

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

KHÔNG ĐỨC CHIẾN

NGHIÊN CỨU, CHẾ TẠO
CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ MÀNG MỎNG PU
ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG CHO IoT

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - NĂM 2021

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

KHÔNG ĐỨC CHIẾN

NGHIÊN CỨU, CHẾ TẠO
CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ MÀNG MỎNG PU
ĐỊNH HƯỚNG ỨNG DỤNG CHO IoT

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Chuyên ngành: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ
Mã số: 9 52 02 03

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
PGS. TS ĐÀO THANH TOẢN
PGS. TS HOÀNG VĂN PHÚC

HÀ NỘI - NĂM 2021

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Luận án và các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi dưới sự hướng dẫn của các cán bộ hướng dẫn. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa được công bố trong bất kỳ công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng tham khảo đều đã được trích dẫn đầy đủ và theo đúng quy định.

Hà Nội, ngày 19 tháng 5 năm 2021

Tác giả

Khổng Đức Chiến

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới tập thể hướng dẫn khoa học cho luận án này là PGS. TS Đào Thanh Toán và PGS. TS Hoàng Văn Phúc. Những định hướng nghiên cứu và sự hỗ trợ đặc lực của các thầy là điều kiện quan trọng để tôi hoàn thành luận án này.

Xin gửi cảm ơn chân thành các thầy cô giáo trong Bộ môn Kỹ thuật Vi xử lý, Học viện KTQS vì những đóng góp chuyên môn, hỗ trợ và giúp đỡ nghiên cứu sinh trong quá trình nghiên cứu.

Bên cạnh đó, tôi xin chân thành cảm ơn các thầy cô giáo trong Bộ môn Kỹ thuật Điện tử, Đại học GTVT đã vì đã tạo điều kiện cơ sở vật chất, phòng thí nghiệm trong quá trình nghiên cứu của nghiên cứu sinh.

Tôi xin gửi lòng biết ơn tới GS. Heisuke Sakai, Viện Khoa học và Công nghệ tiên tiến Nhật Bản (JAIST) và Đại học Kokushikan-Nhật Bản; Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) thông qua đề tài mã số 103.02-2017.34 vì những trao đổi chuyên môn, hỗ trợ thí nghiệm và tài trợ một phần kinh phí cho quá trình nghiên cứu của tôi.

Tôi dành những tình cảm và sự trân trọng để gửi tới chỉ huy và các đồng nghiệp tại Trung tâm Giám định Chất lượng, Cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng vì đã tạo điều kiện tốt nhất về trang thiết bị đo lường thử nghiệm cũng như điều kiện làm việc trong quá trình nghiên cứu.

Cuối cùng, xin gửi lời cảm ơn tới các thành viên thân yêu trong gia đình đã chia sẻ khó khăn, tiếp thêm động lực giúp tôi hoàn thành luận án này.

Trân trọng!

MỤC LỤC

MỤC LỤC	
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	iv
DANH MỤC HÌNH VẼ	vi
DANH MỤC BẢNG	x
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC	xi
THUẬT NGỮ VÀ ĐỊNH NGHĨA	xii
GIỚI THIỆU LUẬN ÁN	1
Chương 1. TỔNG QUAN CHUNG VỀ CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ ỨNG DỤNG TRONG IoT	7
1.1. Giới thiệu nút IoT và ứng dụng	7
1.1.1. Khái niệm về IoT và nút IoT	7
1.1.2. Ứng dụng của nút IoT	9
1.1.3. Yêu cầu đối với cảm biến áp lực ứng dụng cho IoT	14
1.2. Giới thiệu cảm biến áp lực hữu cơ	15
1.2.1. Khái niệm cảm biến áp lực và các tham số cơ bản	15
1.2.2. Cấu tạo và phân loại cảm biến	17
1.3. Khảo sát chung về các nghiên cứu cảm biến áp lực hữu cơ	21
1.4. Kết luận chương	24

