệt xạ hồng ngoại (IR) là một kỹ thuật liên quan đến việc đo nhiệt độ bề mặt của các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Bằng cách sử dụng hình ảnh IR, người ta có thể xác định vị trí các khuyết tật và đánh giá tác động của chúng đến hiệu suất năng lượng. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng có mối tương quan giữa công suất đầu ra của tế bào và sự thay đổi nhiệt độ trong hình ảnh IR. Cụ thể, tốc độ suy giảm công suất tỷ lệ thuận với sự khác biệt nhiệt độ được chỉ ra bởi hình ảnh nhiệt. Hình ảnh IR liên quan đến việc chụp các tia hồng ngoại phát ra từ các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời bằng camera nhiệt. Các camera này, được gọi là camera hồng ngoại, phát hiện các tia trong quang phổ điện từ, giữa phạm vi nhìn thấy và vi sóng, thường từ 750 nm đến 1 mm bước sóng. Các camera nhiệt thường được sử dụng trong các ứng dụng này hoạt động trong phạm vi từ 7 đến 14 µm, nằm trong vùng hồng ngoại trung bình. Tín hiệu nhiệt được chụp bởi camera là kết quả của bức xạ mặt trời và phát xạ cục bộ, theo định luật Stefan-Boltzmann:

Ảnh có chứa Phông chữ, thuật in máy, văn bản, màu trắng

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

trong đó ε là độ phát xạ, σ là hằng số Stefan-Boltzmann, A là diện tích và T là nhiệt độ.

Có bốn loại đo nhiệt xạ chính: trạng thái ổn định, nhiệt xạ khóa pha, nhiệt xạ cảm ứng và nhiệt xạ xung:

Nhiệt xạ trạng thái ổn định là kỹ thuật được sử dụng phổ biến nhất và cho phép phân tích trong quá trình vận hành module. Nó liên quan đến việc chụp bản đồ nhiệt của các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời, với các vùng nhiệt độ bất thường cho thấy các khuyết tật tiềm ẩn. Phương pháp này có thể được thực hiện trong môi trường ngoài trời (ánh sáng mặt trời) hoặc trong nhà (tối). Các phép đo ngoài trời, còn được gọi là nhiệt xạ ngoài trời hoặc có chiếu sáng, được thực hiện khi nhiệt độ môi trường thấp và tốc độ gió bình thường. Các phép đo trong nhà, được gọi là nhiệt xạ trong nhà hoặc tối, yêu cầu ngắt kết nối các module và áp dụng dòng điện tương đương với dòng điện ngắn mạch của module. Các thiết lập cho nhiệt xạ trong nhà và ngoài trời được minh họa trong hình dưới đây:

Ảnh có chứa văn bản, biểu đồ, ảnh chụp màn hình, Kế hoạch

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

**Thiết lập nhiệt xạ (a) trong nhà và (b) ngoài trời**

Nhiệt xạ khóa pha liên quan đến việc kích thích các mẫu ở tần số được kiểm soát, kích thích định kỳ các tế bào để giảm nhiễu và tăng cường tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR), do đó phát hiện các nguồn nhiệt yếu hơn. Kỹ thuật này có tác động nhiệt ít hơn đến các tế bào và có thể được thực hiện trong điều kiện tối hoặc chiếu sáng. Nhiệt xạ cảm ứng, còn được gọi là phương pháp dòng điện xung, liên quan đến việc tạo ra dòng điện trong vật liệu bằng sóng điện từ, tạo ra nhiệt có thể phát hiện được bằng camera nhiệt. Kỹ thuật này có thể tiết lộ các khuyết tật thông qua sự thay đổi trong khuếch tán nhiệt . Nhiệt xạ xung sử dụng nguồn nhiệt bên ngoài, như đèn flash, để tạo ra dòng nhiệt động qua module. Nhiệt độ bề mặt tăng đồng đều và camera nhiệt độ phân giải cao chụp ảnh để phát hiện các khuyết tật như bọt khí và kết nối điện. Nhiều khuyết tật có thể nhìn thấy trong hình ảnh IR được thể hiện trong hình dưới đây, chẳng hạn như lỗi kết nối tế bào-tế bào, tế bào bị nứt, vết nứt cô lập các phần của tế bào, mối hàn có điện trở cao, các mối nối bỏ qua cục bộ, mật độ dòng điện cao trong thanh dẫn, vỡ kính và hư hỏng tế bào trong thiết lập bên ngoài.

