

BÓNG BÁN DẪN VÀ MẠCH MÀNG MỎNG HỮU CƠ HIỆU SUẤT CAO ĐƯỢC IN HOÀN TOÀN TRÊN LỚP POLYMER SIÊU MỎNG

FULLY PRINTED HIGH-PERFORMANCE ORGANIC THIN-FILM TRANSISTORS AND CIRCUITS ON ULTRATHIN POLYMER LAYERS

Châu Thanh Phương

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 20/12/2025, chấp nhận đăng ngày 06/4/2026

- Tóm tắt:** Các thiết bị điện tử siêu mỏng, dẻo và nhẹ, được chế tạo bằng công nghệ in phủ diện rộng, đang mở ra hướng ứng dụng chi phí thấp như màn hình linh hoạt và cảm biến y tế. Tuy nhiên, việc in hoàn toàn trên nền siêu linh hoạt quy mô lớn vẫn còn là thách thức. Nghiên cứu này giới thiệu các mạch và bóng bán dẫn màng mỏng hữu cơ (OTFTs) được in hoàn toàn trên nền parylene-C dày 1 micron, đạt độ linh động tới $1,0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, thời gian đáp ứng khoảng 1 ms ở điện áp thấp. Thiết bị siêu nhẹ ($\sim 2 \text{ g/m}^2$), vẫn hoạt động ổn định khi bị nén đến 50%, cho thấy tiềm năng ứng dụng lớn trong thiết bị điện tử đeo được với độ bền cơ học cao.
- Từ khóa:** Bóng bán dẫn màng mỏng hữu cơ, thiết bị điện tử in hoàn toàn, nền parylene-C siêu mỏng, thiết bị đeo linh hoạt, vận hành ở điện áp thấp.
- Abstract:** Ultra-thin, flexible, and lightweight electronic devices fabricated through large-area printing technologies are emerging as cost-effective solutions for applications such as flexible displays and biomedical sensors. However, fully printed electronics on highly flexible substrates at large scale remain challenging. This study presents organic thin-film transistor (OTFT) circuits fully printed on 1- μm parylene-C substrates, achieving field-effect mobility up to $1.0 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ and response times of $\sim 1 \text{ ms}$ at low operating voltages. The devices are extremely lightweight ($\sim 2 \text{ g/m}^2$) and maintain stable performance under 50% compression, highlighting their strong potential for wearable electronics with high mechanical durability.
- Keywords:** Organic thin-film transistors, fully printed electronic devices, ultrathin parylene-C substrates, flexible wearable devices, low-voltage operation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển của một thế hệ thiết bị điện tử siêu nhẹ, mỏng và dẻo đang thu hút sự chú ý mạnh mẽ từ giới nghiên cứu toàn cầu. Từ các hệ thống điện tử truyền thống có cấu trúc dày và cứng, công nghệ đã tiến đến mức cho phép chế tạo các thiết bị có thể gắn trực tiếp lên các bề mặt cong hoặc di chuyển như làn da mà không gây khó chịu cho người sử dụng [1-3]. Nhờ khối lượng rất nhỏ và vật liệu thân thiện với môi trường, những thiết bị này mang lại

trải nghiệm sử dụng gần như vô hình.

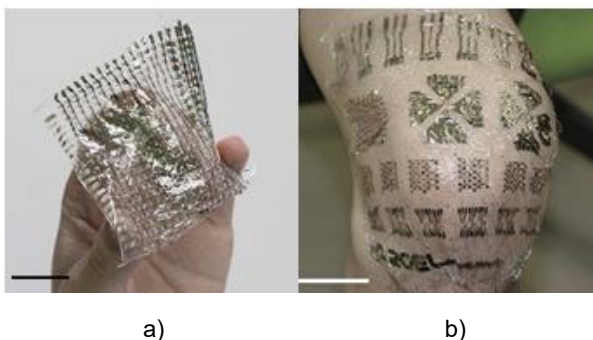
Vật liệu hữu cơ [4] sở hữu tính linh hoạt cơ học tự nhiên nhờ vào liên kết Van der Waals yếu giữa các phân tử [5, 6]. Các thiết bị điện tử chế tạo từ vật liệu hữu cơ đã được ứng dụng rộng rãi, từ màn hình linh hoạt, thẻ RFID [7], pin mặt trời [8], đến các loại cảm biến sinh học và hóa học [9-13]. Một ưu điểm đáng kể khác là khả năng hòa tan của chúng trong dung môi hữu cơ, giúp phù hợp hơn với công nghệ in ấn so với vật liệu vô cơ [14-16].

