

# XÂY DỰNG MÔ HÌNH VẬT LÝ CỦA PIN MẶT TRỜI VỚI VẬT LIỆU PEROVSKITE

## DEVELOPMENT OF A PHYSICS MODEL OF A PHOTOVOLTAIC CELL BASED ON PEROVSKITE

Nguyễn Tuấn Anh, Nguyễn Hữu Đức\*

### TÓM TẮT

Perovskites đang hứa hẹn các vật liệu hấp thụ thế hệ tiếp theo cho các tế bào năng lượng mặt trời có chi phí thấp và hiệu quả cao. Mặc dù các tế bào perovskite được cấu hình tương tự như các tế bào năng lượng mặt trời cổ điển, vận hành của chúng cũng có những đặc thù và đòi hỏi sự phát triển của một mô hình vật lý mới để nghiên cứu những tính chất, từ đó tối ưu hóa các tế bào và nâng cao hiệu suất của tấm pin. Bài báo này phát triển một mô hình phân tích dựa trên cơ sở vật lý để mô tả hoạt động của các loại pin mặt trời perovskite khác nhau, tính đến các đặc tính không đồng nhất, với các lớp vận chuyển lựa chọn điện tích và bộ thu điện tích phụ thuộc điện áp. Mô hình này sẽ cho phép các nhà thực nghiệm mô tả các thông số chính của các tế bào hiện có, hiểu đặc tính nút cổ chai hiệu suất và dự đoán hiệu suất của tấm pin năng lượng mặt trời perovskite và gợi mở các bước tiếp theo cho sự phát triển công nghệ tế bào mặt trời perovskite.

**Từ khóa:** Perovskites; pin mặt trời; mô hình vật lý.

### ABSTRACT

Perovskites are promising next-generation absorbing materials for solar cells that are low cost and highly efficient. Although perovskite cells are configured similarly to classical solar cells, their operation also has specific characteristics and requires the development of a new physical model to study properties, thus optimizing the cells and improving the performance of the panels. This paper presents a physical-based analysis model to describe the performance of different types of perovskite solar cells, taking into account heterogeneous properties, with filtered transport layers, charge selection, and voltage-dependent collector. This model will allow experimentalists to describe key parameters of existing cells, understand the performance bottleneck properties and predict the performance of perovskite solar panels and suggest further study for perovskite solar cell technology development.

**Keywords:** Perovskites; Solar Cell; Physical-based analysis model.

Trường Đại học Điện lực

\*Email: ducnh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 25/9/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/10/2019

Ngày chấp nhận đăng: 20/12/2019

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhu cầu sử dụng điện mặt trời trên thế giới và Việt Nam đang tăng lên đã thúc đẩy sự phát triển nhanh chóng của công nghệ pin điện mặt trời. Có thể dự đoán rằng điện mặt trời sẽ tiếp tục phát triển trong những năm tới. Có hai xu hướng hiện nay nhằm đạt được hiệu năng tốt nhất. Một là

tối đa hóa thời gian đối mặt với ánh sáng mặt trời. Một máy theo dõi mặt trời được sử dụng có thể làm tăng hiệu suất lên tới 20% vào mùa đông và 50% vào mùa hè. Các hệ thống tính có thể được tối ưu hóa bằng cách phân tích đường đi của mặt trời bằng cách điều chỉnh góc cho mùa hè hoặc mùa đông. Một xu hướng khác gần đây là phát triển chính các tế bào năng lượng mặt trời (PV). Perovskite là một loại vật liệu không đắt tiền đang được sử dụng để thay thế cho tinh thể silic đắt tiền mà vẫn đáp ứng được các tiêu chuẩn hiện nay. Có rất nhiều loại PV, phổ biến nhất là PV silic tinh thể chiếm khoảng 90% sản lượng PV trên toàn thế giới tính tới năm 2013. PV silic tinh thể được sản xuất với vài bước. Thứ nhất, polysilicon được xử lý từ thạch anh khai thác cho đến khi tinh khiết (lớp bán dẫn). Sau đó được tan chảy bằng một lượng nhỏ Boron, một nguyên tố nhóm III, để tạo ra một chất bán dẫn loại p giàu các lỗ trống. Các tấm đệm của vật liệu bán dẫn này được cắt ra, sau đó cho qua bể mặt khắc trước khi được làm sạch. Tiếp theo, các tấm được đặt vào một bể photpho tạo thành một lớp photpho rất mỏng, một nguyên tố nhóm V, tạo ra bề mặt bán dẫn loại n. Để giảm tổn thất năng lượng, một lớp phủ chống phản chiếu được thêm vào bề mặt cùng với các tiếp điểm điện. Sau khi kết thúc, các tế bào được nối thông qua mạch điện theo ứng dụng cụ thể và chuẩn bị để vận chuyển và lắp đặt.

Một công nghệ mới khác là PV màng mỏng, được sản xuất bằng cách lắng đọng các lớp bán dẫn trên bề mặt trong chân không. Chất nền thường là thủy tinh hoặc thép không gỉ và các lớp bán dẫn này được làm bằng nhiều loại vật liệu như cadmium telluride (CdTe), đồng indium diselenide (CIS), đồng indium gallium diselenide (CIGS) và silic vô định hình (a-Si). Sau khi được lắng đọng trên bề mặt, các lớp bán dẫn được tách ra và kết nối với mạch điện bằng công nghệ khắc laser. PV màng mỏng chiếm khoảng 20% tổng sản lượng PV do yêu cầu vật liệu giảm và chi phí sản xuất các mô-đun.

Các công nghệ PV mới nổi khác bao gồm hữu cơ (OPV), nhạy màu, lượng tử, ống carbon và Perovskite. OPV thuộc loại sản phẩm màng mỏng với hiệu suất 12%, thấp hơn so với 12-21% ở PV silic điển hình. Vì OPV yêu cầu độ tinh khiết rất cao và dễ thay đổi, chúng làm tăng chi phí sản xuất và đóng gói, có nghĩa là chúng không khả thi đối với quy mô lớn. Các PV nhạy màu cũng có hiệu suất tương tự như OPV nhưng dễ sản xuất hơn đáng kể. Tuy nhiên, các PV nhạy