Ảnh có chứa Nhiều màu sắc, ảnh chụp màn hình, tác phẩm nghệ thuật

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

**Các khuyết tật trong hình ảnh IR: (a) lỗi kết nối tế bào-tế bào; (b) tế bào bị nứt; (c) các vết nứt cô lập các phần của tế bào; (d) mối hàn có điện trở cao; (e) các mối nối bỏ qua cục bộ; (f) mật độ dòng điện cao trong thanh dẫn; (g) vỡ kính; (h) hư hỏng tế bào trong thiết lập bên ngoài**

Các cân nhắc như cài đặt độ phát xạ, bức xạ mặt trời, hiệu ứng che bóng, tác động của đầu nối và cấu trúc hỗ trợ lên các mẫu nhiệt là rất quan trọng trong quá trình chụp ảnh IR. Thông tin về khoảng cách của camera nhiệt từ các module cũng rất cần thiết vì sự hấp thụ bởi khí và hơi nước trong không khí có thể ảnh hưởng đến kết quả. Sự phản xạ của kính cũng có thể gây ra vấn đề, tạo ra sai số đo lên đến 15 °C tùy thuộc vào độ che phủ của mây trong quá trình chụp ảnh. Điều chỉnh góc camera có thể giúp giảm các vấn đề về phản xạ. Nên sử dụng bức xạ mặt trời tối thiểu là 500 W/m² để chụp ảnh.

Các module ở vùng khí hậu nóng có xu hướng bị hư hại nhiều hơn khi có điểm nóng so với các module ở vùng không nóng. Các tế bào bị nứt có điểm nóng có mức độ suy giảm cao hơn so với các tế bào không có điểm nóng, cho thấy tác động đáng kể đến nhiệt độ tế bào và tổn thất điện năng.

1. **Hình ảnh điện phát quang**

Hình ảnh điện phát quang (EL) liên quan đến việc áp dụng dòng điện tương đương với dòng điện ngắn mạch của module (ISC) theo hướng thuận, khiến các tế bào phát ra bức xạ EL do sự tái hợp electron-lỗ trống. Các bức xạ EL này thường được phát hiện bởi camera điện tích ghép cặp (CCD) do chi phí tương đối thấp. Các bức xạ phát ra nằm trong phạm vi cận hồng ngoại và có thể được chụp hiệu quả bởi các cảm biến InGaAs (indium gallium arsenide), mặc dù chúng đắt hơn. Camera RGB kỹ thuật số sửa đổi cũng có thể được sử dụng bằng cách loại bỏ bộ lọc IR để phát hiện phát xạ cận hồng ngoại. Quá trình này được thực hiện trong môi trường tối, nơi các khuyết tật xuất hiện dưới dạng các vùng tối hoặc đốm và vết nứt xuất hiện dưới dạng các đường tối trong hình ảnh EL. Các khuyết tật thường được phát hiện bao gồm vết nứt, khuyết tật vật liệu, gián đoạn ngón tay, v.v. Các nghiên cứu đã sử dụng hình ảnh EL để điều tra sự suy giảm do điện thế gây ra trong các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Hình ảnh EL đôi khi có thể có các đốm hoặc vùng tối ngẫu nhiên, gây khó khăn cho việc nhận dạng khuyết tật. Các pixel lân cận có thể được kết hợp để cải thiện tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và hình ảnh có thể được xử lý để loại bỏ nhiễu và các pixel sai sót. Chụp ảnh độ phân giải cao có thể yêu cầu chụp ảnh từng ô riêng lẻ và ghép chúng lại với nhau để có hình ảnh module hoàn chỉnh.

Kỹ thuật này được coi là nhanh chóng, hiệu quả và chính xác để phát hiện khuyết tật trong nhà. Thiết lập thử nghiệm chụp ảnh EL từ công trình của Akram và cộng sự được thể hiện trong hình dưới đây. Từ công trình nghiên cứu tương tự, các loại vết nứt điển hình và các khuyết tật khác trong hình ảnh EL được thể hiện trong hình tiếp theo , cụ thể hơn là song song với thanh dẫn, +45°, -45°, nhiều hướng, dạng đuôi gai/phân nhánh, vết nứt sâu cô lập các phần của ô, đường chéo, vuông góc với thanh dẫn, hỏng ngón tay, khuyết tật vật liệu silicon, hỏng tạo tiếp xúc và hỏng ngón tay dọc theo vết nứt.

