

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
KHOA CƠ - ĐIỆN

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA

*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation Engineering
(MEAE2025)*



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

KHOA CƠ - ĐIỆN

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ
CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA

*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation
Engineering*

(MEAE2025)

VỚI CHỦ ĐỀ :

“CÔNG NGHỆ VÀ NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO”

BAN TỔ CHỨC

1. GS.TS Trần Thanh Hải, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Trưởng ban
2. PGS.TS Nguyễn Thế Vinh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
3. PGS.TS Khổng Cao Phong, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
4. PGS.TS Triệu Hùng Trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
5. PGS.TS Nguyễn Ngọc Khánh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
6. TS Ngô Thanh Tuấn, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
7. PGS.TS Nguyễn Văn Xô, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
8. PGS.TS Đỗ Ngọc Anh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
9. PGS.TS Nguyễn Đức Khoát, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
10. PGS.TS Đỗ Như Ý, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
11. TS Nguyễn Thạc Khánh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
12. TS Phạm Thị Thủy, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
13. ThS Hà Văn Thủy, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
14. PGS.TS Trịnh Trọng Chương, Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội	Ủy viên
15. TS Lê Anh Tuấn, Trường ĐH Công nghiệp Hà Nội	Ủy viên
16. PGS.TS Đỗ Anh Tuấn, Công ty CP Kỹ thuật Công nghiệp Á Châu	Ủy viên
17. GS.TS Đinh Văn Chiến, Hội khoa học và công nghệ mỏ Việt Nam	Ủy viên
18. TS Tạ Ngọc Hải, Hội khoa học và công nghệ mỏ Việt Nam	Ủy viên
19. PGS.TS Bùi Minh Định, Đại học Bách Khoa Hà Nội	Ủy viên
20. TS Trịnh Minh Hoàng, Đại học Bách Khoa Hà Nội	Ủy viên
21. PGS.TS Lê Thu Quý, Viện Nghiên cứu Cơ khí	Ủy viên
22. TS Nguyễn Lâm Khánh, Trường ĐH Giao thông vận tải	Ủy viên
23. TS Bùi Thanh Danh, Trường ĐH Giao thông vận tải	Ủy viên
24. TS Đỗ Trung Hiếu, Viện Cơ khí Năng lượng và Mỏ - TKV	Ủy viên
25. Ông Đoàn Việt Tuấn, Công ty than Mạo Khê – TKV	Ủy viên

BAN KHOA HỌC

1. GS.TS Trần Thanh Hải, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Trưởng ban
2. PGS.TS Nguyễn Thế Vinh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
3. PGS.TS Khổng Cao Phong, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Phó Trưởng ban
4. TS Ngô Thanh Tuấn, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
5. PGS.TS Đỗ Ngọc Anh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
6. PGS.TS Nguyễn Đức Khoát, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
7. PGS.TS Nguyễn Văn Xô, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
8. PGS.TS Đỗ Như Ý, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên
9. TS Nguyễn Thạc Khánh, Trường Đại học Mỏ - Địa chất	Ủy viên

- | | |
|--|---------|
| 10. TS. Phạm Thị Thủy, Trường Đại học Mỏ - Địa chất | Ủy viên |
| 11. PGS.TS Trịnh Trọng Chương, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội | Ủy viên |
| 12. TS Nguyễn Lâm Khánh, Trường ĐH Giao thông vận tải | Ủy viên |
| 13. PGS.TS Đỗ Anh Tuấn, Công ty CP Kỹ thuật Công nghiệp Á Châu | Ủy viên |
| 14. GS.TS Đinh Văn Chiến, Hội khoa học và công nghệ mỏ Việt Nam | Ủy viên |

BAN BIÊN TẬP

- | | |
|-----------------------------|----------------|
| 1. PGS.TS Khổng Cao Phong | Trưởng ban |
| 2. TS Ngô Thanh Tuấn | Phó trưởng ban |
| 3. PGS.TS Nguyễn Viết Nghĩa | UV |
| 4. TS Nguyễn Thạc Khánh | Ủy viên |
| 5. PGS.TS Đặng Văn Chí | Ủy viên |
| 6. TS Phạm Thị Thủy | Ủy viên |
| 7. PGS.TS Đỗ Như Ý | Ủy viên |
| 8. PGS.TS Nguyễn Văn Xô | Ủy viên |
| 9. CV Trịnh Trọng An | Ủy viên |

BAN THƯ KÝ

- | | |
|---------------------------|----------------|
| 1. TS Ngô Thanh Tuấn | Trưởng ban |
| 2. TS Hồ Việt Bun | Phó Trưởng ban |
| 3. TS Phạm Thị Thanh Loan | Ủy viên |
| 4. ThS Nguyễn Tiến Sĩ | Ủy viên |
| 5. ThS Nguyễn Thanh Tùng | Ủy viên |
| 6. ThS Trần Việt Linh | Ủy viên |