màu lại có vấn đề trong lưu trữ vì chất điện phân lỏng rất độc và có thể xâm nhập vào các chất dẻo được sử dụng trong tế bào. Các PV chấm lượng tử là các loại tế bào nhạy ở mức lượng tử và chúng có khả năng mở rộng nhưng hiện tại hiệu suất cao nhất chỉ 12%. Các tế bào năng lượng mặt trời thế hệ tiếp theo có thể vô cùng hữu ích nhờ một cấu trúc ống nano có khả năng vận chuyển điện tích cao hơn. Tuy nhiên, cho đến nay các ống nano đã được đặt ngẫu nhiên trong các tế bào năng lượng mặt trời trong các cấu trúc tối ưu vì chúng rất khó sắp xếp. Theo một nghiên cứu của Đại học Exeter Briain, một thế hệ pin mặt trời mới được làm từ một khoáng chất có tên perovskite có tiềm năng chuyển đổi năng lượng mặt trời thành điện gia dụng rẻ hơn bao giờ hết. Các tấm màng siêu mỏng, gắn trên cửa sổ của tòa nhà có thể che bóng mát và đồng thời sản xuất điện. Với chiều dày bằng phần trăm của một mét, các tấm pin mặt trời làm bằng perovskite sẽ rẻ hơn 40% và hiệu quả hơn 50% so với sản phẩm PV thương mại hiện nay. Không giống như các tấm pin mặt trời khác, những chiếc được làm từ perovskite có thể hấp thụ hầu hết quang phổ mặt trời và hoạt động trong các điều kiện khí quyển khác nhau chứ không chỉ dưới ánh sáng mặt trời trực tiếp. Loại vật liệu này làm việc trong điều kiện khuếch tán tốt hơn nhiều so với các loại pin mặt trời khác. Quá trình sản xuất tấm panen perovskite rất đơn giản, nhưng các nhà nghiên cứu vẫn phải kiểm tra vật liệu dưới những điều kiện khác nhau để hiểu rõ hơn về tính chất của nó, trước khi các công ty bắt tay vào sản xuất quy mô công nghiệp.

Đã có nhiều nghiên cứu cơ bản đầu tiên để tìm ra các đặc tính của vật liệu perovskite, như về khe năng lượng, giới hạn hiệu suất Shockley-Queisser, các khiếm khuyết cho các vật liệu perovskite khác nhau. Cũng có một số cố gắng tìm hiểu cơ chế PV perovskite dựa trên mô phỏng.

Perovskites hứa hẹn là vật liệu thế hệ kế tiếp cho các tế bào năng lượng mặt trời với hiệu suất cao và chi phí thấp [1 - 3]. Mặc dù số nghiên cứu ngày càng tăng về chủ đề này, hầu hết các công trình lý thuyết cho đến nay đã được thực nghiệm hoặc tính số đầy đủ [4 - 8]. Các mô hình số chi tiết cung cấp thông tin sâu về hoạt động của các tế bào và vấn đề hiệu suất của nó; nhưng nói chung chưa phù hợp để mô tả, kiểm tra và / hoặc dự đoán hiệu suất của tấm pin mặt trời. Trên thực tế, lĩnh vực này vẫn thiếu một mô hình phân tích dựa trên cơ sở vật lý, có thể giải thích bản chất vận hành của thiết bị, để từ đó có thể được sử dụng mô tả, hiển thị và tối ưu hóa các tế bào mặt trời kiểu perovskite, cung cấp kết quả sơ bộ cho mô phỏng thiết bị phức tạp hơn và cho phép mô phỏng ở mức cả tấm pin perovskites. Điều này phản ánh thực tế rằng mặc dù có một sự tương đồng bề ngoài với loại p-n [9 - 11] hoặc p-i-n [12 - 14], cấu trúc, tự kích thích, và thu thập điện tích trong tế bào perovskite là đặc thù và không thể mô tả bằng các phương pháp truyền thống [15, 16].

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày một mô hình mới phân tích dựa trên vật lý nhằm nắm bắt được các tính năng thiết yếu của các tế bào perovskite, cụ thể là sự sinh dòng

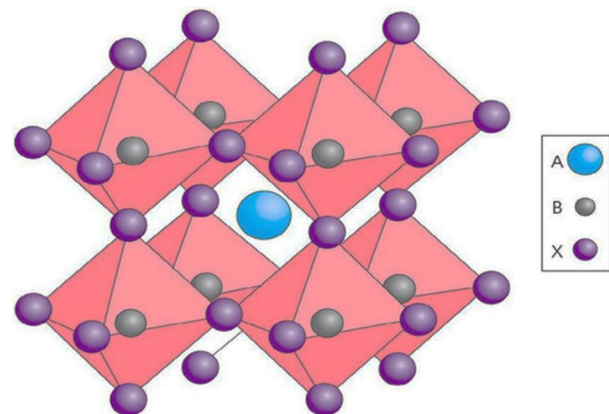
quang điện phụ thuộc vào vị trí, vai trò của các lớp vận chuyển, như TiO<sub>2</sub> và Spiro-OMeTAD, trong quá trình ngăn chặn tổn thất điện tích tại các tiếp điểm sai, bộ thu thập phụ thuộc điện áp ảnh hưởng vào mức độ tự kích thích của lớp hấp thụ,... Mô hình được xây dựng có hệ thống đối với bốn loại tế bào mặt trời perovskite. Nghiên cứu này cũng chứng minh làm thế nào mô hình có thể sử dụng được để có được các thông số vật lý của một tế bào cụ thể và làm thế nào cải thiện được hiệu suất. Mô hình của nghiên cứu này có thể dễ dàng chuyển đổi thành mạch tương đương, điều cần thiết cho mô phỏng mạng quy mô lớn phức tạp để đánh giá và tối ưu hóa các mô-đun và tấm pin năng lượng mặt trời perovskite [13, 17 - 20].

## 2. TẾ BÀO PIN QUANG ĐIỆN PEROVSKITE

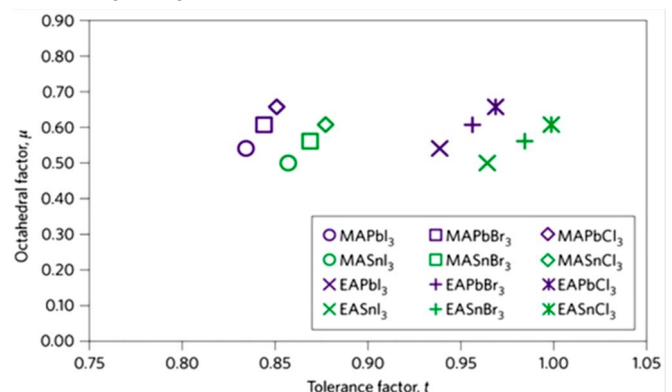
Perovskite hoặc cụ thể hơn, perovskite chì-halide, là một chất bán dẫn theo cấu trúc ABX<sub>3</sub> như trong hình 1. Trong cấu trúc này, A và B là cation trong khi X là halide. Để tạo thành một cấu trúc perovskite, bán kính ion của A, B, và X phải tuân theo các quy tắc bát diện và hệ số dung sai, được biểu diễn như sau:

$$\text{Hệ số dung sai: } 0,81 < t = (R_A + R_X) / [2(R_B + R_X)]^{1/2} < 1,11$$

$$\text{Hệ số bát diện: } 0,44 < \mu = R_B / R_X < 0,9$$



Hình 1. Cấu trúc mạng của perovskite. Đối với perovskit chì-halua, A là cation hữu cơ thông thường, B là chì hoặc thiếc và X là halua



Hình 2. Kết hợp vật liệu cho perovskit chì - halua, tuân theo quy tắc hình bát giác và dung sai cho phép

Trong phạm vi của bát diện và dung sai, các kết hợp vật liệu được cho phép được thể hiện trong hình 2, trong đó MA là tên viết tắt của methylammonium (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>) và EA là

ethylammonium (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>). Các kết hợp thực tế có thể nhiều hơn những gì được thể hiện trong hình 2. Cation A trong cấu trúc cũng có thể là formamidinium (FA, NH<sub>2</sub>CH=NH<sub>2</sub><sup>+</sup>) và Cesium (Cs). Cation B có thể là chì (Pb) hoặc thiếc (Sn). Anion X là halide (I, Cl, và Br). Lượng kết hợp tốt cung cấp tính linh hoạt tuyệt vời của perovskite trong các đặc tính vật liệu.