Ảnh có chứa văn bản, trong nhà, màn hình máy tính, máy tính

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

**Thiết lập nơi chụp ảnh điện phát quang**

**Ảnh có chứa ảnh chụp màn hình, đen và trắng, đơn sắc

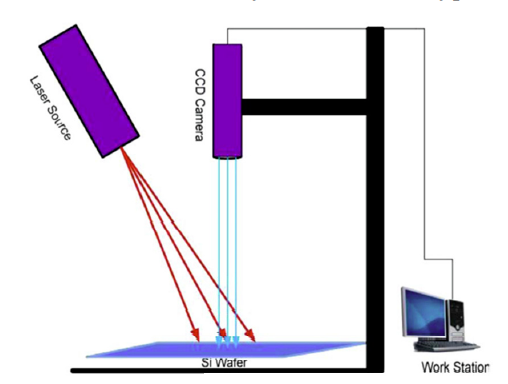
Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.**

**Các loại và hướng vết nứt khác nhau trong hình ảnh EL: (a) song song với thanh dẫn; (b) +45°; (c) -45°; (d) nhiều hướng; (e) dạng đuôi gai/phân nhánh; (f) vết nứt sâu cô lập các phần của tế bào; (g) đường chéo; (h) vuông góc với thanh dẫn; (i) hỏng ngón tay; (j) khuyết tật vật liệu silicon; (k) hỏng tạo tiếp xúc; (l) hỏng ngón tay dọc theo vết nứt.**

Cường độ pixel trung bình của hình ảnh EL của một tế bào có liên quan trực tiếp đến công suất đầu ra tối đa của module trên mỗi diện tích tế bào. Mối quan hệ này giúp xác định mức độ suy giảm của module. Cường độ phát xạ EL tương quan với mức điện áp được áp dụng và tổn thất điện trở nối tiếp xuất hiện dưới dạng các vùng cường độ thấp trong hình ảnh EL. Các vùng bị lỗi có thể được xác định bằng cách so sánh hình ảnh EL dưới các phân cực khác nhau.

1. **Hình ảnh phát quang**

Hình ảnh phát quang (PL) là một phương pháp hiệu quả khác để phát hiện khuyết tật trong các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Trong phương pháp này, một mẫu được kích thích bởi bức xạ ánh sáng từ nguồn laser, khiến nó phát ra bức xạ PL, được phát hiện bởi cảm biến CCD làm mát. Các bức xạ phát ra nằm trong phạm vi cận hồng ngoại và kỹ thuật này có thể được sử dụng để nghiên cứu các tấm wafer silicon, thanh, lớp và tế bào. Chụp ảnh PL đã được thiết lập như thể nào đã được thể hiện trong hình dưới đây.



**Thiết lập chụp ảnh phát quang**

Chụp ảnh phát quang (PL) cũng có thể được thực hiện bằng cách sử dụng lọc quang học và điều biến dòng điện. Trong phương pháp này, dòng điện của một tế bào riêng lẻ trong chuỗi nối tiếp được thay đổi giữa các điểm hoạt động bình thường và hở mạch bằng cách che bóng có chủ ý bằng đèn LED. Toàn bộ chuỗi hoạt động trong cùng điều kiện, đạt được hình ảnh PL chất lượng cao. Tế bào riêng lẻ được điều biến được gọi là tế bào điều khiển và phần còn lại là tế bào thử nghiệm. Hình ảnh PL thu được hình ảnh được so sánh với hình ảnh EL để xác định các vết nứt, vùng rối loạn cao và các tế bào hoạt động kém. Thiết lập chụp ảnh PL nâng cao này và hình ảnh kết quả được thể hiện trong hình dưới đây:

Ảnh có chứa ảnh chụp màn hình, Nhiều màu sắc, biểu đồ, hàng

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

**Thiết lập chụp ảnh PL nâng cao sử dụng lọc quang học và điều biến dòng điện**

Chụp ảnh PL phân giải phổ và không gian tập trung vào một đường thay vì toàn bộ mẫu. Tín hiệu đường đi qua khe nhiễu xạ trước các thấu kính hội tụ và được phân tách theo phổ. Tín hiệu này được phát hiện bởi chip CCD và độ phân giải không gian đạt được bằng cách di chuyển mẫu hoặc camera. Phương pháp này phát hiện các vết nứt và sự nhiễm bẩn bề mặt trong các tế bào.