Chương 2. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ SỬ DỤNG MÀNG MỎNG PU.....	26
2.1. Giới thiệu	26
2.2. Quy trình chế tạo cảm biến.....	29
2.3. Kiểm tra và thử nghiệm xác định tham số cảm biến.....	32
2.3.1. Độ nhạy cảm biến	35
2.3.2. Độ lặp lại của cảm biến.....	42
2.3.3. Sự ảnh hưởng của nhiệt độ.....	44
2.3.4. Độ uốn cong của cảm biến	47
2.4. Kết luận chương.....	48
Chương 3. NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ TÍCH CỰC DỰA TRÊN OTFT THƯỜNG ĐÓNG.....	49
3.1. Giới thiệu	49
3.2. Cấu trúc cảm biến áp lực dựa trên OTFT thường đóng.....	54
3.2.1. Cấu trúc chi tiết của OTFT.....	54
3.2.2. Cấu trúc chi tiết của cảm biến tích cực.....	55
3.3. Quy trình chế tạo cảm biến dựa trên OTFT thường đóng.....	56
3.3.1. Quy trình chế tạo OTFT.....	56
3.3.2. Thiết lập OTFT sang trạng thái thường đóng.....	62
3.4. Đánh giá tham số của cảm biến áp lực hữu cơ dựa trên OTFT thường đóng.....	64
3.5. Kết luận chương.....	69

Chương 4. XÂY DỰNG VÀ THỬ NGHIỆM ỨNG DỤNG NÚT IoT VỚI CẢM BIẾN ÁP LỰC	71
4.1. Xây dựng nút IoT	71
4.2. Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động của ô tô.....	73
4.3. Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động bước chân	81
4.4. Nút IoT trong hệ thống giám sát công trình xây dựng.....	87
4.5. Kết luận chương.....	93
KẾT LUẬN.....	95
PHỤ LỤC 1	97
PHỤ LỤC 2	104
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....	107
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	109

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Nghĩa Tiếng Anh	Nghĩa Tiếng Việt
ADC	Analog to Digital Converter	Bộ biến đổi tương tự-số
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor	Mạch tích hợp công nghệ MOS
CNT	Carbon Nanotube	Ống nano Các-bon
DAQ	Data Acquisition	Mạch thu thập dữ liệu
GPS	Global Position System	Hệ thống định vị toàn cầu
IoT	Internet of Things	Internet kết nối vạn vật
ITO	Indium Tin Oxide	Ô xit Indi-Thiếc
ITS	Intelligent Transport System	Hệ thống giao thông thông minh
LOD	Limit of Detection	Giới hạn phát hiện
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Transistor hiệu ứng trường công nghệ MOS
MW CNTs	Multiwall Carbon Nanotubes	Ống nano Các-bon đa vách
NPs	Nanoparticles	Hạt nano
OTFT	Organic Thin Film Transistor	Transistor màng mỏng hữu cơ
PCB	Printed Circuit Board	Mạch in
PU	Polyurethane	Màng Polyurethane
RFID	Radio Frequency Identification	Nhận dạng vô tuyến

SHM	Structural Health Monitoring	Theo dõi tình trạng công trình xây dựng
SW CNTs	Single-wall Carbon Nanotubes	Ống nano Các-bon đơn vách
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System	Hệ thống thông tin di động
VPS	Virtual Private Server	Máy chủ cá nhân ảo