Loại perovskite halua hữu - vô cơ này đã được phát hiện hơn 100 năm trước đây. Vật liệu này lần đầu tiên được sử dụng trong các bóng bán dẫn màng mỏng và đèn LED. Báo cáo đầu tiên về sử dụng perovskite làm vật liệu quang điện là từ nhóm của Miyasaka. Năm 2006, một thiết bị 2,2% đạt được bằng cách sử dụng CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub> làm vật liệu hấp thụ. Sau khi thay Br bằng I, chúng có thể tăng hiệu suất lên 3,8% vào năm 2009. Park và đồng nghiệp, bằng cách sử dụng TiO<sub>2</sub> làm lớp kiểu n, đã đạt được hiệu suất 6,5% vào năm 2011. Nhưng tại thời điểm đó, họ đã sử dụng một chất điện phân lỏng dẫn đến suy thoái thiết bị nhanh chóng. Vào năm 2012, Park và Grätzel đã giới thiệu spiro-MeOTAD là lớp vận chuyển lỗ trống trạng thái rắn và cải thiện hiệu suất của tế bào lên 9,7%. Sau đó, nhóm của Seok tăng hiệu suất lên 12,3% bằng cách sử dụng perovskite pha trộn halide. Tế bào năng lượng mặt trời Perovskite vẫn không thu hút quá nhiều sự chú ý trong lĩnh vực nghiên cứu cho đến khi hai bài báo quan trọng được xuất bản vào giữa năm 2013, cả hai đều báo cáo hiệu suất trên 15%. Người đầu tiên là từ nhóm của Grätzel. Họ đã sử dụng giàn TiO<sub>2</sub> xốp (mesoporous) và đưa ra quy trình giải pháp hai bước, giúp cải thiện đáng kể hình thái perovskite. Cái thứ hai là từ nhóm của Snaith. Thay vì sử dụng quá trình hòa tan, họ là nhóm đầu tiên sử dụng lắng đọng hơi để phát triển perovskite. Sau hội nghị của Hội Nghiên cứu Vật liệu (MRS) vào mùa thu năm 2013, số lượng lớn các nhóm nghiên cứu đã tham gia nghiên cứu các tế bào mặt trời perovskite và tăng đáng kể tốc độ cải thiện hiệu suất. Hồ sơ hiệu suất được làm mới thường xuyên từ nhóm này sang nhóm khác và bây giờ đã đạt được 20+% bởi một số nhóm.

Phần này giới thiệu sơ bộ tính chất vật liệu của perovskite nhằm bước đầu tiên cho nghiên cứu xây dựng mô hình vật lý của pin mặt trời perovskite.

### 3. XÂY DỰNG MÔ HÌNH

Một pin quang điện điển hình bao gồm một lớp hấp thụ perovskite (300 ~ 500nm), một lớp vận chuyển lỗ trống (loại p), một lớp vận chuyển điện tử (n-type), và các tiếp xúc trước và sau, được sắp xếp theo các cấu hình khác nhau. Cấu trúc truyền thống trong hình 3 (a, b) có PEDOT: PSS và PCBM là lớp vận chuyển lỗ trống phía trước và lớp vận chuyển điện tử, tương ứng; tuy nhiên, trong cấu trúc ngược, TiO<sub>2</sub> là lớp vận chuyển điện tử phía trước và Spiro-OMeTAD là lớp vận chuyển lỗ trống phía sau, như trong hình 3 (c, d). Hơn nữa, đối với cả hai cấu hình, lớp hấp thụ trong các pin quang điện về cơ bản là nằm bên trong [21], xem hình 3 (a, c); hoặc chế độ thay đổi hoạt động và hiệu suất giảm do các pin tự kích thích loại p là đáng kể [22], xem hình 3 (b, d).

Do đó, các tế bào năng lượng mặt trời perovskite có thể được nhóm lại thành 4 kiểu (Type-1) p-i-n, (Type-2) p-p-n, (Type-3) n-i-p, (Type-4) n-p-p; sơ đồ năng lượng tương ứng được thể hiện trong hình 3. Người ta cho rằng hằng số điện môi cao của perovskite cho phép các excon hóa được tạo ra để phân ly ngay lập tức thành các chất mang điện tự do [23, 24]. Các điện tử và lỗ trống được tạo ra sau đó trôi dạt và khuếch tán qua các lớp hấp thụ và vận chuyển trước khi đến được các điện cực thu thập. Do đó, một mô hình phân tích có thể được phát triển bằng cách giải các phương trình liên tục của điện tử và lỗ trống trong bộ hấp thụ, cụ thể là,

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial j_n}{\partial x} + G(x) - R_n(x) \tag{1}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial j_p}{\partial x} + G(x) - R_p(x) \tag{2}$$

trong đó,  $n$  và  $p$  là các nồng độ của điện tử và lỗ trống,  $G$  và  $R$  là quá trình sinh và tái hợp, còn  $j_n$  và  $j_p$  là các dòng điện tử và lỗ trống.

$$J_n = -q j_n = q\mu_n \epsilon n + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \tag{3}$$

$$J_p = q j_p = q\mu_p \epsilon p - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \tag{4}$$

Ở đây,  $\epsilon$  là điện trường,  $D$  và  $\mu$  là hệ số khuếch tán và độ linh động tương ứng của các điện tử và lỗ trống.