1. **Phương pháp huỳnh quang tia cực tím**

Phương pháp huỳnh quang tia cực tím (UV) ban đầu được nghiên cứu để điều tra sự đổi màu trong các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Sự đổi màu xảy ra do các yếu tố môi trường và các yếu tố khác. Khi vật liệu đóng gói (EVA) trong các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời tiếp xúc với ánh sáng mặt trời, đặc biệt là ánh sáng UV, các phân tử của nó bị phá vỡ và tạo thành các chất mang màu. Chất mang màu là các nhóm chức hoặc nguyên tử trong một hợp chất chịu trách nhiệm cho các đặc tính phát quang của nó.

Trong phát hiện dựa trên UV, nguồn sáng UV kích thích các chất mang màu trong chất đóng gói, khiến chúng phát ra huỳnh quang. Các loại và kiểu huỳnh quang cụ thể được hình thành bởi độ ẩm, nhiệt độ và áp suất bức xạ. Các lỗi cơ học như vỡ kính và nứt tế bào ảnh hưởng đáng kể đến sự dập tắt huỳnh quang. Thí nghiệm được tiến hành trong bóng tối và nên phơi sáng module với ánh sáng mặt trời trước khi chụp ảnh. Phơi sáng càng lâu dẫn đến phát xạ phát quang mạnh và thời gian phơi sáng 30 giây được khuyến nghị để có hình ảnh huỳnh quang tốt. Các tia phát ra sau đó được chụp ảnh bởi một camera, cung cấp thông tin về các vết nứt tế bào. Ánh sáng huỳnh quang phát ra có bước sóng trong phạm vi 400-800 nm. Các lỗi khác có thể phát hiện được bằng chụp ảnh huỳnh quang UV bao gồm các phần tế bào bị cô lập và các kết nối giữa các tế bào bị ngắt kết nối. Một thiết lập chụp ảnh huỳnh quang UV thử nghiệm được thể hiện trong hình dưới đây, bao gồm một module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời, một camera CCD, một bộ lọc thông cao và một nguồn sáng UV.

Ảnh có chứa ảnh chụp màn hình, văn bản

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

**Thiết lập chụp ảnh UV-F cho các tế bào trong điều kiện ngoài trời và phòng thí nghiệm**

Ánh sáng huỳnh quang phát ra nằm trong quang phổ nhìn thấy và camera kỹ thuật số được sử dụng để chụp ảnh. Thông thường, bộ lọc được sử dụng để chặn tia UV. Thông tin được cung cấp bởi chụp ảnh huỳnh quang tương tự như thông tin của chụp ảnh EL. Kiểm tra huỳnh quang cũng có thể thực hiện ngoài trời khi module đang hoạt động mà không cần ngắt kết nối. Nó có thể xác định các điểm nóng, vết nứt và sự không phù hợp giữa các tế bào, đồng thời đóng vai trò là một giải pháp thay thế tiềm năng cho EL và chụp ảnh nhiệt với ít hạn chế thực tế hơn. Để phân tích chi tiết đặc tính huỳnh quang của vật liệu, có thể thực hiện quang phổ huỳnh quang.

1. **Quang phổ học**

Quang phổ học liên quan đến việc đo và nghiên cứu quang phổ được tạo ra bởi sự tương tác của vật chất với bức xạ. Một thiết bị quang phổ, được gọi là máy quang phổ, đo bức xạ điện từ ở các bước sóng cụ thể. Quang phổ Raman là một kỹ thuật để thu thập thông tin chi tiết về cấu trúc hóa học, tương tác phân tử và độ tinh thể của mẫu. Khi ánh sáng tán xạ khỏi cấu trúc vật liệu, hiệu ứng Raman xảy ra. Hầu hết ánh sáng tới tán xạ đàn hồi (tán xạ Rayleigh) ở bước sóng của nguồn, trong khi một phần nhỏ tán xạ không đàn hồi, dẫn đến sự dịch chuyển bước sóng. Sự dịch chuyển này đặc trưng cho thành phần của vật liệu. Các dải Raman dịch chuyển đến bước sóng cao hơn hoặc thấp hơn so với bước sóng nguồn, tùy thuộc vào đặc tính của vật liệu. Cường độ của hiệu ứng Raman được xác định bởi bước sóng nguồn, nồng độ vật liệu và đặc tính phân tán mẫu.