DANH MỤC HÌNH VẼ

1.1	Mô hình hệ thống IoT.	8
1.2	Mô tả cấu trúc của một nút cảm biến IoT.	9
1.3	Các cảm biến xâm lấn: (a) cảm biến từ trường, (b) cảm biến khí và (c) cảm biến sử dụng các vòng dây kim loại [21].	10
1.4	Các cảm biến không xâm lấn: (a) cảm biến radar; (b) hệ thống camera và (c) cảm biến laser [21].	11
1.5	Nút IoT thu thập áp lực bàn chân phục vụ quá trình phân tích và điều trị bệnh nhân [26].	12
1.6	(a) Nút IoT thu thập áp lực bàn chân giám sát chuyển động hàng ngày [27] và (b) theo dõi sự hồi phục của bệnh nhân [28].	13
1.7	Sơ đồ minh họa nguyên lý làm việc của cảm biến với các hiệu ứng (a) áp trở; (b) áp điện và (c) áp dung [2].	18
1.8	Sự phân chia các dải áp lực và các ứng dụng tương ứng.	20
1.9	(a) Cấu trúc cảm biến [42] sử dụng PDMS với bề mặt gợn sóng cỡ micromet và (b) đặc tuyến cảm biến khi khảo sát các bề mặt khác nhau.	22
1.10	(a) Hình ảnh bề mặt lớp tích cực sử dụng PDMS với kết cấu kim tự tháp có kích thước micromet sắp xếp đều nhau trên bề mặt [34], (b) [35] và (c) [36].	22
1.11	Cấu trúc cảm biến sử dụng vật liệu (a) Ecoflex dạng xốp có các bọt khí [39] và (b) PDMS kết hợp khe hở không khí [38].	23
2.1	Cấu trúc cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU.	28
2.2	Các bước chuẩn bị điện cực và màng PU.	30

2.3	Gia công hoàn thiện cảm biến: (a) quá trình tạo lớp điện cực, (b) đóng gói cảm biến, (c) cảm biến ở trạng thái thường (bên trái) và ở trạng thái uốn cong (bên phải).	31
2.4	Ảnh mặt cắt cảm biến sau chế tạo.	32
2.5	Thí nghiệm khảo sát đặc tuyến cảm biến.	33
2.6	(a) Hình ảnh minh họa và (b) sơ đồ tương đương của cảm biến.	33
2.7	(a) Cảm biến ở trạng thái thường và (b) trạng thái khi tác động lực.	35
2.8	Đặc tuyến cảm biến ở độ dày (a) 100 μm , (b) 200 μm , (c) 300 μm và (d) 500 μm	36
2.9	Độ thay đổi điện dung hiệu quả của cảm biến ứng theo độ dày của màng PU	37
2.10	Đặc tuyến cảm biến của cảm biến 100 μm theo quy luật hàm mũ.	40
2.11	Đáp ứng của cảm biến với (a) các áp lực lặp lại 0,65 MPa và (b) các áp lực lặp lại thay đổi 0,08; 0,2; 0,4; 0,65; 1,0 và 1,5 MPa.	43
2.12	Thử nghiệm độ lặp lại cảm biến sử dụng hệ thống thử nghiệm độ sâu vết hằn bánh xe. (a) Cảm biến được gắn lên tấm bê tông asphalt, (b) mẫu thử được đặt dưới bánh xe hệ thống thử nghiệm vết hằn bánh xe, (c) tín hiệu cảm biến thu được trên máy tính bằng trong quá trình thử nghiệm và (d) minh họa quá trình thử nghiệm.	44
2.13	Thử nghiệm tác động của nhiệt độ đối với cảm biến 100 μm	45
2.14	Sự phụ thuộc của (a) đặc tuyến cảm biến và (b) độ nhạy theo nhiệt độ.	46
2.15	Điện dung cảm biến phụ thuộc vào bán kính cong.	47
3.1	Cấu trúc của cảm biến tích cực sử dụng (a) OTFT thường mở và (b) OTFT thường đóng.	50
3.2	(a) OTFT ở chế độ thường mở và (b) OTFT ở chế độ đóng khi được cung cấp điện áp V_{GS}	51
3.3	Cấu trúc cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng OTFT (a) [81] và (b) [34].	51