Thiết bị điện tử hữu cơ được sản xuất hoàn toàn từ dung dịch đang được nghiên cứu rộng rãi vì khả năng giảm chi phí và mở rộng quy mô sản xuất trên những lớp nền cực mỏng ($<10\ \mu\text{m}$).

Trong nghiên cứu này, nhóm đã chế tạo các bóng bán dẫn màng mỏng hữu cơ và mạch biến tần có hiệu suất điện tốt, được in toàn bộ trên lớp polymer linh hoạt. Các thiết bị vận hành hiệu quả ở mức điện áp thấp ($10\ \text{V}$), đạt độ linh động trường điện $1,0\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ và tỷ lệ bật/tắt cao tới 10^6 . Đặc biệt, tính ổn định cơ học rất đáng chú ý: ngay cả khi bị uốn cong hay nén dưới 50% , các thông số như độ linh động và dòng điện không có biến động rõ rệt.

Kết quả cho thấy màn hình LCD hữu cơ được in hoàn toàn trên nền parylene-C siêu mỏng là khả thi. Sử dụng vật liệu tiên tiến do Merck phát triển cho lớp bán dẫn, điện môi và điện cực, các thiết bị đạt độ dày tổng thể dưới $2\ \text{mm}$ và trọng lượng khoảng $2\ \text{g/m}^2$. Việc chế tạo toàn phần bằng in ấn mở ra triển vọng sản xuất hàng loạt.

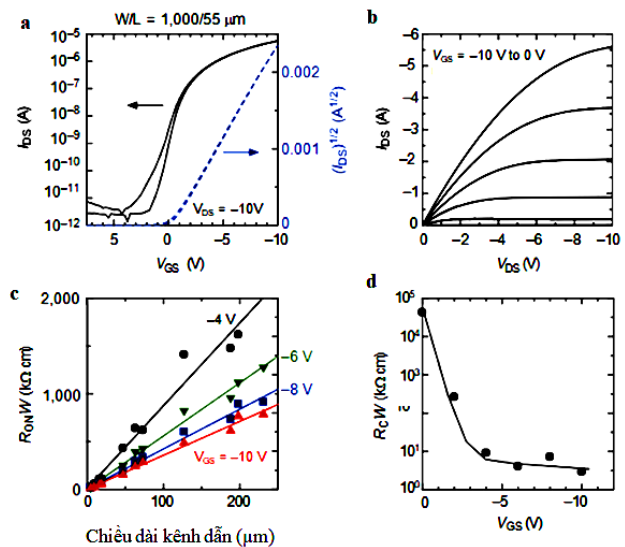
Màng parylene-C được liên kết với một lớp giải phóng có độ bám dính thấp ($13\ \text{mN}$), giúp việc bóc thiết bị ra khỏi tấm đỡ dễ dàng. Hình ảnh từ kính hiển vi phân cực cho thấy lớp bán dẫn hữu cơ có cấu trúc tinh thể lớn, lên đến khoảng $30\ \mu\text{m}$, cho phép phủ trơn vùng kênh giữa cực nguồn và cực thoát, góp phần tạo ra đặc tính điện vượt trội cho thiết bị.