Một máy quang phổ Raman và đầu Raman siêu vi đo bản đồ quang phổ Raman để phát hiện vết ốc sên trong các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Đầu Raman siêu vi lọc các dải bên laser không mong muốn và tán xạ Rayleigh. Cảm biến CCD với máy quang phổ cung cấp tín hiệu cường độ cao. Để lập bản đồ vết ốc sên, các phép đo điểm được chuyển đổi thành bản đồ Raman, cũng có thể tạo ra hình ảnh huỳnh quang. Bộ lọc Gaussian có thể được áp dụng cho bản đồ Raman. Cường độ huỳnh quang thấp hơn dọc theo các vết nứt và dải bạc, trong khi cường độ cao được quan sát thấy ở các khu vực không nứt. Các vùng tối và sáng trong hình ảnh huỳnh quang giúp xác định vết ốc sên. Thiết lập đo lường như vậy được thể hiện trong hình dưới đây.

Ảnh có chứa ảnh chụp màn hình, văn bản, thiết kế

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

**Thiết lập đo lường sử dụng máy quang phổ Raman và đầu Raman siêu vi**

Quang phổ huỳnh quang cũng có thể nghiên cứu các module tiếp xúc với sự lão hóa. Một nguồn sáng UV kích thích các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời, khiến chúng phát ra ánh sáng huỳnh quang, được phát hiện bởi máy quang phổ thông qua sợi quang học. Quang phổ huỳnh quang UV có thể được đo theo cách này. Các module phát ra cường độ huỳnh quang cao trước khi lão hóa, giảm sau khi suy thoái.

Quang phổ hồng ngoại biến đổi Fourier (FTIR) có thể phân tích sự suy thoái của tấm nền trong các module. Tương tác giữa bức xạ hồng ngoại trung bình và vật chất kích thích sự rung động phân tử và các bước sóng hấp thụ xuất hiện trong quang phổ hồng ngoại, tiết lộ cấu trúc phân tử. Thông thường, cơ chế phản xạ toàn phần suy giảm (ATR) truyền một sóng mất dần qua module.

Quang phổ Raman cũng đo ứng suất nhiệt cơ học trong các module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời trong quá trình sản xuất. Ứng suất trong các tế bào trước và sau khi hàn và trong quá trình cán màng có thể được đo. Hiệu ứng Raman định nghĩa sự tán xạ không đàn hồi của photon (gọi là phonon) khi chúng tạo ra rung động trong các tế bào) bởi vật chất. Vị trí đỉnh Raman phụ thuộc vào mức năng lượng photon, phản ánh cấu trúc mạng tinh thể và đặc trưng riêng của vật liệu. Do đó, bất kỳ sự thay đổi đỉnh Raman nào đều liên quan đến biến dạng do ứng suất cơ học gây ra. Sự dịch chuyển đỉnh Raman có thể được chuyển đổi thành ứng suất bằng hệ số chuyển đổi tuyến tính. Hàm Gaussian xác định sự dao động đỉnh, đòi hỏi nhiều phép đo để có kết quả đáng tin cậy.

1. **Các phép đo dựa trên cảm ứng điện từ**

Gần đây, một số phương pháp hiện có, như chụp ảnh nhiệt và điện phát quang, đã được sửa đổi thông qua cảm ứng bức xạ điện từ (EM).

Phương pháp chụp ảnh nhiệt IR dựa trên cảm ứng EM có thể phát hiện khuyết tật trong các module và tế bào hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Phương pháp này cung cấp đánh giá định lượng. Một cuộn dây cảm ứng tạo ra dòng điện EM trong tế bào, tạo ra nhiệt được phát hiện bởi camera nhiệt. Quá trình này bao gồm ba bước: làm nóng dựa trên EM, dẫn nhiệt và phát xạ IR. Thiết lập bao gồm một tế bào mặt trời bị lỗi, bộ gia nhiệt cảm ứng, bộ tạo tín hiệu, camera nhiệt, cuộn dây cảm ứng, nguồn điện và máy tính. Cuộn dây được đặt cách tế bào 5 cm, tạo ra tín hiệu AC tần số cao. Phương pháp này, có thể áp dụng ở dạng xung và khóa pha, có thể phát hiện các vết nứt, khuyết tật tách lớp, mỏi và vi khuyết tật. Hình a) dưới đây minh họa hệ thống chụp ảnh nhiệt hồng ngoại cảm ứng điện từ hoạt động (EIIT) cho các tế bào hệ thống quang điện năng lượng mặt trời từ tài liệu:

Ảnh có chứa văn bản, ảnh chụp màn hình, thiết kế đồ họa, biểu đồ

Nội dung do AI tạo ra có thể không chính xác.