3.4	(a) Cấu trúc cảm biến và (b) lớp điện môi cực của PEG/PAA của [89].	52
3.5	OTFT làm việc ở điện áp thấp khi sử dụng lớp Al_2O_3 6 nm kết hợp Parylene 25 nm (a) [94] và (b) cảm biến sử dụng OTFT với cấu trúc cực cửa thả nổi [90].	53
3.6	(a) Cấu trúc OTFT thường đóng và (b) cảm biến áp lực hữu cơ trên cơ sở OTFT thường đóng.	54
3.7	Cấu trúc OTFT với cực cửa thả nổi bằng vật liệu hữu cơ Cytop.	55
3.8	(a) Cảm biến áp lực hữu cơ trên cơ sở OTFT và (b) sơ đồ tương đương của cảm biến.	56
3.9	Mô tả các bước chế tạo OTFT.	57
3.10	Hình ảnh của OTFT sau khi chế tạo (a), sơ đồ tương đương của bốn OFET (b), sơ đồ kiểm tra đặc tuyến ra (c) và đặc tuyến truyền đạt (d).	59
3.11	Đặc tuyến ra (a) và đặc tuyến truyền đạt (b) của OTFT.	60
3.12	Lập trình thường đóng cho OTFT (a) và hình ảnh của bước lập trình (b).	62
3.13	Đặc tuyến truyền đạt của OTFT trước và sau khi lập trình thường đóng.	63
3.14	(a) Đặc tuyến cảm biến tích cực sử dụng OTFT và (b) kết quả thử nghiệm đáp ứng của cảm biến đối với các áp lực lặp lại tại $p = 0,65$ MPa.	64
3.15	Sơ đồ mô tả sự phân bố điện tích và điện trường của cảm biến tích cực.	65
3.16	So sánh độ trễ cảm biến: (a) Đáp ứng cảm biến thụ động với độ trễ 7,7 % và (b) đáp ứng cảm biến khi kết hợp với OTFT với độ trễ 1,8 %.	66
4.1	Các mức áp lực: (1) áp lực của bánh xe ô tô, (2) áp lực của bàn chân người, (3) áp lực biến dạng của dầm bê tông.	72
4.2	Cấu trúc nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ.	72

4.3	(a) Nút IoT không dây thu thập dữ liệu cảm biến và (b) hình ảnh hệ thống.	75
4.4	Lưu đồ thuật toán làm việc hệ thống giám sát chuyển động của ô tô.	76
4.5	(a) Thử nghiệm nút IoT giám sát chuyển động xe ô tô và (b) cận cảnh cảm biến gắn trên mặt đường và máy tính bảng.	77
4.6	Tín hiệu xung bánh trước và bánh sau của xe ô tô với vận tốc 5 km/h.	78
4.7	(a) Sơ đồ khối nút IoT theo dõi chuyển động bước chân và (b) hình ảnh hệ thống.	83
4.8	Lưu đồ làm việc của hệ thống theo dõi chuyển động bước chân.	84
4.9	(a) Hệ thống với cảm biến được gắn dưới đế giày; (b) hình ảnh quá trình thử nghiệm.	85
4.10	Hình ảnh tín hiệu trên màn hình máy tính bảng; (a) quá trình chuyển trạng thái từ ngồi → đứng lên → đứng; (b) tín hiệu bước chân và (c) trạng thái từ đứng → ngồi xuống.	86
4.11	(a) Cảm biến được tạo thành từ cốt liệu bê tông hữu cơ và (b) cảm biến được gắn trên bề mặt công trình cần giám sát.	88
4.12	Nút IoT không dây, kết nối internet sử dụng chipset STM32 theo dõi tình trạng công trình xây dựng.	90
4.13	Hình ảnh nút IoT không dây với kích thước (6×10×4) cm.	90
4.14	Lưu đồ thuật toán làm việc của nút IoT không dây giám sát công trình dân dụng.	91
4.15	Hình ảnh thử nghiệm khả năng phát hiện sự biến dạng của dầm bê tông của cảm biến và kết quả hiển thị trên phần mềm.	92
4.16	Tín hiệu cảm biến hiển thị trên trang web hệ thống.	93

DANH MỤC BẢNG

2.1	Đặc tính kỹ thuật các thiết bị đo, thiết bị thử nghiệm sử dụng trong luận án.	34
2.2	Độ nhạy của cảm biến khảo sát ở các độ dày khác nhau.	38
2.3	So sánh kết quả đánh giá của cảm biến đề xuất với một số nghiên cứu gần đây	40
3.1	Các tham số kỹ thuật của OTFT	62
3.2	Các tham số cơ bản của cảm biến thụ động và cảm biến tích cực	67
3.3	So sánh kết quả đánh giá của cảm biến dựa trên OTFT thường đồng với một số nghiên cứu gần đây	68
3.4	Công suất tiêu thụ của cảm biến dựa trên OTFT thường đồng so với các công trình nghiên cứu gần đây.	69
4.1	Kết quả tính toán vận tốc của xe ô tô và sai số	79
4.2	Kết quả tính toán trọng tải của xe ô tô tại $v = 5$ km/h và sai số	80