BAN LỄ TÂN

- | | |
|-------------------------|----------------|
| 1. TS Đoàn Công Luận | Trưởng ban |
| 2. TS Đỗ Đức Thành | Phó Trưởng ban |
| 3. ThS Ưông Quang Tuyến | Ủy viên |
| 4. CV Đào Thị Hiền | Ủy viên |
| 5. CV Nguyễn Thị Liên | Ủy viên |
| 6. ThS Đào Thị Thủy | Ủy viên |
| 7. KS Lê Thị Hồng Thắng | Ủy viên |

LỜI NÓI ĐẦU

Trong bối cảnh khoa học – công nghệ phát triển nhanh chóng và đóng vai trò trung tâm trong quá trình chuyển đổi công nghiệp, các lĩnh vực Cơ khí, Điện, Tự động hóa và Năng lượng tái tạo đang ngày càng khẳng định tầm quan trọng đối với sự phát triển bền vững của quốc gia. Những yêu cầu mới về tối ưu hóa năng lượng, tự động hóa hệ thống, ứng dụng trí tuệ nhân tạo và khai thác các nguồn năng lượng sạch đặt ra nhiệm vụ cấp thiết cho cộng đồng nghiên cứu trong nước phải không ngừng đổi mới tư duy và phương pháp tiếp cận.

Nhằm thúc đẩy trao đổi học thuật, công bố kết quả nghiên cứu và tăng cường liên kết giữa cơ sở đào tạo – viện nghiên cứu – doanh nghiệp, Trường Đại học Mở – Địa chất phối hợp với các đơn vị tổ chức Hội nghị khoa học toàn quốc về Cơ khí, Điện và Tự động hóa năm 2025 (MEAE2025) với chủ đề “Công nghệ và năng lượng tái tạo”. Hội nghị là diễn đàn khoa học uy tín, nơi tập hợp các công trình nghiên cứu mới, các giải pháp công nghệ tiên tiến và các hướng tiếp cận hiện đại trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng và phát triển xanh.

Ban Tổ chức tin rằng Tuyển tập công trình khoa học MEAE2025 sẽ là nguồn tư liệu có giá trị, phản ánh nỗ lực nghiên cứu nghiêm túc, mang tính học thuật và ứng dụng cao của đội ngũ các nhà khoa học Việt Nam. Các kết quả được công bố tại Hội nghị không chỉ đóng góp cho tri thức chung, mà còn gợi mở nhiều định hướng quan trọng phục vụ đào tạo, nghiên cứu và chuyển giao công nghệ.

Thay mặt Ban Tổ chức, chúng tôi xin trân trọng cảm ơn Đảng ủy, Hội đồng Trường, Ban Giám hiệu Trường Đại học Mở – Địa chất; các cơ quan, đơn vị phối hợp; các tác giả, nhà khoa học, nhà phản biện và doanh nghiệp đã đồng hành, hỗ trợ và đóng góp thiết thực cho sự thành công của Hội nghị.

Trân trọng.

TM. BAN TỔ CHỨC



PGS.TS Khổng Cao Phong

MỤC LỤC

1. Năng lượng tái tạo - Thực trạng và định hướng tương lai.....	1
2. Ứng dụng phương pháp số mô phỏng cogging torque của LSPMSM có xét đến ảnh hưởng của rãnh nghiêng Stato	5
3. Tối ưu hóa tham số bộ điều khiển lực khoan trên máy CNC bằng thuật toán di truyền.....	10
4. Tối ưu hóa tham số bộ điều khiển vị trí trên máy CNC bằng thuật toán di truyền	15
5. Giải pháp xử lý tự động quan trắc độ nghiêng lệch trụ điện gió trên bờ bằng máy toàn đạc không gương	20
6. Ảnh hưởng tổng trở sóng của cột tới quá điện áp sét trên đường dây truyền tải 220 kV ...	27
7. Tối ưu hoá tham số thiết kế trong Ansys Mechanical	35
8. Lắp đặt chống sét van kết hợp với cải thiện hệ thống nối đất nâng cao hiệu quả chống sét cho đường dây trung áp trên không tại Việt Nam	39
9. Tối ưu hóa thông số bộ lọc sóng hài của bộ biến đổi nguồn năng lượng mặt trời công suất nhỏ kết nối với lưới điện hạ áp.....	46
10. Phân tích ứng suất, biến dạng của lõi rèn trong quá trình rèn biên dạng rãnh xoắn.....	52
11. Mạng nơ-ron tích hợp vật lý: tổng quan và ứng dụng trong công nghiệp năng lượng, quốc phòng và hàng không vũ trụ	55
12. Thiết kế bộ điều khiển lqr cho động cơ dc ứng dụng thuật toán tối ưu FA.....	61
13. Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp đệm và lớp hấp thụ của pin mặt trời màng mỏng $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$	68
14. Phát hiện vật thể lạ trên băng tải bằng mô hình học máy	74
15. Nghiên cứu ảnh hưởng độ nghiêng của tấm pin 2 mặt kính đến hiệu suất hệ thống điện mặt trời.....	81
16. Develop a LSTM model to forecast runoff flow in time series.....	85
17. Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng cắt giảm công suất phát đến lcoe của dự án điện gió.....	91
18. Xây dựng phần mềm xây dựng kế hoạch phát điện bằng thuật toán quy hoạch động	97
19. Điều khiển tự động và nhận diện sản phẩm lỗi cho hệ thống chiết rót.....	104