1. **Thiết lập thử nghiệm của hệ thống chụp ảnh nhiệt EIIT cho các tế bào hệ thống quang điện năng lượng mặt trời; (b) thiết lập chụp ảnh nhiệt và EL dựa trên cảm ứng điện từ**

Nhiệt điện tử, một phương pháp chụp ảnh nhiệt trong nhà được sửa đổi dựa trên cảm ứng EM, cũng nâng cao khả năng phát hiện khuyết tật. Tương tự, chụp ảnh EL được sửa đổi dựa trên cảm ứng EM cải thiện khả năng phát hiện khuyết tật. Nhiều khuyết tật khác nhau như đường lưới bị hỏng, vết trầy xước, vết nứt ẩn, tạp chất bề mặt, v.v., có thể được xác định bằng các kỹ thuật này. Cảm ứng EM tăng cường đáng kể khả năng phát hiện khuyết tật trong cả chụp ảnh nhiệt và EL. Ngoài ra, việc hợp nhất hình ảnh EL và IR thu được từ các kỹ thuật nâng cao này cung cấp nhiều thông tin hơn. Hợp nhất hình ảnh kết hợp các vectơ thưa từ hình ảnh nhiệt điện tử và hình ảnh EL bằng cách sử dụng chuẩn hóa L1. Yang và cộng sự đã so sánh kết quả hợp nhất biểu diễn thưa với các phép biến đổi curvelet, wavelet, wavelet phức cây kép và contourlet, đánh giá hiệu suất dựa trên năm số liệu: sai số bình phương gốc trung bình, hệ số tương quan, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu đỉnh, thông tin tương hỗ và chỉ số tương tự cấu trúc. Biểu diễn thưa vượt trội hơn các thuật toán khác. Thiết lập chụp ảnh nhiệt và EL dựa trên cảm ứng EM được sử dụng được thể hiện trong hình b) ở trên.

1. **Khả năng và Hạn chế**

Sau khi xem xét riêng lẻ các công nghệ phát hiện chính, phần này nhằm mục đích xác định khả năng và hạn chế của chúng bằng cách kiểm tra kết hợp các công nghệ phát hiện lỗi, nhằm trả lời RQ2. Để đạt được điều này, chúng tôi sử dụng hai bảng toàn diện.

(Bảng 1 và 2) trình bày chi tiết những điểm mạnh và hạn chế của các công nghệ phát hiện cơ bản khác nhau và cuối cùng là cách chúng liên quan đến các lỗi khác nhau trong hệ thống quang điện, dựa trên phân tích tài liệu sâu rộng.