Hình 1. Cấu trúc và tính linh hoạt của các bóng bán dẫn màng mỏng hữu cơ được in trên lớp nền siêu mỏng

(a) Hình ảnh thể hiện các transistor hiệu ứng trường (TFT) hữu cơ được in trên màng parylene-C có độ dày $1\ \mu\text{m}$.

(b) Màng linh hoạt chứa thiết bị điện tử hữu cơ được áp dụng lên đầu gối người, cho thấy khả năng bám sát theo các bề mặt cong.



Hình 2. Đặc tính điện của các bóng bán dẫn TFT hữu cơ in hoàn toàn

(a) Đặc tính truyền dẫn cho thấy tại $V_{DS} = -10\ \text{V}$, transistor đạt độ linh động bão hòa $1,0\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ với tỷ lệ bật/tắt vượt 10^6 .

(b) Đặc tính đầu ra thể hiện quan hệ $I_{DS}-V_{DS}$ khi V_{GS} thay đổi từ 0 đến $-10\ \text{V}$ theo bước $2\ \text{V}$.

(c) Biểu đồ R_{ON} chuẩn hóa theo chiều dài kênh cho thấy quan hệ tuyến tính, cho phép xác định điện trở tiếp xúc.

(d) Điện trở tiếp xúc chuẩn hóa R_C giảm theo V_{GS} và đạt giá trị thấp nhất $\sim 3,0\ \text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ ở $V_{GS} = -10\ \text{V}$. Đây là giá trị nhỏ hơn đáng kể so với nhiều thiết bị dùng điện cực kim loại bay hơi, chứng minh giao diện điện cực in - bán dẫn đã được tối ưu hóa.

2. PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO THIẾT BỊ

Thiết bị TFT hữu cơ được chế tạo trên đế kính $0,7\ \text{mm}$ phủ lớp fluoropolymer Teflon AF

1600 nhằm tạo bề mặt dễ bóc tách. Trên đó, màng parylene-C (1 μm) được lắng đọng bằng CVD, sau đó phủ lớp PVP liên kết ngang (130 nm) để tăng độ phẳng, xử lý plasma oxy đạt độ nhẵn 0,23 nm.

Điện cực cổng được in bằng mực nano bạc, xử lý nhiệt và ẩm để làm mượt, rồi nung tạo lớp dày ~ 100 nm. Lớp điện môi Lisicon D207 được quay phủ, sấy và xử lý UV, có độ dày 360 nm cho thiết bị đơn và 1.500 nm cho mảng TFT. Các điện cực nguồn và thoát cũng được in từ mực nano bạc, xử lý thêm bằng SAM để cải thiện tiếp xúc với lớp bán dẫn.

Tiếp đó, lớp ngân hàng được in từ Teflon AF 1600 để định hình vùng in bán dẫn. Cuối cùng, lớp bán dẫn loại p (Lisicon S1200) được in, sau đó gia nhiệt 100°C trong 1 phút để hoàn thiện cấu trúc TFT.