DANH MỤC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
ΔX	Độ thay đổi tín hiệu đầu ra cảm biến
ΔP	Độ thay đổi áp lực
X_0	Giá trị đầu ra cảm biến khi chưa có áp lực tác động
C	Điện dung cảm biến
S	Độ nhạy cảm biến
ε	Hệ số điện môi tương đối
ε_0	Hệ số điện môi chân không
A	Diện tích
d	Độ dày
V	Điện áp
v	Vận tốc
I	Dòng điện
t	Thời gian
σC_H	Hiệu số C sau chu kỳ áp lực thứ nhất với C_0
L	Độ dài kênh
W	Độ rộng kênh
μ	Độ linh động điện tử
λ	Bước sóng
σI_{DSH}	Hiệu số I_{DS} sau chu kỳ áp lực thứ nhất với I_{DS0}
K_W	Hệ số hiệu chuẩn
l_b	Khoảng cách hai trục bánh xe

DANH MỤC CÁC THUẬT NGỮ VÀ ĐỊNH NGHĨA

Để người đọc tiện theo dõi và tránh nhầm lẫn, trong luận án sử dụng các thuật ngữ và định nghĩa như sau.

Cảm biến áp lực hữu cơ: Cảm biến áp lực được tạo thành từ các vật liệu hữu cơ, có chức năng chuyển đổi áp lực thành tín hiệu điện. Trong luận án, thuật ngữ *cảm biến áp lực* dùng để chỉ cảm biến áp lực hữu cơ.

Cảm biến áp lực điện trở hữu cơ: Cảm biến áp lực hữu cơ hoạt động dựa trên hiệu ứng áp trở (piezoresistive), theo đó điện trở đầu ra của cảm biến thay đổi theo áp lực tác động vào cảm biến.

Cảm biến áp lực điện tích hữu cơ: Cảm biến áp lực hữu cơ hoạt động dựa trên hiệu ứng áp điện (piezoelectricity), theo đó điện tích đầu ra của cảm biến thay đổi theo áp lực tác động vào cảm biến.

Cảm biến áp lực điện dung hữu cơ: Cảm biến áp lực hữu cơ hoạt động dựa trên hiệu ứng áp dung (piezocapacitive), theo đó điện dung đầu ra của cảm biến thay đổi theo áp lực tác động vào cảm biến.

Cảm biến áp lực thụ động hữu cơ: Cảm biến áp lực hữu cơ hoạt động như một linh kiện điện tử có trở kháng thay đổi, trong đó tín hiệu đầu ra của cảm biến là điện trở, độ tự cảm hoặc điện dung. Trong luận án, cảm biến thụ động còn được gọi là *thành phần thụ động* hay *cảm biến thụ động*.

Cảm biến áp lực tích cực hữu cơ: Cảm biến áp lực hữu cơ hoạt động như một máy phát, theo đó tín hiệu đầu ra của cảm biến là điện tích, điện áp hay dòng điện.

OTFT Thường đóng: Là OTFT có kênh dẫn đã được tạo thành khi chưa được cấp nguồn V_{GS} , V_{DS} .

OTFT Thường mở: Là OTFT chưa hình thành kênh dẫn khi chưa được cấp nguồn V_{GS} , V_{DS} .

GIỚI THIỆU LUẬN ÁN

1. Tính cấp thiết của luận án

Sự hình thành và phát triển của cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 với các thành phần chính là hệ thống điều khiển vật lý (*Cyber Physical Systems – CPS*), mạng kết nối vạn vật (*Internet of Things – IoT*) và điện toán đám mây (*Cloud Computing*). Đó là kết quả của sự phát triển các thiết bị thông minh có khả năng kết nối không dây, tiêu thụ công suất thấp và xử lý dữ liệu lớn (*Big Data*). Mục tiêu của IoT chính là kết nối vạn vật để theo dõi, giám sát và tự động điều khiển mọi lúc mọi nơi cho vô số các ứng dụng trong đời sống, sản xuất, y tế, giao thông, môi trường v.v..