**Bảng 1. Bảng tổng hợp các hạn chế và khả năng của các công nghệ phát hiện lỗi hệ thống quang điện năng lượng mặt trời cơ bản. Các công nghệ phát hiện lỗi dựa trên CV được đánh dấu in đậm.**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Công nghệ** | **Mô tả** | **Ưu điểm** | **Nhược điểm** |
| **Kiểm tra dựa trên UAV** | UAV chuyên dụng được trang bị camera để phát hiện lỗi bay trên các trang trại. | Phù hợp để kiểm tra các cánh đồng lớn. Giảm chi phí và thời gian cần thiết cho phân tích so với các kỹ thuật kiểm tra truyền thống. | Độ chính xác giới hạn của cảm biến GPS cần thiết để theo dõi từng đơn vị. Chỉ có các khuyết tật nhìn thấy từ khoảng cách xa mới có thể phát hiện được. Không phù hợp để phát hiện theo thời gian thực. |
| **Kiểm tra trực quan bằng giác quan của bản thân** | Các khuyết tật được phát hiện bằng mắt thường, chẳng hạn như sự tách lớp (delamination), hóa nâu (browning), ố vàng (yellowing), ăn mòn (corrosion), cong vênh (bending), phồng rộp (bubbling) và sự xuống cấp của lớp phủ chống phản xạ (anti-reflective coating). | Nhanh chóng và hiệu quả. Không cần thiết bị đo đạc. | Không thể phát hiện các khuyết tật không nhìn thấy được. Không khả thi cho các ứng dụng quy mô lớn ngoài trời. |
| **Đo đường cong I-V** | Một phương pháp chính để đặc trưng cho các tế bào silicon. Thường kết hợp với các phương pháp khác để có thông tin chi tiết. Những thay đổi trong đường cong I-V dẫn đến việc xác định sự xuống cấp của module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. | Phương pháp chi phí thấp. Đo lường dễ dàng. Có thể sử dụng cho các tính toán định lượng. | Không thể xác định chính xác vị trí của khuyết tật. Có thể không hiệu quả với những biến thể nhỏ. Phương pháp tiếp xúc đòi hỏi thiết bị đo đạc. |
| **Nhiệt xạ hồng ngoại** | Một phương pháp đo nhiệt độ bề mặt của module hệ thống quang điện năng lượng mặt trời. Tia hồng ngoại phát ra từ các module được thu lại bởi camera nhiệt. Nhiều loại khác nhau phù hợp cho các ứng dụng khác nhau. | Phù hợp cho các ứng dụng quy mô lớn ngoài trời. Dễ dàng phát hiện các điểm nóng (hot spots). Cung cấp các phép đo định lượng. Hình ảnh độ phân giải cao. Không phá hủy. Có thể phát hiện các khu vực đoản mạch bên trong. | Khó xác định chính xác vị trí khuyết tật. Camera nhiệt đắt tiền. Thời gian đo dài với phương pháp IR khóa pha (lock-in IR method). IR trong nhà yêu cầu nguồn điện bên ngoài. Vấn đề mờ nhiệt (Thermal blur issues). Hư hỏng do vi nứt (Micro-crack damage) không được thể hiện đầy đủ. |
| **Hình ảnh Phát quang điện** | Ghi lại bức xạ phát quang điện (electroluminescence) phát ra từ các tế bào do sự tái hợp điện tử - lỗ trống. Bức xạ này nằm trong phổ cận hồng ngoại. | Chủ yếu để phát hiện các vi nứt (micro-cracks) và gián đoạn ở cạnh (edge interruptions). Nhanh chóng, hiệu quả và chính xác cho sử dụng trong nhà. Không phá hủy. Có thể thực hiện với camera kỹ thuật số đã sửa đổi. | Đốm/đường/vùng tối ngẫu nhiên trong nền do khuyết tật tinh thể (crystallographic defects). Đòi hỏi nhiều kinh nghiệm và chuyên môn hơn. Yêu cầu nguồn điện bên ngoài. Chủ yếu sử dụng trong nhà. Các vấn đề gia nhiệt cảm ứng làm mờ các khu vực bên trong. |
| **Hình ảnh Phát quang** | Mẫu được kích thích bằng nguồn bức xạ ánh sáng/laser và bức xạ phát quang được phát ra trong vùng cận hồng ngoại. | Nhanh chóng. Không phá hủy. Độ phân giải không gian cao. Có thể phát hiện vết nứt. | Yêu cầu nguồn kích thích. Các vùng phân nhánh xuất hiện khá mờ. Chủ yếu sử dụng trong nhà. |
| **Phương pháp huỳnh quang tia cực tím** | Sử dụng nguồn sáng cực tím để kích thích các sắc tố phát quang trong vật liệu đóng gói. Sự kích thích này dẫn đến sự phát xạ huỳnh quang. Các tia phát ra sau đó được chụp ảnh bởi camera. | Dễ dàng phát hiện vết ốc sên (snail trails). Dễ dàng phát hiện sự đổi màu (discolorations). Có thể phát hiện vết nứt. Ánh sáng huỳnh quang nằm trong dải ánh sáng nhìn thấy, vì vậy có thể sử dụng camera kỹ thuật số. Không phá hủy. | Yêu cầu thời gian phơi sáng dài để có ảnh huỳnh quang tốt. Yêu cầu nguồn sáng để kích thích. Hiệu ứng huỳnh quang phát triển ở các module sau khi sử dụng ngoài trời kéo dài. Không thể phát hiện PID (thoái hóa do điện thế cảm ứng). Điốt bypass bị đoản mạch hoặc hở mạch không thể phát hiện được. |
| **Quang phổ học** | Đo lường và nghiên cứu quang phổ được tạo ra bởi sự tương tác với bức xạ. | Độ nhạy cao. Có thể phân biệt giữa các loại lỗi khác nhau. | Thiết bị tốn kém. Độ phức tạp của dữ liệu quang phổ. Bị ảnh hưởng bởi các điều kiện bên ngoài. |
| **Các phép đo dựa trên cảm ứng điện từ** | Xác định sự thay đổi trong các thuộc tính điện gây ra bởi các lỗi. | Khả năng mở rộng quy mô để giám sát các hệ thống lớn. Quét nhanh. | Giải thích phức tạp. Nhiễu môi trường. |