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀY LỚP ĐỆM VÀ LỚP HẤP THỤ CỦA PIN MẶT TRỜI MÀNG MỎNG $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Ngô Thanh Tuấn¹, Đỗ Đức Thành²

^{1,2} Khoa Cơ – Điện, Trường Đại học Mỏ-Địa chất (ngothanhtuan@hung.edu.vn);

TÓM TẮT

Trong những năm trở lại đây hệ vật liệu Cu-chalcopryrite nói chung và vật liệu $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nói riêng là vấn đề đang thu hút sự quan tâm đặc biệt lớn của nhiều nhà khoa học trong công nghệ pin mặt trời màng mỏng. Trong đó, pin mặt trời màng mỏng CZTSSe sử dụng nguồn vật liệu $\text{Cu}_2(\text{Zn},\text{Sn})(\text{S},\text{Se})_4$ (CZTSSe) làm lớp hấp thụ ánh sáng, còn pin mặt trời CIGSSe sử dụng nguồn vật liệu $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})(\text{S},\text{Se})_2$ (CIGSSe) làm lớp hấp thụ ánh sáng. Đây là hai trong số các loại pin mặt trời được nhiều phòng thí nghiệm lớn tại Mỹ, Nhật, Đức, Thụy Sĩ,...tập trung nghiên cứu. Bài báo này nghiên cứu pin mặt trời màng mỏng trên cơ sở lớp hấp thụ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nhờ vào sử dụng phần mềm SCAPS-1D để mô hình hóa và xây dựng mô hình vật lý phần tử pin mặt trời màng mỏng có cấu trúc glass/TCO/lớp đệm/ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ /Me.

Từ khóa: Pin mặt trời, màng mỏng, lớp hấp thụ, mô hình hóa.

1. Mở đầu

Pin mặt trời màng mỏng đang là chủ đề được chú ý trong các hướng nghiên cứu, phát triển và thương mại hóa mạnh mẽ. Hiện tại ba loại pin mặt trời màng mỏng đã thực hiện công nghiệp hóa là pin mặt trời cadmium Telluride (CdTe), pin mặt trời silic vô định hình (a-Si) và pin mặt trời đồng indium gallium diselenide (CIGS). Các công nghệ màng mỏng khác như pin mặt trời perovskite, pin mặt trời tấm chất nhạy quang (DSSC), pin mặt trời hữu cơ và pin mặt trời chấm lượng tử (QDSCs) vẫn còn trong giai đoạn nghiên cứu trong phòng thí nghiệm hoặc dây chuyền thí điểm.

Pin mặt trời a-Si trong ngành công nghiệp quang điện đang mờ dần vì hiệu quả và tính không ổn định tương đối thấp. Pin mặt trời CdTe và CIGS cho thấy xu hướng phát triển nhanh chóng trong những năm gần đây.

Tuy nhiên, độc tính của Cadmium và sự cạn kiệt của nguyên tố đất hiếm Indium và Tellurium là những nhược điểm chính của công nghệ pin mặt trời CdTe và CIGS. Một số hướng nghiên cứu mới được phát triển với mục tiêu tìm ra những hệ vật liệu mới có đặc tính phù hợp, thân thiện với môi trường,...để thay thế cho các vật liệu trên.

Hiện nay, một số vật liệu bán dẫn có nguồn gốc từ cấu trúc chalcopryrite của CIGS bằng cách

thay thế các nguyên tố hiếm In và Ga bằng các nguyên tố ít tốn kém hơn như Al, Zn và Sn, trong đó có các cấu trúc dẫn xuất $\text{Cu}(\text{In},\text{Al})\text{S}_2$ (CIAS) và $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) đã và đang được sự quan tâm đặc biệt của nhiều nhóm nghiên cứu trong và ngoài nước sử dụng làm vật liệu thay thế lớp hấp thụ trong công nghệ pin mặt trời CdTe và CIGS.