Với vai trò là mạch vào đầu tiên chuyển tín hiệu vật lý không điện thành tín hiệu điện, cảm biến có vai trò cực kỳ quan trọng trong các hệ thống thu thập số liệu. Điều này có nghĩa là nhu cầu về cảm biến là rất lớn để có thể triển khai rộng khắp mạng IoT.

Bên cạnh đó, việc xây dựng các nút mạng kết nối vạn vật IoT kiểu mới với cảm biến thu thập dữ liệu, bộ xử lý và thu phát tín hiệu để hiển thị dữ liệu trên máy tính hay điện thoại thông minh đã được giới thiệu trong thời gian qua [1,2]. Khi đó, cảm biến được dán trên da người để đo nhịp tim, tín hiệu điện não, bám đối tượng, phát hiện xung đột qua da điện tử v.v.. Các cảm biến có khả năng thực hiện được các chức năng đó là cảm biến áp lực hữu cơ với ưu điểm riêng biệt là có tính mềm dẻo về cơ để có thể dán lên mọi

dạng bề mặt. Tuy nhiên, hầu hết các cảm biến được nghiên cứu tới nay vẫn yêu cầu kỹ thuật chế tạo phức tạp, điện áp điều khiển cao, dải đo hẹp [3–6]. Chính vì vậy, việc nghiên cứu chế tạo cảm biến áp lực hữu cơ với đặc tính mềm dẻo, điện áp làm việc thấp, công suất tiêu thụ nhỏ, dải đo rộng nhưng với công nghệ chế tạo đơn giản là rất cần thiết trong điều kiện tại Việt Nam.

2. Mục tiêu và nhiệm vụ của luận án

Mục tiêu của luận án là nghiên cứu chế tạo cảm biến áp lực hữu cơ có đặc tính tốt, công suất thấp với công nghệ chế tạo đơn giản và có diện tích rộng để triển khai được nhiều ứng dụng.

Nhiệm vụ của luận án để đạt được mục tiêu nêu trên là:

- Đề xuất thiết kế cảm biến áp lực mềm dẻo, đặc tính tốt sử dụng vật liệu hữu cơ được chế tạo bằng công nghệ phù hợp với trang thiết bị có sẵn trong nước;
- Nâng cao hiệu năng của cảm biến bằng cách kết hợp với OTFT thường đóng;
- Triển khai một số nút IoT cơ bản để thu thập dữ liệu từ cảm biến áp lực hữu cơ.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu: Cảm biến áp lực hữu cơ, nút IoT và OTFT.
- Phạm vi nghiên cứu: Các phương pháp chế tạo, đặc tính cảm biến, OTFT và thử nghiệm ứng dụng.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án kết hợp nhiều phương pháp để thực hiện được mục tiêu nghiên cứu, bao gồm:

- Khảo sát và phân tích các nghiên cứu đã có về cấu trúc cảm biến áp lực hữu cơ để lựa chọn cấu trúc và vật liệu phù hợp nhất;
- Thực nghiệm chế tạo ở nhiều điều kiện khác nhau để xác định điều kiện tối ưu nhất cho quy trình thực hiện;
- Sử dụng hệ thống đo lường hiện đại để đo kiểm thông số và xác định đặc tuyến của cảm biến, OTFT nhằm đảm bảo độ tin cậy;
- Xây dựng và thử nghiệm nút IoT thông qua thiết kế chế tạo phần cứng và phần mềm.

5. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước

Phương pháp thường thấy trong chế tạo cảm biến hữu cơ dựa trên điều chế hóa học, trong đó vật liệu hữu cơ hầu hết được xử lý từ pha lỏng, thông qua các phản ứng hóa học phức tạp, mất nhiều thời gian và có thể ảnh hưởng tới môi trường [3,4]. Thêm nữa, các bước xử lý nhiệt, lazer kỹ thuật cao [5,6] thường xuyên được sử dụng để xử lý bề mặt của vật liệu hữu cơ trong chế tạo cảm biến. Các phương pháp chế tạo này thường rất khó khăn để thực hiện đối với điều kiện kỹ thuật hiện nay tại các phòng thí nghiệm trong nước.

Thêm vào đó, để cải thiện độ nhạy cũng như thời gian đáp ứng của cảm biến, vật liệu hữu cơ thường được xử lý ở cấu trúc bề mặt ở cấp độ micromet/nanomet [6,7] hoặc kỹ thuật gia công bề mặt yêu cầu kỹ thuật và độ chính xác cao. Đối với vật liệu dạng sợi nano cũng yêu cầu phương pháp kỹ thuật phức tạp để gia công chế tạo như phương pháp "quay điện hóa" (electrospinning) [8,9]. Các phương pháp gia công này cũng khó có thể được tiến hành với điều kiện trang thiết bị, kỹ thuật trong nước.

Bên cạnh đó, các ứng dụng cho IoT thường có tính di động cao và sử dụng

nguồn nuôi là pin; do đó, công suất tiêu thụ nhỏ là yêu cầu sống còn để góp phần kéo dài thời gian làm việc của thiết bị. Các thiết bị đo tín hiệu điện tim, điện não, bám đối tượng chuyển động, phát hiện xung đột qua da điện tử, đo trọng lượng [10, 11], theo dõi tình trạng công trình xây dựng [12–15], trên cơ sở cảm biến áp lực hữu cơ thụ động/tích cực và dữ liệu hiển thị trên máy tính đã được giới thiệu trong thời gian qua bởi các nhóm nghiên cứu từ các nước phát triển như Nhật Bản, Vương quốc Anh, Đức, Hoa Kỳ, v.v..

Ở phạm vi nghiên cứu trong nước, cảm biến trên cơ sở transistor đang được các nhà khoa học trong nước nghiên cứu như nhóm nghiên cứu tại Trường đại học Bách Khoa Hà Nội [16]. Hệ vật liệu hữu cơ cũng được nghiên cứu bởi các nhóm nghiên cứu tại trường Đại học Quốc gia Hà Nội [17] và Viện hàn lâm Khoa học Việt Nam [18]. Tuy nhiên, cho đến nay nghiên cứu phát triển cảm biến áp lực hữu cơ theo hướng có phương pháp chế tạo đơn giản, công suất thấp, định hướng ứng dụng cho nút IoT vẫn chưa được thực hiện.

Các công bố khoa học trong lĩnh vực cảm biến áp lực hữu cơ cho thấy việc nghiên cứu phát triển cảm biến áp lực hữu cơ đòi hỏi phương pháp kỹ thuật cao và phức tạp. Điều này có nghĩa là rất khó có thể áp dụng theo những kết quả đã có, đặc biệt là đối với tình trạng các trang thiết bị kỹ thuật trong nước. Trong khi đó, trước nhu cầu bùng nổ về cảm biến đối với các thiết bị IoT rõ ràng phương pháp chế tạo đơn giản dẫn tới chi phí sản xuất thấp là tiêu chí quan trọng hàng đầu để sản xuất và sử dụng cảm biến với quy mô lớn. Vì vậy, hướng nghiên cứu về cảm biến hữu cơ là hướng nghiên cứu còn nhiều thách thức nhưng rất cần thiết và có nhiều tiềm năng để phát triển ứng dụng.

6. Đóng góp của luận án

Kết quả nghiên cứu và đóng góp của luận án được thể hiện ở các điểm sau:

1. Phát triển thành công cảm biến áp lực hữu cơ màng mỏng polyurethane (PU) mềm dẻo, độ nhạy tốt, diện tích lớn bằng phương pháp chế tạo đơn giản với các trang thiết bị sẵn có trong nước. Triển khai thử nghiệm thành công một số ứng dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong nút IoT.
2. Đề xuất cấu trúc kết hợp cảm biến áp lực hữu cơ màng mỏng PU với OTFT thường đóng để cải thiện độ nhạy và độ trễ nhưng công suất tiêu thụ thấp.