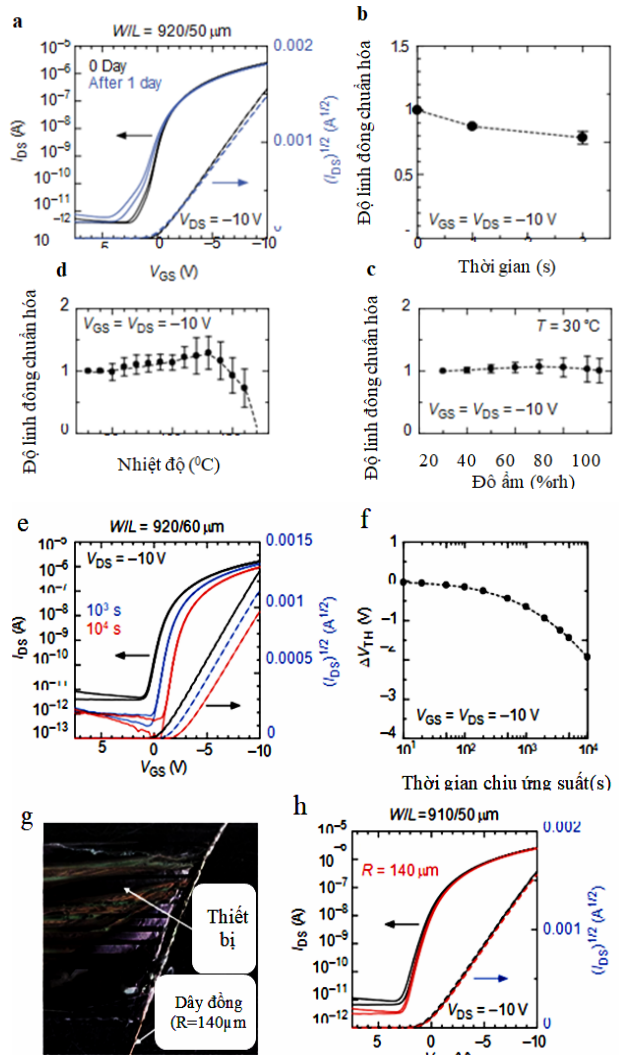
3. TÍNH ỔN ĐỊNH CỦA THIẾT BỊ TFT HỮU CƠ IN TOÀN PHẦN

Độ bền của bóng bán dẫn hữu cơ in được đánh giá trong điều kiện môi trường tự nhiên. Kết quả cho thấy sau 24 giờ lưu trữ ở 25°C và độ ẩm 20%, thiết bị chỉ giảm nhẹ dòng điện và tăng điện áp ngưỡng nhưng vẫn hoạt động hiệu quả.

Theo dõi đặc tính theo thời gian (Hình 3b) cho thấy sau 3 ngày, độ linh động suy giảm 21%, vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận, chứng tỏ khả năng ổn định của thiết bị trong khí quyển. Ngoài ra, thiết bị cũng được kiểm tra trong điều kiện khắc nghiệt hơn (nhiệt độ và độ ẩm cao) để đánh giá thêm độ ổn định lâu dài.

Thiết bị được đánh giá trong nhiều điều kiện môi trường và cơ học. Sau 24 giờ trong không khí (25°C , 20% RH), thông số điện chỉ biến đổi nhẹ dù không có lớp thụ động. Độ linh động suy giảm 21% sau 3 ngày, cho thấy tính ổn định đáng kể. Khi khảo sát nhiệt độ, độ

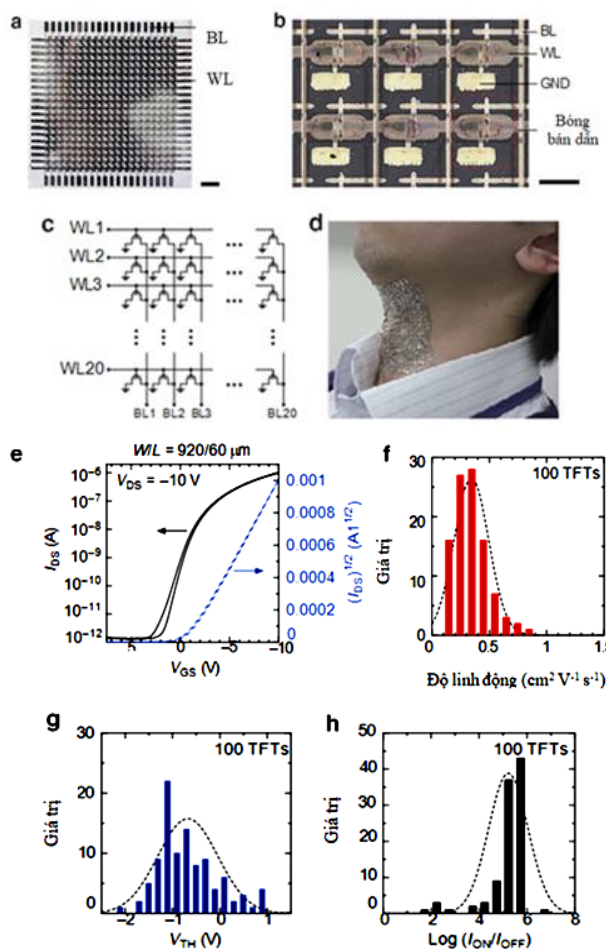
linh động tăng đến 130°C rồi giảm nhẹ, trong khi ở môi trường ẩm cao (95% RH, 30°C), thiết bị vẫn duy trì hiệu suất ổn định.