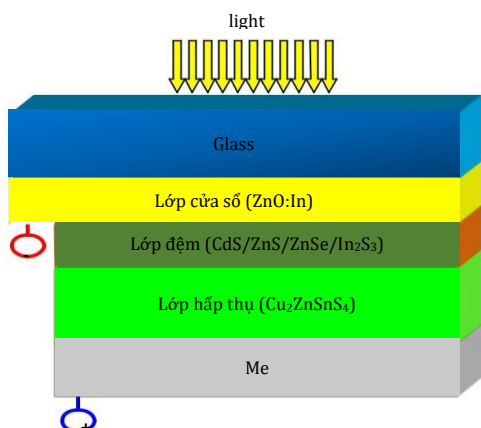
2. Pin mặt trời màng mỏng $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

2.1 Vật liệu $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Vật liệu $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (viết tắt CZTS) có thành phần bao gồm các nguyên tố Cu, Zn, Sn và S là những nguyên tố mà hợp chất của chúng rất phổ biến trên lớp vỏ Trái Đất và giá thành của các hợp chất của những nguyên tố này rẻ hơn nhiều so với những hợp chất của các vật liệu bán dẫn khác và đặc biệt chúng không độc hại và rất thân thiện với con người và môi trường. Vật liệu CZTS có hình thái cấu trúc tinh thể dạng tứ phương (tetragonal), tồn tại ở hai cấu trúc hóa học có tên là Kesterite và Stannite. Cấu trúc Kesterite cho thấy sự ổn định hơn so với cấu trúc stannite và nó là một lớp hấp thụ đối với pin mặt trời, với độ rộng vùng cấm trong dải (1,4 - 2,0 eV) và hệ số hấp thụ cao ($\sim 10^5\text{cm}^{-1}$) [1]. Đây chính là những tính chất thể hiện tiềm năng to lớn trong việc mở rộng quy mô công nghiệp đối với loại pin mặt trời của hệ vật liệu Cu-chalcopryrite.

2.2 Cấu trúc pin mặt trời

Pin mặt trời màng mỏng cấu trúc đảo glass/ZnO:In/lớp đệm/Cu₂ZnSnS₄/ Ag (gọi tắt pin mặt trời CZTS) được thực hiện trong nghiên cứu này. Hình 1 minh họa mặt cắt dọc của pin.

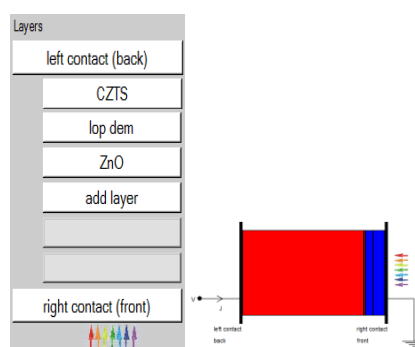
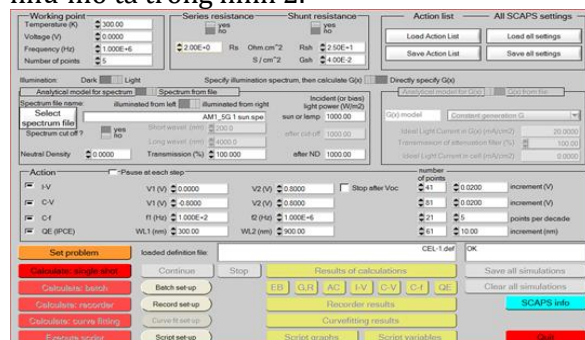


Hình 1. Cấu trúc pin mặt trời màng mỏng cấu trúc đảo: glass/ZnO:In/lớp đệm/Cu₂ZnSnS₄/Ag

Cấu trúc pin gồm có các lớp:

- Lớp ôxit dẫn trong suốt ZnO:In (viết tắt ZnO) được lắng đọng trên đế kính ITO đóng vai trò như lớp cửa sổ đồng thời sử dụng làm tiếp xúc mặt trước.
- Lớp màng mỏng n-CdS (hoặc ZnS/ZnSe/In₂S₃) sử dụng làm lớp đệm.
- Lớp màng mỏng p-Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) sử dụng làm lớp hấp thụ.
- Lớp điện cực kim loại (Me) sử dụng làm tiếp xúc mặt sau.

Mô hình pin mặt trời CZTS sử dụng để mô phỏng SCAPS-1D trong nghiên cứu của luận văn như mô tả trong hình 2.



Hình 2. Mô hình mô phỏng SCAPS-1D của pin mặt trời glass/ZnO:In/lớp đệm/Cu₂ZnSnS₄/Ag

* Lựa chọn các thông số đầu vào cho chương trình mô phỏng SCAPS

Các thông số thiết bị và vật liệu của các lớp chức năng ZnO, CdS và CZTS được sử dụng trong mô phỏng được chọn dựa trên các nghiên cứu đã công bố [2], [3], [4], [5], lý thuyết [6] hoặc trong một số trường hợp ước tính hợp lý được liệt kê trong bảng 1. Đây là các thông số cơ bản nhất, quyết định đến hoạt động của pin sau này.