Trong chất bán dẫn pha tạp p, mật độ sóng mang đa số  $p$  về cơ bản là không đổi,  $p \approx p_o$  (ngoại trừ ở mức phun rất cao) và tốc độ tái hợp chỉ phụ thuộc vào mật độ electron cục bộ. Tốc độ tái hợp thường được mô tả theo thời gian sống của điện tử và lỗ trống,  $\tau_n$  và  $\tau_p$ . Đối với tỷ lệ tái hợp tuyến tính

$$R_n = (n - n_o)/\tau_n$$

$$R_p = (p - p_o)/\tau_p$$

Khi đó, các phương trình liên tục được đưa về dạng:

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \mu_n \epsilon \frac{\partial \Delta n}{\partial x} + G(x) - \Delta n/\tau_n = 0 \tag{5}$$

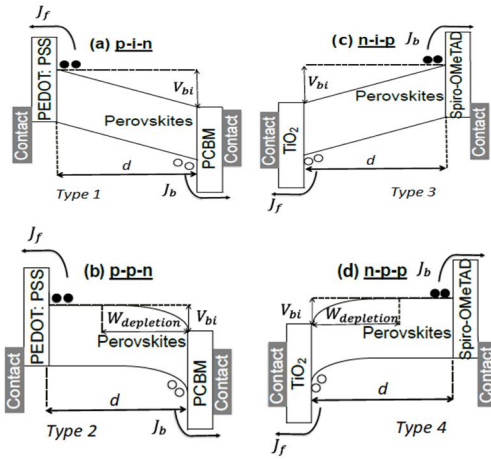
$$D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_p \epsilon \frac{\partial \Delta p}{\partial x} + G(x) - \Delta p/\tau_p = 0 \tag{6}$$

với  $\Delta n = n - n_o$  và  $\Delta p = p - p_o$ .

Để giải các phương trình này, trước tiên chúng ta cần tính điện trường  $\epsilon$  bằng cách giải phương trình Poisson và tốc độ sinh dòng  $G(x)$  bằng cách giải phương trình Maxwell. Phương trình Poisson được viết là:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -\rho/\epsilon.$$

Giả sử rằng chất hấp thụ thuần (do đó  $\rho = 0$ ), suy ra  $\phi(x) = ax$ . Do điện áp giảm chủ yếu trên lớp hấp thụ, do đó,  $\phi(x = 0) = 0$  and  $\phi(x = d) = V_{bi} - V$  trong cấu trúc p-i-n. Từ đây, chúng ta có thể biểu thị điện trường là  $a = (V_{bi} - V)/d = d\phi/dx = -E$ , do đó  $E = (V - V_{bi})/d$ . Ở đây,  $E$  là một hằng số (cấu trúc tuyến tính) cho các tế bào loại -1 (n-i-p) và loại -3 (p-i-n), tức là vắng mặt các điện tích kích thích hoặc bị mắc kẹt. Hãy nhớ lại rằng  $V_{bi}$  là điện thế tích hợp trên bộ hấp thụ, chủ yếu được xác định bởi sự pha tạp của các lớp vận chuyển chọn lọc cũng như sự liên kết dải năng lượng tại mặt tiếp xúc và  $d$  là độ dày của chất hấp thụ, xem hình 3. Ngoài ra, kết quả mô phỏng cho thấy dòng quang điện không làm nhiễu loạn điện trường đáng kể, do đó,  $E$  có thể coi là độc lập với quá trình sinh dòng quang điện ở các mức chiếu sáng của mặt trời.



Hình 3. Sơ đồ năng lượng của các tế bào mặt trời perovskite trong cấu trúc truyền thống (PEDOT:PSS / Perovskite / PCBM): (a) Loại 1 (p-i-n) và (b) Type-2 (p-p-n) và các tế bào đảo ngược titan (TiO<sub>2</sub> / Perovskite / Spiro-OMeTAD): (c) Type-3 (n-i-p) và (d) Type-4 (n-p-p)

Tốc độ sinh dòng trong bộ hấp thụ có thể được lấy gần đúng là  $G(x) = G_{eff} e^{-\alpha x}$ , với điều kiện bỏ qua bất kỳ phản xạ ký sinh nào từ bề mặt phía sau. Sự hấp thụ quang phụ thuộc vào bước sóng photon; nên  $1/\sigma$  (~100nm) được hiểu là độ dài phân rã quang trung bình chiếm toàn bộ phổ mặt trời. Lưu ý rằng sự hấp thụ tối đa là  $G_{max} = \int_0^{\infty} G_{eff} e^{-\alpha x} dx = G_{eff}/\sigma$ .

Sau khi cho  $E$  và  $G(x)$  vào các biểu thức (5) và (6), các nghiệm thu được là

$$n(x) = n_0 + e^{-\epsilon x^2} [A_n \cosh(\alpha_n x/2) + B_n \sinh(\alpha_n x/2)] + \gamma_n e^{-\sigma x} \quad (7)$$

$$p(x) = p_0 + e^{-\epsilon x^2} [A_p \cosh(\alpha_p x/2) + B_p \sinh(\alpha_p x/2)] + \gamma_p e^{-\sigma x} \quad (8)$$

trong đó,  $\epsilon \equiv qE/kT$  là điện trường chuẩn hóa, các tham số  $\alpha$  và  $\gamma$  có dạng:

$$\alpha_n = (4/L_n^2 + \epsilon^2)^{1/2}$$

$$\alpha_p = (4/L_p^2 + \epsilon^2)^{1/2}$$

$$\gamma_n = L_n^2 G_n / [1 + \sigma L_n^2 (\epsilon - \sigma)]$$

$$\gamma_p = L_p^2 G_p / [1 - \sigma L_p^2 (\epsilon + \sigma)]$$

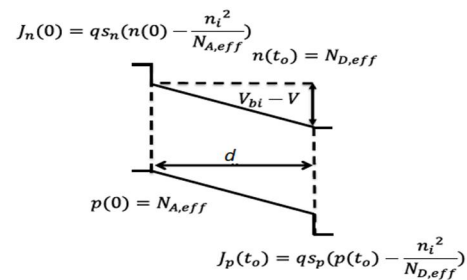
$G_n \equiv G_{eff}/D_n$  và  $G_p \equiv G_{eff}/D_p$  biểu thị tốc độ sinh dòng chuẩn hóa,  $L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}$  và  $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$  là độ dài khuếch tán của điện tử và lỗ trống,  $A_n$  ( $A_p$ ) và  $B_n$  ( $B_p$ ) là các hằng số được xác định từ các điều kiện biên.

Khảo sát ở đây cho trường hợp loại 1 (p-i-n), các điều kiện biên của phương trình (1) và (2) tại  $x = 0$  và  $x = d$  được mô tả trong hình 4, trong đó nồng độ pha tạp hiệu dụng acceptor và donor là  $N_{A,eff}$  và  $N_{D,eff}$  là nồng độ cân bằng của điện tử và lỗ trống ở các đầu lớp i. Nồng độ được xác định bởi độ pha tạp và ái lực điện tử của các lớp vận chuyển với thế năng tích hợp là  $V_{bi} = (kT/q) \ln(N_{A,eff} N_{D,eff} / n_i^2)$  và  $s_n$  và  $s_p$  là vận tốc tái hợp bề mặt của sóng mang thiểu số.