Hình 3. Độ ổn định của các bóng bán dẫn TFT hữu cơ được chế tạo bằng kỹ thuật in hoàn toàn

Dưới điện áp phân cực liên tục (-10 V), ΔV_{TH} chỉ thay đổi $0,65$ V sau 10^3 giây và $1,9$ V sau 10^4 giây, tương đương các thiết bị bay hơi chân không. Về cơ học, TFT in có thể quấn quanh dây đồng bán kính 140 mm mà vẫn hoạt động bình thường; đặc tính truyền giữa trạng thái uốn và phẳng gần như không khác biệt (dòng lệch 3,9%, linh động thay đổi 1,6%). Nhờ màng nền siêu mỏng, mức căng cơ học $<0,5\%$ nên biến dạng không ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất.

Các transistor trong mảng hoạt động ở điện áp thấp (-10 V) vẫn đạt hiệu suất cao: tỷ lệ bật/tắt $\sim 10^5$, độ linh động $\sim 0,7\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, dù lớp điện môi dày 1.500 nm nhằm tăng độ bền cách điện. Đánh giá 100 thiết bị (25% tổng số) cho thấy: độ linh động bão hòa trung bình $0,34 \pm 0,15\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (tối đa 0,88), điện áp ngưỡng $-0,68 \pm 0,63\text{ V}$, log (tỷ lệ bật/tắt) $5,2 \pm 0,8$. Các thông số này ổn định và tương đương với thiết bị trên nền P_{EN} dày $125\text{ }\mu\text{m}$.



Hình 4. Mảng bóng bán dẫn TFT hữu cơ kích thước lớn

Một mảng 20×20 transistor (400 thiết bị) được in trên nền parylene-C linh hoạt kích thước $10 \times 10\text{ cm}$, cho thấy khả năng triển khai quy mô lớn. Hình ảnh toàn cảnh và cận cảnh minh chứng độ đồng đều cấu trúc, trong khi sơ đồ mạch thể hiện kết nối giữa các thiết bị. Mảng có thể uốn cong và gắn quanh cổ họng, chứng

tỏ khả năng ứng dụng cho cảm biến sinh học và thiết bị đeo.

Một transistor tiêu biểu đạt độ linh động bão hòa $0,7\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ở điện áp thấp ($V_{\text{GS}} = V_{\text{DS}} = -10\text{ V}$), cùng tỷ lệ bật/tắt cao dù sử dụng lớp điện môi dày 1.500 nm . Phân tích 100 thiết bị trong mảng cho thấy các thông số phân bố ổn định: độ linh động trung bình $0,34 \pm 0,15\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (tối đa 0,88), điện áp ngưỡng $-0,68 \pm 0,63\text{ V}$, và log (tỷ lệ bật/tắt) $5,2 \pm 0,8$, phù hợp phân phối Gaussian.

4. ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN CƠ HỌC CỦA CÁC THIẾT BỊ TFT ĐƯỢC IN HOÀN TOÀN

Để kiểm tra khả năng chịu biến dạng cơ học, các thiết bị TFT hữu cơ cùng với mạch biến tần tải diode loại p được đặt trên một lớp đàn hồi (NITOMS J0930) đã được kéo giãn trước. Sau đó, khi lớp đàn hồi được thả lỏng, lực đàn hồi truyền vào lớp màng, tạo ra hệ thống nếp gấp và uốn cong mô phỏng biến dạng cơ học. Hình 5a cho thấy thiết bị trước và sau khi giãn, với diện tích bị thu gọn gần một nửa so với ban đầu.