Bảng 1. Thông số cơ bản đầu vào mô phỏng

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp vật liệu		
			CZTS	CdS	ZnO
Chiều dày	δ	μm	thay đổi	thay đổi	200
Độ rộng vùng cấm	E_g	eV	thay đổi	2,45	3,4
Ái lực điện tử	χ	eV	4,5	4,6	4,65
Hằng số điện môi tương đối	ϵ		10	10	10
Mật độ trạng thái hiệu dụng vùng dẫn	N_c	cm^{-3}	$2 \cdot 10^{18}$	$2,0 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{18}$
Mật độ trạng thái hiệu dụng vùng hóa trị	N_v	cm^{-3}	$2 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{19}$	$9 \cdot 10^{18}$
Vận tốc chuyển động nhiệt điện tử	$v_{th,n}$	cm/s	10^7	10^7	10^7
Vận tốc chuyển động nhiệt lỗ trống	$v_{th,p}$	cm/s	10^7	10^7	10^7
Độ linh động điện tử	μ_n	$\text{cm}^2/\text{v.s}$	50	50	50
Độ linh động lỗ trống	μ_p	$\text{cm}^2/\text{v.s}$	20	20	20

3.2. Mô phỏng hoạt động của pin mặt trời

3.2.1. Khảo sát ảnh hưởng của chiều dày lớp đệm CdS

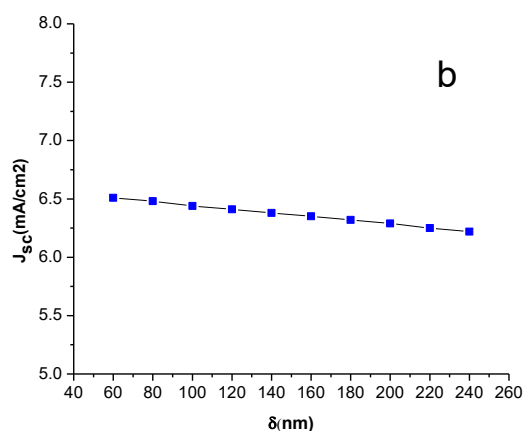
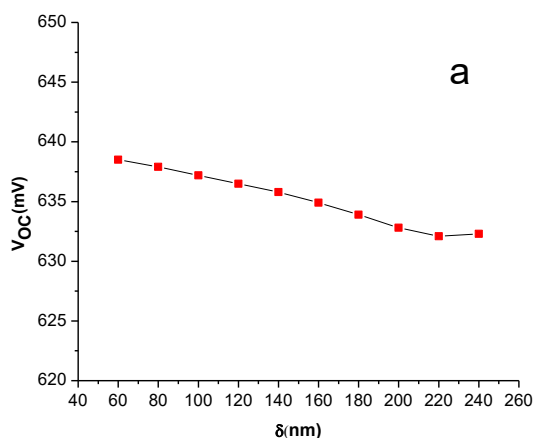
Chiều dày lớp đệm CdS được khảo sát trong phạm vi $\delta_{CdS} = 60 \div 240$ nm, trong khi chiều dày các lớp CZTS và ZnO được giữ ở giá trị cố định $\delta_{CZTS} = 2,0$ μm và $\delta_{ZnO} = 200$ nm. Kết quả mô phỏng các thông số của pin mặt trời phụ thuộc vào chiều dày lớp đệm được trình bày trong bảng 2 và hình 3.

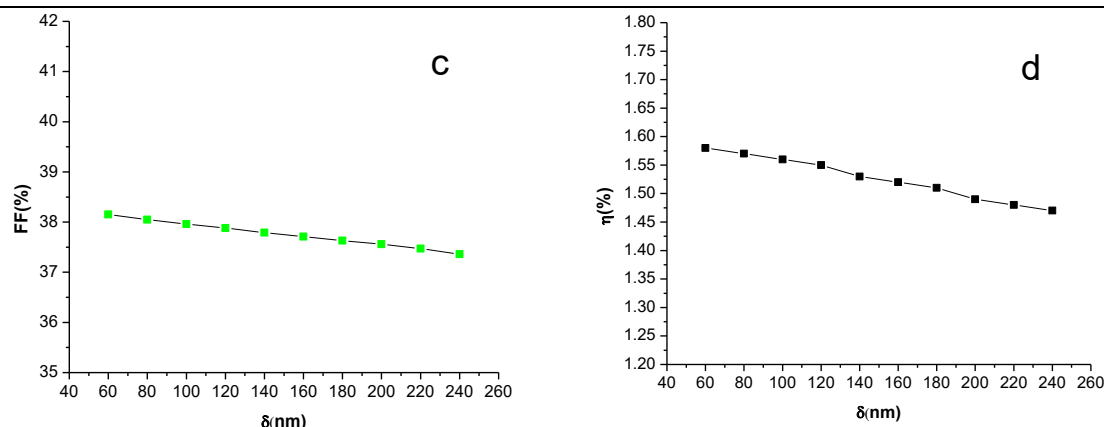
Có thể nhận thấy từ hình 3, khi chiều dày lớp đệm CdS tăng trong dải khảo sát các giá trị thông số quang điện đều giảm. Trong đó, V_{OC} và FF giảm không đáng kể. Kết quả trên có thể quy cho lượng photon mất mát do chiều dày lớp đệm gia tăng vì khi chiều dày lớp đệm tăng