Sau khi sử dụng các điều kiện biên để tính  $A_n$ ,  $A_p$  và  $B_n$ ,  $B_p$  (hình 4), chúng ta thay vào các phương trình (3) và (4) sẽ thu được mật độ dòng  $J = J(0) = J_n(0) + J_p(0)$  và tách chúng thành hai thành phần, một dòng tối  $J_{dark}$  (độc lập với tốc độ sinh dòng) và một dòng photon phụ thuộc vào thế  $J_{photo}$ . Khi đó  $J_{light} = J_{dark} + J_{photo}$ .

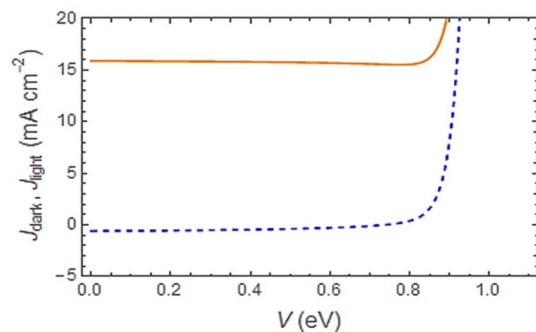
Độ dài khuếch tán bất thường trong perovskite [25 - 27] dẫn đến có thể bỏ qua sự tái tổ hợp của hạt mang điện trong lớp hấp thụ [28], tức là,  $R(x) = 0$ . Tuy nhiên ở đây chúng vẫn được đưa vào tính toán để xác định sự ảnh hưởng của chúng lên hiệu suất của pin perovskite.

Cuối cùng, các lớp vận chuyển điện tử và lỗ trống được coi là lớp dẫn hoàn hảo cho đa số các hạt mang điện; trong khi chúng hoạt động như các lớp chặn không hoàn hảo cho các hạt thiểu số, đặc trưng bởi vận tốc hiệu dụng tái tổ hợp bề mặt  $|J_{r(b)}| = q s_{r(b)} \Delta n(p)$ . Trong đó,  $\Delta n(p)$  là nồng độ hạt mang điện tối thiểu, và  $s_{r(b)}$  là vận tốc hiệu dụng tái tổ hợp bề mặt ở lớp vận chuyển phía trước (phía sau), tính đến ba quá trình tái tổ hợp: 1) thoát ra ngoài khi tiếp xúc sai; 2) tái tổ hợp do lỗi giao diện; 3) tái tổ hợp trong phần lớn của lớp vận chuyển.



Hình 4. Sơ đồ năng lượng của các tế bào mặt trời perovskite loại 1 (p-i-n) với các điều kiện biên tương ứng

Để mô phỏng chúng ta lấy các giá trị tham số bất kỳ,  $G_{max}$  thu được bằng cách tích hợp sự hấp thụ photon phụ thuộc vào vị trí được tính theo phương pháp ma trận dịch chuyển [29] (ở đây  $qG_{max} = 23 \text{mA/cm}^2$ ;  $D \approx 0,05 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$  được biết với hệ vật liệu cho cả điện tử và lỗ trống [26];  $V_{bi}$  có thể được đánh giá từ đường đặt trung điện dung - điện áp [22] hoặc bằng cách sử dụng điện áp chéo của I-V tối và sáng [30]. Vận tốc hiệu dụng tái tổ hợp có thể được xác định bằng cách sử dụng dòng phát quang  $J_{photo}(G, V) = J_{light}(G, V) - J_{dark}(G, V)$  [31].



Hình 5. Các đường đặc tính của dòng tối (đường liền nét) và sáng (đường đứt nét) của mẫu #1 (p-i-n). Các tham số sử dụng là:  $V_{bi} = 1\text{V}$ ,  $T = 300\text{K}$ ,  $D_n = 0,05 \text{cm}^2/\text{s}$ ,  $D_p = 0,03 \text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\mu_n = 0,1 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $\mu_p = 0,2 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $d = 100\text{nm}$ ,  $\tau_n = 30\text{s}$ ,  $\tau_p = 20\text{s}$ ,  $n_0 = 10^{15}$ ,  $p_0 = 10^{16}$ ,  $N_A = 10^{17}$ ,  $N_D = 10^{19}$ ,  $s_n = 2.10^2 \text{m/s}$ ,  $s_p = 10.10^2 \text{cm/s}$ ,  $\sigma = 10.10^5 \text{cm}$ ,  $G_{eff} = 23 \text{mA/cm}^2$

Cả hai đường đặc tính I-V tối và sáng cho tế bào perovskite loại 1 cho kết quả trong hình 5. Đáng chú ý, mô hình phân tích không chỉ tái tạo các tính năng chính của đặc trưng I-V với các hình dạng tế bào rất khác nhau mà

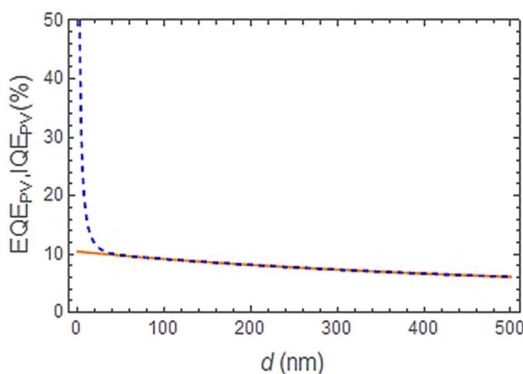
còn nắm bắt được các thông số vật lý đã biết của tế bào (ví dụ độ dày của bộ hấp thụ).

**4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ PHÂN TÍCH**

Lưu ý rằng, trong mẫu #1 có hệ số lấp đầy cao nhất (FF), nhưng  $V_{OC}$  của nó là 0,3V nhỏ hơn so với #3. Sự suy giảm  $V_{OC}$  có thể được giải thích do  $V_{bi}$  thấp hơn và  $J_{0(b)}$  lớn hơn gây ra bởi sự kết hợp của lệch dải năng lượng và nồng độ kích thích thấp hơn trong các lớp vận chuyển của các tế bào perovskite với cấu trúc truyền thống, đó là giới hạn hiệu suất chính của #1. Mặt khác, mẫu số 3 có hệ số lấp đầy thấp hơn, phát sinh từ vận tốc hiệu dụng tái tổ hợp bề mặt tương đối cao ở cả hai điểm tiếp xúc, cho thấy không đủ chặn được sự mất điện tích do tiếp xúc sai. Mặc dù #1 và #3 có hiệu suất tương tự, mô hình của nghiên cứu này cho thấy rằng các giới hạn hiệu suất cơ bản hoàn toàn khác nhau.