(b) Hình ảnh hiển vi điện tử (SEM) từ phía trên thiết bị bị nén 50% cho thấy sự xuất hiện của nếp gấp và gợn sóng trên màng nền.

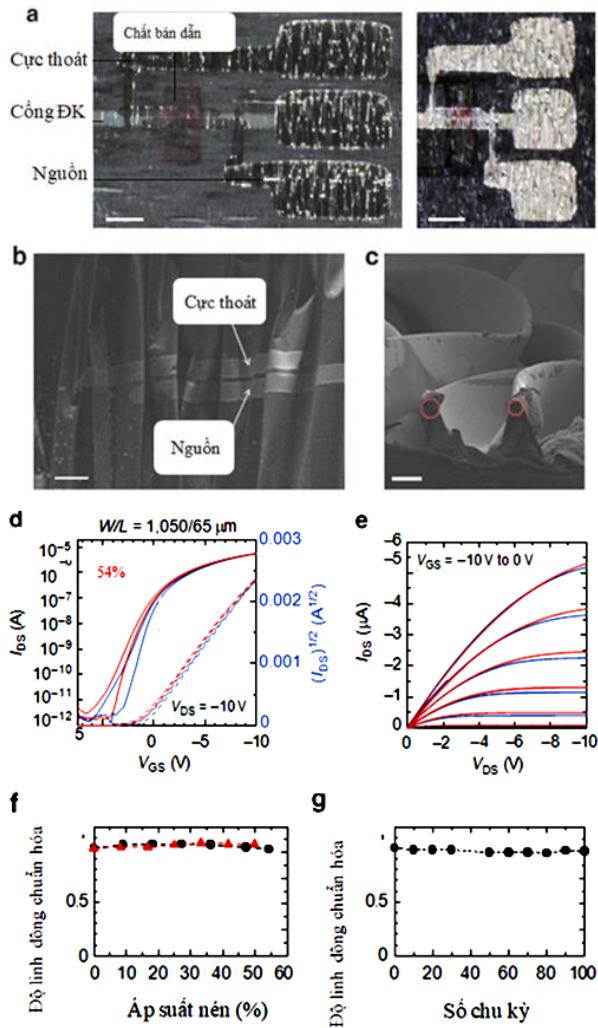
(c) Hình SEM mặt cắt cho thấy thiết bị có thể gấp lại với bán kính cong nhỏ khoảng 5 mm .

(d) Đặc tính truyền được đo trước và sau khi nén vuông góc với dòng điện thoát nguồn (IDS), với sự thay đổi rất nhỏ về thông số điện.

(e) Các đặc tính đầu ra cho thấy đáp ứng tuyến tính được duy trì ổn định sau khi chịu biến dạng nén đến 54%.

(f) Đồ thị so sánh độ linh động theo hai hướng biến dạng: song song và vuông góc với dòng điện. Kết quả không ghi nhận sự suy giảm đáng kể nào.

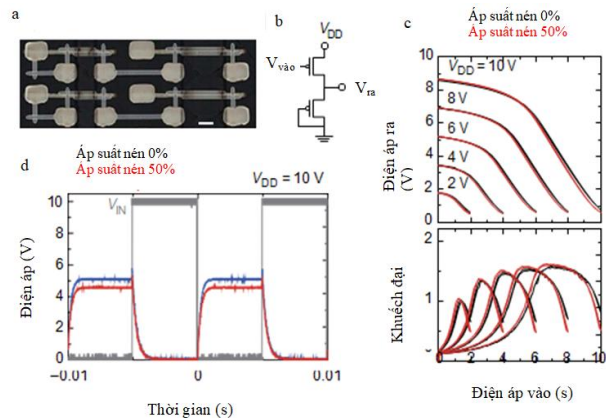
(g) Trong một thử nghiệm lặp, các thiết bị được nén và giãn liên tục từ 0 đến 50% với tần suất 3 lần/phút. Sau 100 chu kỳ, độ linh động chỉ thay đổi khoảng 4%, khẳng định độ bền cơ học cao và khả năng hoạt động lâu dài dưới tác động cơ học lặp lại.