Bên cạnh việc áp dụng riêng lẻ từng công nghệ phát hiện cơ bản, nhiều nghiên cứu đã xem xét việc áp dụng so sánh của nhiều công nghệ dựa trên CV đối với các module hệ thống điện quang năng lượng mặt trời. Kết quả của các ứng dụng so sánh này được tóm tắt trong Bảng 2:

**Bảng 2. So sánh hạn chế và khả năng của các công nghệ cơ bản phát hiện lỗi hệ thống điện quang năng lượng mặt trời dựa trên CV.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Công nghệ** | **Phát hiện** | |
| **Kiểm tra nhiệt hồng ngoại (IR) trong nhà và ngoài trời** | Ảnh nhiệt hồng ngoại ngoài trời cho thấy tương đối ít hoặc không có khiếm khuyết trong module hệ thống điện quang năng lượng mặt trời. Ngược lại, ảnh nhiệt hồng ngoại trong nhà phát hiện nhiều khiếm khuyết hơn. Nguyên nhân có thể bao gồm sự hấp thụ bức xạ của các bộ phận như tấm nền, tản nhiệt cao, các thay đổi trong môi trường xung quanh gây mất ổn định nhiệt và các khuyết tật nhỏ không đáng kể. | |
| **UV-F so với EL** | Các vết nứt trong ảnh EL hiển thị rõ ràng hơn so với ảnh UV-F với các vùng tối. Tuy nhiên, do độ tối xung quanh mép tế bào, các vết nứt dọc theo mép không thể phát hiện được trong ảnh UV-F. Hoa văn cẩm thạch trong ảnh EL là do các khiếm khuyết kết tinh trong silicon đa tinh thể khiến vết nứt khó phát hiện hơn trong ảnh EL. Ảnh UV-F minh họa rõ hơn các khu vực có xu hướng nóng lên trong quá trình vận hành. | |
| **So sánh giữa ảnh EL và ảnh IR** | **Ảnh EL** | **Ảnh IR** |
| **Ưu diểm** | |
| * Độ phân giải cao * Đo lường trực tiếp (không tiếp xúc), nhận diện rõ ràng các khiếm khuyết như vết cắt bằng laser, tế bào bị cắt ngắn, vết nứt, chập mạch, đứt lớp tế bào | * Nhận diện rõ ràng các khiếm khuyết: khác biệt nhiệt, chập mạch, điểm nóng, hơi ẩm, che khuất, không tương thích, lỗi lắp đặt, v.v. |
| **Nhược điểm** | |
| * Không xác định được nguồn gốc của khiếm khuyết * Khó xác định ảnh hưởng của khiếm khuyết đến hiệu suất module/tế bào * Ảnh EL có vẻ bình thường vẫn có thể cho thấy vùng nhiệt độ cao trong ảnh IR vì hai kỹ thuật thu nhận các thuộc tính vật lý khác nhau | * Không phải tất cả các khiếm khuyết đều gây ra sự gia tăng nhiệt độ * Các vùng nhiệt độ cao không phải lúc nào cũng là nguồn gốc của lỗi * Khó xác định chính xác vị trí lỗi ở các điểm nhỏ * Cần giao diện điện * Không phân biệt được điện trở chuỗi cao và thấp |
| **Kiểm tra trực quan bằng giác quan của bản than so với kiểm tra bằng IR hoặc UV-F** | * Các điểm nóng dễ dàng phát hiện bằng IR, nhưng EL và UV-F không phát hiện rõ * Các điểm nóng trên 120 °C có thể dễ dàng nhìn thấy bằng mắt thường, xuất hiện dưới dạng các vùng tối hoặc đen trong ảnh RGB * Các vết nứt của tế bào không dễ phát hiện bằng ảnh nhiệt hồng ngoại nhưng có thể thấy trong ảnh EL * Ảnh UV-F hiển thị các hoa văn nứt tương tự, nhưng có thể mất vài tuần để hình thành * Vết sên (snail trail) dễ dàng phát hiện bằng UV-F và EL * Lỗi suy giảm tiềm ẩn (PID) có thể phát hiện bằng ảnh nhiệt hồng ngoại nhưng không thể bằng ảnh UV-F * Điốt bypass bị ngắn/mở có thể phát hiện bằng mọi phương pháp trừ UV-F, một phần có thể thấy bằng mắt thường * Các lỗi phổ biến có thể nhìn thấy bao gồm: đổi màu, kính vỡ và rách tấm nền | |