photon đến bị hấp thụ bởi lớp đệm, chúng làm giảm photon có thể bắt giữ bởi lớp hấp thụ. Đối với lớp đệm rất mỏng có thể dẫn đến hiện tượng ngắn mạch do dòng rò và nếu lớp đệm quá dày có thể dẫn đến tốc độ phát sinh hạt tải tại phân biên CdS/CZTS thấp. Kết quả nghiên cứu trong [7] cho thấy, khi sử dụng phương pháp SPD lắng đọng, màng mỏng CdS chỉ thể hiện kết tinh tốt với $\delta_{CdS} \geq 80$ nm và nhận được các thông số quang điện phù hợp sử dụng làm lớp đệm cho pin mặt trời màng mỏng. Vì vậy, độ dày của lớp đệm có thể được chọn trong dải $\delta_{CdS} = 80 \div 180$ nm để đảm bảo màng lắng đọng đồng đều, kết tinh tốt và pin vẫn đạt được các thông số quang điện tối ưu.

Bảng 2. Các thông số quang điện của pin mặt trời CZTS mô phỏng bằng SCAPS-1D khi chiều dày lớp đệm CdS thay đổi

Mẫu	Chiều dày lớp đệm (nm)	Điện áp hở mạch (mV)	Mật độ dòng ngắn mạch (mA/cm^2)	Hệ số lấp đầy (%)	Hiệu suất (%)
M-1	60	638,5	6,51	38,15	1,58
M-2	80	637,9	6,48	38,05	1,57
M-3	100	637,2	6,44	37,96	1,56
M-4	120	636,5	6,41	37,88	1,55
M-5	140	635,8	6,38	37,79	1,53
M-6	160	634,9	6,35	37,71	1,52
M-7	180	633,9	6,32	37,63	1,51
M-8	200	632,8	6,29	37,56	1,49
M-9	220	632,1	6,25	37,47	1,48
M-10	240	632,3	6,22	37,36	1,47





Hình 3. Sự thay đổi (a) điện áp hở mạch, (b) mật độ dòng ngắn mạch, (c) hệ số lấp đầy và (d) hiệu suất chuyển đổi theo chiều dày lớp đệm δ_{CdS}

3.2.2 Khảo sát ảnh hưởng của chiều dày lớp hấp thụ CZTS

Thách thức trong lĩnh vực chế tạo pin mặt trời màng mỏng là sản xuất pin với hiệu suất chuyển đổi quang điện cao nhưng yêu cầu sử dụng lớp hấp thụ mỏng. Chiều dày lớp hấp thụ luôn là mối quan tâm chính của hợp chất bán dẫn đối với công nghệ pin mặt trời màng mỏng. Trong pin mặt trời, một phần lớn chiều dày của pin được đóng góp bởi chiều dày lớp hấp thụ, nó hấp thụ phần lớn các photon có năng lượng lớn hơn và bằng năng lượng của vật liệu. Đối với pin mặt trời màng mỏng CZTS thì chiều dày lớp hấp thụ ảnh hưởng rất mạnh đến hiệu năng của pin và cần phải đảm bảo hệ số hấp thụ $\alpha \geq 10^4 \text{ cm}^{-1}$. Do đó, việc lựa chọn chiều

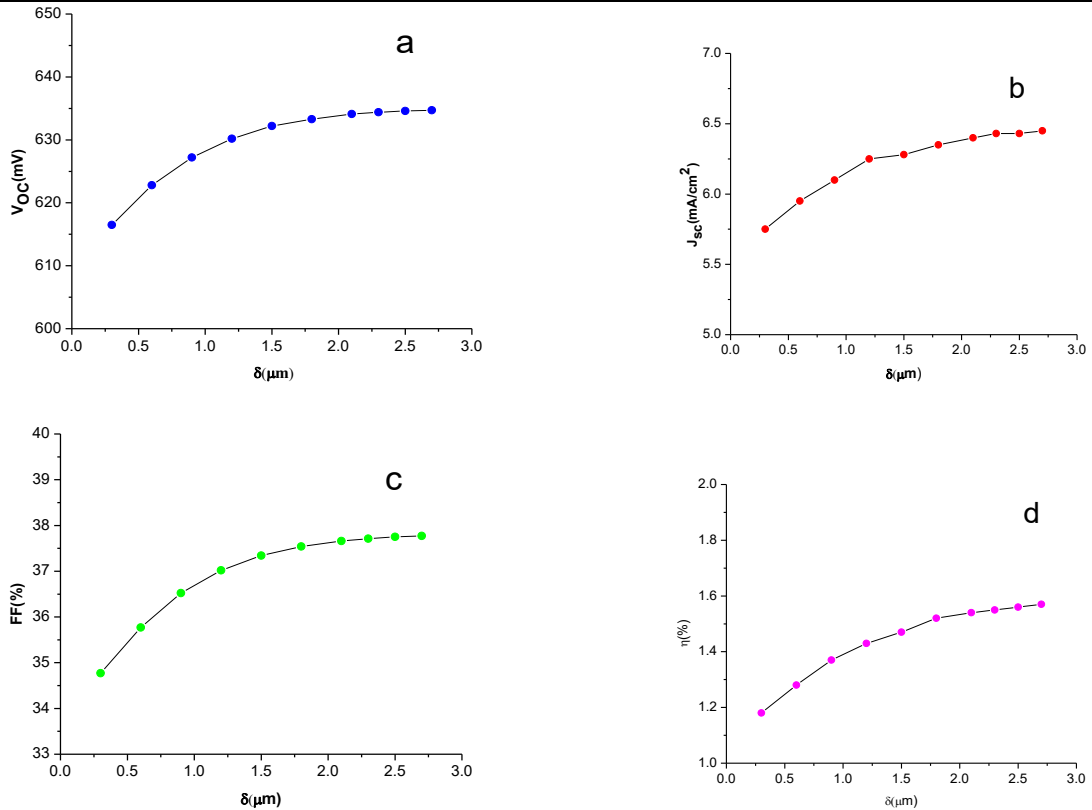
dày lớp hấp thụ là một trong các bước rất quan trọng, chúng là một trong các thông số công nghệ quyết định đến hiệu năng của pin màng mỏng cũng như giá thành sản phẩm.