Hình 5. Ảnh hưởng của kéo nén đến hiệu suất của bóng bán dẫn TFT hữu cơ được in toàn bộ

Để đánh giá độ bền cơ học, TFT hữu cơ và mạch biến tần tải diode loại p được đặt trên lớp đàn hồi đã kéo giãn trước. Khi thả lỏng, lực đàn hồi tạo nếp gấp và uốn cong mô phỏng biến dạng. Thiết bị sau khi giãn bị thu gọn gần một nửa diện tích (Hình 5a). Ảnh SEM bề mặt và mặt cắt cho thấy sự xuất hiện gợn sóng, đồng thời chứng minh khả năng gấp với bán kính cong ~5 mm.

Đặc tính truyền và đầu ra vẫn ổn định sau khi nén đến 54%, với thay đổi điện nhỏ. Độ linh động theo cả hai hướng biến dạng (song song và vuông góc với dòng điện) không suy giảm đáng kể. Trong thử nghiệm chu kỳ nén - giãn liên tục (0–50%, 3 lần/phút), sau 100 chu kỳ độ linh động chỉ giảm 4%, chứng tỏ độ bền cơ học cao và khả năng hoạt động lâu dài.



Hình 6. Hiệu suất hoạt động nhanh của các mạch hữu cơ in toàn phần

Một mạch biến tần đơn cực dùng tải diode được in trực tiếp trên màng parylene-C mỏng, với tỷ lệ kích thước kênh giữa transistor tải và điều khiển là 2,6:1 (chiều dài kênh 20 μm). Đặc tính truyền cho thấy khi nén 50%, điểm ngắt ($V_{OUT} = 5,84$ V tại $V_{DD} = 10$ V; 0,92 V tại $V_{DD} = 2$ V) và độ lợi tín hiệu nhỏ (1,61 tại 10 V, 1,00 tại 2 V) chỉ thay đổi dưới 5%. Đáp ứng tần số cho thấy tổng độ trễ 1,12 ms ở trạng thái bình thường, tăng nhẹ lên 1,20 ms khi nén 54%, chứng tỏ hiệu năng tốc độ cao vẫn duy trì ổn định.

Mặc dù in trên chất nền siêu mỏng và không có lớp bảo vệ, thiết bị vẫn bền cơ học và hoạt động ổn định trong khí quyển. Theo nghiên cứu trước, việc bổ sung lớp thụ động sẽ tăng cường chống ẩm/oxy và ổn định hơn dưới nhiệt độ hoặc biến dạng cao. Độ bền nhiệt - ẩm cùng tính mỏng nhẹ giúp thiết bị phù hợp ứng dụng gắn trực tiếp lên cơ thể để theo dõi sinh học. Quy trình in yêu cầu kiểm soát bề

mặt nền, lớp phẳng hóa đóng vai trò then chốt trong giảm nhám và tối ưu năng lượng bề mặt, hỗ trợ nhiều kỹ thuật in khác nhau.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phát triển thành công bóng bán dẫn hữu cơ và mạch biến tần được in toàn phần trên màng polymer dày 1 μm , đạt độ mỏng tổng cộng khoảng 2 μm (bao gồm cả