Sử dụng mô hình, nghiên cứu này cũng có thể trích xuất độ dày của bốn mẫu, nằm trong khoảng dự kiến (~ 350nm - 500nm cho #1 và #3, ~ 330nm cho #2) [21, 32]. Trong số các mẫu, cũng có mối tương quan chặt chẽ giữa độ dày hấp thụ  $d$  và  $J_{SC}$ , liên quan đến sự hoàn chỉnh của sự hấp thụ. Hơn nữa, ngoại trừ mẫu #4, tất cả các thiết bị có  $s_{front}$  tương đối kém (cao), có thể do không đủ rào cản giữa PEDOT: PSS và perovskites [21] cũng như thu thập kém trong  $TiO_2$  [33 - 35].

Một khi chúng ta trích xuất các thông số vật lý kết hợp với các mẫu có hiệu suất cao (#1 và #3) với các chất hấp thụ thực chất, thì tự hỏi liệu hiệu suất có thể được cải thiện thêm hay không và nếu có thì yếu tố nào là quan trọng nhất. Mô hình nhỏ gọn dựa trên cơ sở vật lý cho phép chúng ta khám phá không gian pha hiệu suất như một hàm của các tham số khác nhau, như hình 6.



Hình 6. Hiệu suất lượng tử nội tại (IEQ) và mở rộng (EQE) so với độ dày hấp thụ đối với mẫu #1. Các tham số sử dụng là:  $V_{bi} = 1V$ ,  $T = 300K$ ,  $D_n = 0,05cm^2/s$ ,  $D_p = 0,03cm^2/s$ ,  $\mu_n = 0,1cm^2V^{-1}s^{-1}$ ,  $\mu_p = 0,2cm^2V^{-1}s^{-1}$ ,  $\tau_n = 30s$ ,  $\tau_p = 20s$ ,  $n_0 = 10^{15}$ ,  $p_0 = 10^{16}$ ,  $N_A = 10^{17}$ ,  $N_D = 10^{19}$ ,  $s_n = 2.10^2 m/s$ ,  $s_p = 10.10^2cm/s$ ,  $\sigma = 10.10^5cm$ ,  $G_{eff} = 23mA/cm^3$

Ví dụ, trong khi vẫn giữ tất cả các tham số khác bằng các giá trị được trích xuất, ta có thể khám phá tầm quan trọng của độ dày hấp thụ lên hiệu suất tế bào, xem hình 6. Mô hình cho thấy cả hai hiệu suất lượng tử nội tại và mở rộng cao hơn khi độ dày hấp thụ nhỏ. Tuy nhiên, chất hấp thụ mỏng hơn không thể hấp thụ hoàn toàn ánh sáng, trong khi chất hấp thụ dày hơn thu thập và làm giảm hệ số lấp đầy. Điều này là do cạnh tranh giữa sự tái tổ hợp bề mặt

và điện trường khi xác định hiệu suất thu gom điện tích gần giao diện, và điện trường  $E = (V_{bi} - V)/d$  giảm theo độ dày. Tóm lại, đối với các mẫu được xem xét, tối ưu hóa độ dày sẽ không cải thiện hiệu suất.

Nhưng ngay cả với vận tốc tái tổ hợp bề mặt tối ưu, chúng ta vẫn chưa gần với giới hạn nhiệt động lực học (~ 30%). Hướng tới mục tiêu này, người ta phải cải thiện  $J_{SC}$ , FF và  $V_{OC}$  (giới hạn nhiệt động lực học:  $J_{SC} \sim 26mA/cm^2$ ,  $FF \sim 90\%$ ,  $V_{OC} \sim 1,3V$  [36]). Người ta có thể làm giảm sự mất hấp thụ ký sinh trong các lớp vận chuyển, có thể làm  $G_{max}$  tăng lên trong  $J_{photo}$ , để cải thiện  $J_{SC}$ ; người ta cũng có thể cải thiện FF bằng cách tăng hệ số khuếch tán điện tích  $D$ , vì nó chủ yếu làm thay đổi  $\beta_{f(b)} = D/(t_0 \times s_{f(b)})$  dùng để xác định FF; người ta cũng có thể tăng thế năng tích hợp  $V_{bi}$  thông qua việc điều chỉnh mức năng lượng ở mặt tiếp xúc cũng như tăng độ kích thích của các lớp vận chuyển, để cải thiện  $V_{OC}$ .

Chúng ta kết luận phần này với một thảo luận về sự trễ của các đặc tính J-V, có thể là một mối quan tâm quan trọng đối với cấu trúc đảo như trong Hình 3 (c, d)). Hiện tượng này phát sinh chủ yếu từ việc bẫy/loại bỏ các khuyết tật trong oxit hoặc tại giao diện oxit / perovskite [33, 34]. Các kết quả gần đây cho thấy các cải tiến qui trình, chẳng hạn như xử lý Li của  $TiO_2$ , có thể ngăn chặn / loại bỏ sự trễ, xem [37]. Hơn nữa, các tế bào có cấu trúc truyền thống (không ôxít, như trong hình 3 (a, b)) cho thấy độ trễ rất ít [21, 38]. Thực tế là hiệu ứng trễ sẽ được giảm thiểu một khi perovskites đủ giàu để tích hợp trong các mô-đun, mô hình được đề xuất ở đây chưa tính đến ảnh hưởng hiệu suất do độ trễ một cách rõ ràng.

**5. KẾT LUẬN**

Nghiên cứu này đã đưa ra một mô hình phân tích mô tả cả các đặc tính điện áp - dòng (I-V) điện tối và sáng cho bốn loại khác nhau [p-i-n/p-p-n và n-i-p/n-p-p] và mô phỏng cho loại truyền thống (p-i-n) của các tế bào mặt trời perovskite. Một đóng góp quan trọng của mô hình là, cùng với các kỹ thuật đo lường khác, nó cung cấp một cách tiếp cận đơn giản và bổ sung để mô tả đặc tính, tối ưu hóa và định hình các tế bào được chế tạo. Các thông số vật lý không thể đo trực tiếp, chẳng hạn như  $V_{bi}$  của một thiết bị p-i-n, cũng có thể được suy ra bằng cách sử dụng mô hình.

Ngoài việc xác định các thông số của một tế bào hiện có và gợi ý các cơ hội để cải thiện hơn nữa, mô hình có thể phục vụ một nhu cầu cơ bản khác, cụ thể là khả năng dự đoán hiệu suất tối ưu của tấm pin gồm nhiều tế bào perovskite riêng lẻ. Hiệu suất tấm pin được quyết định bởi sự thay đổi quy trình được phản ánh trong các thông số khác nhau [13, 39]. Thật vậy, các nghiên cứu gần đây [40, 41] cho thấy khoảng cách hiệu dụng lớn giữa các tế bào và mô-đun mặt trời dựa trên perovskite - một mạch tương đương dựa trên mô hình phân tích vật lý được phát triển có thể vạch ra khoảng cách hiệu dụng mô-đun của tế bào để phân phối thống kê một hoặc nhiều tham số và đề xuất cơ hội cải tiến. Việc đóng khoảng trống giữa các mô-đun này là bước tiếp theo với điều kiện cần thiết cho khả năng tồn tại thương mại của các tế bào mặt trời perovskite.