Để xác định chiều dày tối ưu của lớp hấp thụ CZTS trong cấu trúc như hình 1, chúng tôi khảo sát chiều dày lớp hấp thụ δ_{CZTS} thay đổi trong giới hạn $\delta_{CZTS} = 0,3 \div 2,7 \text{ }\mu\text{m}$, trong khi chiều dày lớp ZnO và CdS được cố định với các giá trị lần lượt là $\delta_{ZnO} = 200 \text{ nm}$ và $\delta_{CdS} = 120 \text{ nm}$. Các thuộc tính lớp khác được giữ cố định như trong bảng 1.

Kết quả mô phỏng các thông số quang điện phụ thuộc δ_{CZTS} được trình bày trong bảng 3 và hình 4 trình bày đồ thị quan hệ V_{oc} , J_{sc} , FF và η theo δ_{CZTS} .

Bảng 3. Các thông số quang điện của pin mặt trời CZTS mô phỏng bằng SCAPS-1D khi chiều dày của lớp hấp thụ CZTS thay đổi

Mẫu	Chiều dày lớp hấp thụ (μm)	Điện áp hở mạch (mV)	Mật độ dòng ngắn mạch (mA/cm^2)	Hệ số lấp đầy (%)	Hiệu suất (%)
M-11	0.3	628.5	5.50	34.77	1.18
M-12	0.6	630.8	5.26	35.77	1.28
M-13	0.9	632.6	5.27	36.52	1.37
M-14	1.2	633.2	6.30	37.22	1.43
M-15	1.5	634.2	6.32	37.54	1.47
M-16	1.8	635.7	6.39	37.74	1.54
M-17	2.1	636.8	6.42	37.88	1.55
M-18	2.3	636.9	6.43	37.89	1.56
M-19	2.5	637.1	6.44	38.05	1.56
M-20	2.7	637.2	6.45	38.27	1.57



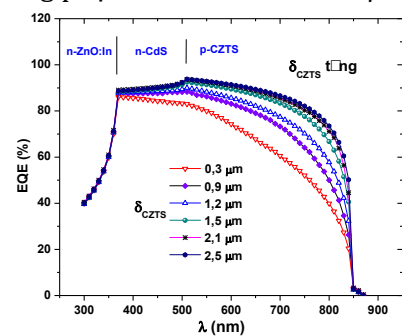
Hình 4. Sự thay đổi (a) điện áp hở mạch, (b) mật độ dòng ngắn mạch, (c) hệ số lấp đầy và (d) hiệu suất chuyển đổi theo chiều dày lớp hấp thụ δ_{CZTS}

Có thể thấy rằng, các giá trị J_{sc} , FF , V_{oc} và η đều phụ thuộc mạnh vào chiều dày của lớp hấp thụ CZTS. Khi chiều dày lớp hấp thụ tăng thì các giá trị đó đều tăng và tăng đáng kể khi $\delta_{CZTS} > 1,2 \mu m$ vì chiều dày lớp hấp thụ tăng thì sẽ hấp thụ được nhiều photon hơn với các bước sóng dài hơn, từ đó sẽ góp phần vào việc tạo ra các cặp điện tử - lỗ trống. Khi $\delta_{CZTS} \geq 2,1 \mu m$ các thông số quang điện như V_{oc} , J_{sc} , FF gần đạt giá trị bão hòa ($V_{oc} \sim 636,8 mV$, $J_{sc} \sim 6,42 mA/cm^2$ và $FF \sim 37,66\%$). Trong khi đó hiệu suất η gia tăng đáng kể từ 1,55% lên đến 1,57%. Các phân tích trên cho thấy chiều dày lớn nhất $\delta_{CZTS} = 2,1 \mu m$ đủ để hấp thụ phần lớn photon đến.