nền). Thiết bị thể hiện khả năng vận hành ổn định trong điều kiện khí hậu thường, dưới tác động của nhiệt độ và độ ẩm, cũng như chịu được biến dạng cơ học lên đến 50% mà không suy giảm hiệu năng. Những kết quả này minh chứng rằng các thiết bị TFT hữu cơ in hoàn chỉnh có thể trở thành giải pháp lý tưởng cho các hệ thống điện tử linh hoạt diện rộng như cảm biến sức khỏe gắn liền cơ thể.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kim, H., Kim, D., Kim, J., et al. Advances and perspectives in fiber-based electronic devices. *Npj Flexible Electronics*, vol. 9, no. 84, 2025.
- [2] He, T., Wang, J., Hu, D. et al. Epidermal electronic-tattoo for plant immune response monitoring. *Nature Communications*, vol. 16, article. 3244, 2025.
- [3] Salvatore, G. A. et al. Wafer-scale design of lightweight and transparent electronics that wraps around hairs. *Nat. Commun*, vol. 5, article. 2982, 2014.
- [4] Sara Ruiz-Molina, Simona Ricci, Carme Martínez-Domingo, et al. Influence of mechanical stress on flexible electrolyte-gated organic field-effect transistors. *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 13, 4807–4815, 2025.
- [5] Jeon, S.-P., Jo, J.-W. & Park, S.-K. High-performance metal oxide TFTs for flexible displays: materials, fabrication, architecture, and applications. *Soft Science*, vol. 5, no. 1, 2025.
- [6] White, M. S. et al. Ultrathin, highly flexible and stretchable PLEDs. *Nat. Photonics*, vol. 7, 811–816, 2013.
- [7] Wang, Xintai; Kuznetsov, Maksim; Jiang, Wenfeng; Tang, Zhongyu; Wei, Zhangchenyu; Zhang, Aili; Wei, Naixu; Li, Xiaoying. Printed RFID systems for sustainable IoT: synergistic advances in conductive inks, antenna architectures, and scalable manufacturing. *Frontiers in Electronics*, vol. 6, 2025.
- [8] Z. Xiao, J. Liu, X. Chen, Z. Suo, X. Cao, N. Xu, Z. Yao, C. Li, X. Wan & Y. Chen. Ultra-flexible organic solar cells based on eco-friendly cellulose substrate with efficiency approaching 19%. *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 13, 2301–2308, 2025.
- [9] Hammock, M. L. et al. The evolution of electronic skin (e-skin): a brief history, design considerations, and recent progress. *Adv. Mater*, vol. 25, 5997–6038, 2013.
- [10] J. Ma, Y. Lu, J. Li, Z. Rong, A. Wei, Z. Liu. Flexible pressure sensors based on electrospun PAN fiber films incorporated with graphene/polypyrrole composites and engineered PDMS microstructures. *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 13, 22695–22709, 2025.
- [11] Tien, N. T. et al. A flexible bimodal sensor array for simultaneous sensing of pressure and temperature. *Adv. Mater*, vol. 26, 794–804, 2014.
- [12] Hammock, M. L. et al. Organic transistors with ordered nanoparticle arrays as a tailorable platform for selective, in situ detection. *ACS Nano*, vol. 6, 3100–3108, 2012.

- [13] B. Amna et al. J. Mater. Chem. C/RSC, Organic field-effect transistor-based sensors. *Journal of Materials Chemistry*, 2025.
- [14] D. Simatos et al. Electrolyte-gated organic field-effect transistors with high operational stability. *SmartMat*, vol. 5, no. 6, Art. no. e1291, 2024.
- [15] X. Zhao, P. Du, F. Qiu, Y. Hou, H. Lu, J. Zhang, X. Geng, G. Dun, S. Chen, M. Lei & T.-L. Ren, Driving organic field-effect transistors: enhancing crystallization and electrical performance with blends and inkjet printing. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 7, article 192, 2024.
- [16] D. D. Thanh. Recent advances in organic semiconductor crystalline materials and techniques, *Materials Chemistry Frontiers*, 2025.

Thông tin liên hệ: **Châu Thanh Phương**

Điện thoại: 0989971838 - Email: ctpuong@uneti.edu.vn

Khoa Điện tử và Kỹ thuật máy tính, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.