## PHỤ LỤC

Các tham số của mô hình được trích xuất bằng cách kết hợp các phương trình với dữ liệu thực nghiệm. Thuật toán phù hợp có hai phần: 1) Lựa chọn mô hình 2) Mô phỏng động học. Trước khi làm khớp với dữ liệu, cấu trúc của tế bào phải được biết trước (ví dụ: PEDOT: PSS / Perovskite / PCBM hoặc  $\text{TiO}_2$  / Perovskite / Spiro-OMeTAD) và liệu bộ hấp thụ có tự pha tạp hay không. Lý tưởng nhất, phép đo điện áp-điện dung cung cấp cấu hình kích thích; thay vào đó, chúng ta thấy rằng độ dốc ( $dI/dV$ ) của đường cong I-V sáng ở điện áp thấp cũng có thể phân biệt các tế bào tự pha tạp và đồng nhất. Nếu điện trở ký sinh được chiết xuất từ I-V tối là không đáng kể, mô hình của nghiên cứu này cho rằng sự giảm sút quang điện này dẫn đến sự giảm của vùng thu thập điện tích của bộ hấp thụ pha tạp tùy thuộc vào điện áp. Tính năng này giúp người dùng chọn đúng mô hình cho một thiết bị.

Các thông số vật lý cần sử dụng là:  $G_{max}$ ,  $\sigma$ ,  $d$ ,  $D$ ,  $s_f$ ,  $s_b$ ,  $V_{bi}$ ,  $J_{r0}$ , và  $J_{b0}$ .  $qG_{max}$  có thể thu được bằng cách lấy tích phân theo độ hấp thụ photon (khoảng  $23\text{mA/cm}^2$ ) và  $1/\sigma$  ở quanh  $100\text{ nm}$ ;  $D \approx 0,05\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  được sử dụng với hệ thống vật liệu cho cả điện tử và lỗ trống.

$400\text{nm}$  là một gợi ý ban đầu hợp lý cho  $d$ , vì độ dày hấp thụ là khoảng  $300\text{nm}$  đến  $500\text{nm}$  cho các tế bào năng lượng mặt trời perovskite. Người ta đã chứng minh rằng  $s_f$  kém hơn  $s_b$  trong hầu hết các trường hợp do rào thế không đủ thấp giữa PEDOT: PSS và perovskites cũng như tuổi thọ trung bình thấp của  $\text{TiO}_2$ . Do đó, dự đoán ban đầu cho  $s_f$  và  $s_b$  có thể gần đúng khoảng  $10^3\text{cm/s}$  và  $10^2\text{cm/s}$ , tương ứng. Các đường giao nhau  $V_{bi}$  được ước tính là điện áp chéo của đường cong I-V tối và sáng.

Vì  $J_{r0}$  và  $J_{b0}$  ở bậc  $10^{-13}$  đến  $10^{-15}\text{mA/cm}^2$ , nên có thể lấy chúng làm giá trị ban đầu. Sau đó, có thể sử dụng các bước mô phỏng phù hợp cho dòng tối trong khi các tham số được trích xuất từ dòng quang điện được lấy cố định. Một khi thu được các thông số, chúng phải được kiểm tra tự hợp và hội tụ giữa các đặc tính sáng và tối.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Kazim, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, and S. Ahmad, 2014. *Perovskite as light harvester: a game changer in photovoltaics*. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, vol. 53, no. 11, pp. 2812–24.
- [2]. M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, 2014. *The emergence of perovskite solar cells*. *Nat. Photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506–514.
- [3]. R. F. Service, 2014. *Energy technology: Perovskite solar cells keep on surging*. *Science*, vol. 344, no. 6183, p. 458.
- [4]. T. Minemoto and M. Murata, 2014. *Impact of work function of back contact of perovskite solar cells without hole transport material analyzed by device simulation*. *Curr. Appl. Phys.*, vol. 14, no. 11, pp. 1428–1433.
- [5]. F. De Angelis, 2014. *Modeling Materials and Processes in Hybrid/Organic Photovoltaics: From Dye-Sensitized to Perovskite Solar Cells*. *Acc. Chem. Res.*, vol. 47, no. 11, pp. 3349–3360.
- [6]. T. Minemoto and M. Murata, 2015. *Theoretical analysis on effect of band offsets in perovskite solar cells*. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 133, pp. 8–14.
- [7]. B. Tripathi, P. Bhatt, P. Chandra Kanth, P. Yadav, B. Desai, M. Kumar Pandey, and M. Kumar, 2015. *Temperature induced structural, electrical and optical changes in solution processed perovskite material: Application in photovoltaics*. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 132, pp. 615–622.
- [8]. J. M. Foster, H. J. Snaith, T. Leijtens, and G. Richardson, 2014. *A model for the operation of perovskite-based hybrid solar cells: formulation, analysis and comparison to experiment*. *SIAM Journal on Applied Mathematics* vol. 74, no. 6, pp. 1935–1966.
- [9]. W. W. Gärtner, 1959. *Depletion-layer photoeffects in semiconductors*. *Phys. Rev.*, vol. 116, pp. 84–87.
- [10]. X. X. Liu and J. R. Sites, 1994. *Solar-cell collection efficiency and its variation with voltage*. *J. Appl. Phys.*, vol. 75, no. 1, pp. 577–581.
- [11]. S. Hegedus, D. Desai, and C. Thompson, 2007. *Voltage dependent photocurrent collection in CdTe/CdS solar cells*. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 15, no. 7, pp. 587–602.
- [12]. R. S. Crandall, 1983. *Modeling of thin film solar cells: Uniform field approximation*. *J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 12, pp. 7176–7186.
- [13]. S. Dongaonkar and M. A. Alam, 2012. *End to end modeling for variability and reliability analysis of thin film photovoltaics*. in *IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings*, 2012.
- [14]. S. S. Hegedus, 1997. *Current-voltage analysis of a-Si and a-SiGe solar cells including voltage-dependent photocurrent collection*. *Prog. Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 151–168, 1997.
- [15]. M. Hejri, H. Mokhtari, M. R. Azizian, M. Ghandhari, and L. Soder, 2014. *On the Parameter Extraction of a Five-Parameter Double-Diode Model of Photovoltaic Cells and Modules*. *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 3, pp. 915–923, May 2014.
- [16]. K. Ishaque, Z. Salam, and H. Taheri, 2011. *Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules*. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 2, pp. 586–594, 2011.
- [17]. S. Dongaonkar, C. Deline, and M. A. Alam, 2013. *Performance and reliability implications of two-dimensional shading in monolithic thin-film photovoltaic modules*. *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1367–1375.
- [18]. K. Brecl and M. Topič, 2008. *Simulation of losses in thin-film silicon modules for different configurations and front contacts*. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 16, no. 6, pp. 479–488.
- [19]. K. Brecl, M. Topič, and F. Smole, 2005. *A detailed study of monolithic contacts and electrical losses in a large-area thin-film module*. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 13, no. 4, pp. 297–310.
- [20]. G. T. Koishiyev and J. R. Sites, 2009. *Impact of sheet resistance on 2-D modeling of thin-film solar cells*. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 3, pp. 350–354.
- [21]. W. Nie, H. Tsai, R. Asadpour, J.-C. Blancon, A. J. Neukirch, G. Gupta, J. Crochet, M. Chhowalla, S. Tretiak, M. A. Alam, H.-L. Wang, and A. D. Mohite, 2015. *High-efficiency solution-processed perovskite solar cells with millimeter-scale grains*. *Science (80-. )*, vol. 347, no. 6221, pp. 522–525, Jan. 2015.
- [22]. A. Guerrero, E. J. Juarez-Perez, J. Bisquert, I. Mora-Sero, and G. Garcia-Belmonte, 2014. *Electrical field profile and doping in planar lead halide perovskite solar cells*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 13, p. 133902, Sep. 2014.
- [23]. V. D'Innocenzo, G. Grancini, M. J. P. Alcocer, A. R. S. Kandada, S. D. Stranks, M. M. Lee, G. Lanzani, H. J. Snaith, and A. Petrozza, 2014. *Excitons versus*