Mặt khác, các thông tin nhận được trên cũng được khẳng định một lần nữa qua kết quả khảo sát ảnh hưởng của δ_{CZTS} lên hiệu suất lượng tử $EQE(\lambda)$ của pin như biểu diễn trên hình 5.

Như vậy, có thể thấy, các thông số quang điện của pin mặt trời phụ thuộc đáng kể vào chiều dày của lớp hấp thụ. Với tiêu chí lựa chọn như trình bày ở trên và để đảm bảo sự phù hợp giữa 4 thông số quang điện đặc trưng của pin,

có thể cho phép chọn độ dày lớp hấp thụ tối ưu nhất trong phạm vi $\delta_{CZTS} = 1,2 \div 2,1 \mu m$.



Hình 5. Sự thay đổi hiệu suất lượng tử $EQE(\lambda)$ theo chiều dày lớp hấp thụ δ_{CZTS}

5. Kết luận

Từ kết quả mô phỏng, mô hình hóa bằng phần mềm SCAPS-1D, ta có thể đưa ra kết luận sau:

- Độ dày của lớp đệm có thể được chọn trong dải $\delta_{CdS} = 80 \div 180 nm$ để đảm bảo màng lắng đọng đồng đều, kết tinh tốt và pin vẫn đạt được các thông số quang điện tối ưu.
- Các thông số quang điện của pin mặt trời phụ thuộc đáng kể vào chiều dày của lớp

hấp thụ, có thể cho phép chọn độ dày lớp hấp thụ tối ưu nhất trong phạm vi $\delta_{\text{CZTS}} = 1,2 \div 2,1 \mu\text{m}$.

Tài liệu tham khảo

- [1] Wang J, Xin X, Lin Z (2011), "*Cu₂ZnSnS₄ nanocrystals and graphene quantum dots for photovoltaics*", *Nanoscale* 3(2011), 3040-8.
- [2] Abdellah Benami (2019), "*Effect of CZTS Parameters on Photovoltaic Solar Cell from Numerical Simulation*", *Journal of Energy and Power Engineering* 13 (2019) 32-36
- [3] Dongwook Lee and Kijung Yong (2014), "*Solution-processed Cu₂ZnSnS₄ superstrate solar cell using vertically aligned ZnO nanorods*", *Nanotechnology* 25 (2014) 065401 (8pp)
- [4] M. ZHONG, S. LIU, H. LI, C. LI (2018), "*Superstrate-type Cu₂ZnSnS₄ solar cells without sulfurization fabricated by spray pyrolysis*", *Chalcogenide Letters* Vol. 15, No. 3, March 2018, p. 133 – 137
- [5] Rafee Mahbub, Md. Saidul Islam, Farhana Anwar, Sakin Sarwar Satter, Saeed Mahmud Ullah (2016), "*Simulation of CZTS thin film solar cell for different buffer layers for high efficiency performance*", *South Asian Journal of Engineering and Technology* Vol.2, No.52 (2016) 1–10
- [6] Würfel, P. (2005), "*Physics of Solar Cells*", Germany, Wiley-VCH.
- [7] Nguyen Duc Hieu, Tran Thanh Thai, Luu Thi Lan Anh, Vu Thi Bich, Vo Thach Son (2011), "*The role of the CdS buffer layer in all-spray ZnO/CdS/Cu(In,Al)S₂ solar cells*", *Proceedings of the Sixth Vietnam-Korea International Joint Symposium Hanoi*, Nov 14 - 15, 2011, pp. 181-184, ISBN: 878-604-911-113-6

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

Số 8 Tầng Bạt Hổ, phường Cửa Nam, TP. Hà Nội
ĐT: 024.39424620 - 39423346 * Fax: 024.38224784
Website: www.nxbgtvt.vn * Email: nxbgtvt@fpt.vn

CHỊU TRÁCH NHIỆM XUẤT BẢN, NỘI DUNG:

Giám đốc - Tổng Biên tập: Nguyễn Minh Nhật

BIÊN TẬP: **Dương Hồng Hạnh**

THIẾT KẾ: **Phương Linh**

Đối tác liên kết: Trường Đại học Mô - Địa chất

Địa chỉ: Số 18 phố Viên, phường Đông Ngạc, TP. Hà Nội

In 500 cuốn khổ 19 x 27cm, tại Công ty cổ phần in và thương mại Ngọc Hưng

Địa chỉ: 296 đường Phúc Diễn, TDP số 1, phường Xuân Phương, TP. Hà Nội.

Số xác nhận đăng ký xuất bản: 5321-2025/CXBIPH/2-110/GTVT.

Mã số sách tiêu chuẩn quốc tế - ISBN: 978-604-76-3274-9.

Quyết định xuất bản số: 114 LK/QĐ-XBGT ngày 18/12/2025.

In xong và nộp lưu chiểu năm 2025.



978-604-76-3274