- free charges in organo-lead tri-halide perovskites. *Nat. Commun.*, vol. 5, p. 3586, 2014.
- [24]. M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, and H. J. Snaith, 2012. *Efficient hybrid solar cells based on meso-structured organometal halide perovskites*. *Science*, vol. 338, no. 6107, pp. 643–7.
- [25]. Q. Dong, Y. Fang, Y. Shao, P. Mulligan, J. Qiu, L. Cao, and J. Huang, 2015. *Electron-hole diffusion lengths >175 nm in solution grown CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> single crystals*. *Science* (80).
- [26]. S. D. Stranks, G. E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M. J. P. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, and H. J. Snaith, 2013. *Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber*. *Science*, vol. 342, no. 6156, pp. 341–4.
- [27]. V. Gonzalez-Pedro, E. J. Juarez-Perez, W.-S. Arsyad, E. M. Barea, F. Fabregat-Santiago, I. Mora-Sero, and J. Bisquert, 2014. *General Working Principles of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbX<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells*. *Nano Lett.*, vol. 14, no. 2, pp. 888–93, Mar. 2014.
- [28]. X. Sun, R. Asadpour, W. Nie, A. D. Mohite, M. A. Alam, 2015. *A Physics-based Analytical Model for Perovskite Solar Cells*. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 5, pp. 1389–1394, Jul. 2015.
- [29]. L. A. a. Pettersson, L. S. Roman, O. Inganäs, and O. Inganäs, 1999. *Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films*. *J. Appl. Phys.*, vol. 86, no. 1, p. 487.
- [30]. J. E. Moore, S. Dongaonkar, R. V. K. Chavali, M. A. Alam, and M. S. Lundstrom, 2014. *Correlation of built-in potential and I-V crossover in thin-film solar cells*. *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1138–1148.
- [31]. J. L. G. R. V. K. Chavali, J. E. Moore, X. Wang, M. A. Alam, M. S. Lundstrom, 2015. *Frozen Potential Approach to Separate the Photo-Current and Diode Injection Current in Solar Cells*. *IEEE J. Photovoltaics*, 2015.
- [32]. M. Liu, M. B. Johnston, and H. J. Snaith, 2013. *Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition*. *Nature*, vol. 501, no. 7467, pp. 395–8.
- [33]. H. J. Snaith, A. Abate, J. M. Ball, G. E. Eperon, T. Leijtens, N. K. Noel, S. D. Stranks, J. T. W. Wang, K. Wojciechowski, and W. Zhang, 2014. *Anomalous hysteresis in perovskite solar cells*. *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 5, no. 9, pp. 1511–1515.
- [34]. E. L. Unger, E. T. Hoke, C. D. Bailie, W. H. Nguyen, A. R. Bowring, T. Heumuller, M. G. Christoforo, and M. D. McGehee, 2014. *Hysteresis and transient behavior in current-voltage measurements of hybrid-perovskite absorber solar cells*. *Energy Environ. Sci.*, pp. 3690–3698.
- [35]. Y. Zhao and K. Zhu, 2013. *Charge Transport and Recombination in Perovskite (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>)PbI<sub>3</sub> Sensitized TiO<sub>2</sub> Solar Cells*. *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 4, no. 17, pp. 2880–2884.
- [36]. M. A. Alam and M. Ryyan Khan, 2013. *Fundamentals of PV efficiency interpreted by a two-level model*. *Am. J. Phys.*, vol. 81, no. 9, p. 655.
- [37]. J. Hyuck Heo, M. Sang You, M. Hyuk Chang, W. Yin, T. K. Ahn, S.-J. Lee, S.-J. Sung, D. Hwan Kim, and S. Hyuk Im, 2015. *Hysteresisless mesoscopic CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite Hybrid solar cells by introduction of Li-treated TiO<sub>2</sub> electrode*. *Nano Energy*, vol. 15, pp. 530–539.
- [38]. O. Malinkiewicz, C. Roldán-Carmona, A. Soriano, E. Bandiello, L. Camacho, M. K. Nazeeruddin, and H. J. Bolink, 2014. *Metal-Oxide-free methylammonium lead iodide perovskite-based solar cells: The influence of organic charge transport layers*. *Adv. Energy Mater.*, pp. 1–9.
- [39]. S. Dongaonkar, S. Loser, E. J. Sheets, K. Zaunbrecher, R. Agrawal, T. J. Marks, and M. a. Alam, 2013. *Universal statistics of parasitic shunt formation in solar cells, and its implications for cell to module efficiency gap*. *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 782–787, 2013.
- [40]. F. Di Giacomo, V. Zardetto, A. D'Epifanio, S. Pescetelli, F. Matteocci, S. Razza, A. Di Carlo, S. Licoccia, W. M. M. Kessels, M. Creatore, and T. M. Brown, 2015. *Flexible Perovskite Photovoltaic Modules and Solar Cells Based on Atomic Layer Deposited Compact Layers and UV-Irradiated TiO<sub>2</sub> Scaffolds on Plastic Substrates*. *Adv. Energy Mater.*
- [41]. F. Matteocci, L. Cinà, F. Di Giacomo, S. Razza, A. L. Palma, A. Guidobaldi, A. D'Epifanio, S. Licoccia, T. M. Brown, A. Reale, and A. Di Carlo, 2014. *High efficiency photovoltaic module based on mesoscopic organometal halide perovskite*. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, no. 1, pp. 6–11.

---

**AUTHORS INFORMATION****Nguyen Tuan Anh, Nguyen Huu Duc**

Electric Power University