7. Bố cục của luận án

Nội dung chính của luận án được thể hiện trong 4 chương như sau:

Chương 1 giới thiệu về nút IoT cơ bản và một số ứng dụng của nút IoT. Nội dung chương này trình bày các khái niệm và các tham số cơ bản của cảm biến áp lực hữu cơ. Khảo sát các hướng nghiên cứu trong và ngoài nước về cảm biến. Thông qua việc đánh giá các kết quả đã đạt được của các hướng nghiên cứu trong và ngoài nước, luận án đề xuất chỉ tiêu kỹ thuật của cảm biến áp lực mà luận án cần thực hiện được ở phần tiếp theo.

Chương 2 trình bày các nội dung nghiên cứu về vật liệu hữu cơ và cấu trúc cho cảm biến áp lực để xác định kiểu cấu trúc và loại vật liệu phù hợp nhất cho điều kiện chế tạo đơn giản. Kết quả nghiên cứu cho thấy có thể chế tạo cảm biến áp lực hữu cơ kiểu điện dung sử dụng màng mỏng PU. Sau khi được chế tạo, các cảm biến được khảo sát tham số bằng các hệ đo hiện đại để xác định thông số cấu tạo tối ưu. Kết quả đo chỉ ra rằng, cảm biến đề

xuất hoàn toàn có thể ứng dụng được cho nhiều nút IoT vì có độ nhạy khá tốt là $1,18 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ khi chịu áp lực từ $(0,2 \div 0,65) \text{ MPa}$ với kích thước $(7 \times 7) \text{ cm}^2$.

Chương 3 trình bày đề xuất giải pháp kết hợp cảm biến áp lực hữu cơ với OTFT thường đóng để tạo ra cảm biến tích cực. Kết quả đo kiểm cho thấy cảm biến mới đã cải thiện độ nhạy từ $1,18 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$ lên $6,5 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$, giảm độ trễ từ $7,7\%$ xuống còn $1,8\%$ trong cùng điều kiện với cảm biến cũ và tiêu thụ công suất khá thấp $11,2 \mu\text{W}$.

Chương 4 căn cứ vào chỉ tiêu kỹ thuật của cảm biến đã chế tạo thành công để đề xuất ứng dụng vào một số nút IoT. Đó là ứng dụng trong hệ thống theo dõi, phát hiện chuyển động của xe ô tô, theo dõi chuyển động bước chân và trong hệ thống tự động theo dõi tình trạng các công trình xây dựng. Kết quả vận hành và đo kiểm cho thấy các nút IoT đều hoạt động tốt, gửi dữ liệu, hiển thị lên màn hình điện thoại và lưu trên hệ thống điện toán đám mây.

Cuối cùng là phần kết luận chung tóm tắt lại những kết quả, đóng góp của luận án cũng như hướng phát triển trong tương lai.

Chương 1

TỔNG QUAN CHUNG VỀ CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ ỨNG DỤNG TRONG IoT

Nội dung chương này giới thiệu chung về hệ thống IoT và một số ứng dụng dự kiến cần có nút IoT kiểu mới với yêu cầu đặc biệt về việc thu thập dữ liệu trên bề mặt đa dạng, thu phát dữ liệu và hiển thị hay lưu trữ trên máy chủ. Đó là các ứng dụng trong hệ thống theo dõi, phát hiện chuyển động của xe ô tô, trong hệ thống theo dõi chuyển động bước chân và trong hệ thống tự động theo dõi tình trạng các công trình xây dựng. Bên cạnh đó, chương 1 tìm hiểu về các loại cảm biến và cách xác định tham số cơ bản của cảm biến để lựa chọn loại cảm biến phù hợp cho ứng dụng dự kiến. Phần cuối là khảo sát các nghiên cứu gần đây về cảm biến áp lực hữu cơ nhằm tìm ra giải pháp chế tạo cảm biến theo quy trình đơn giản và có thể thực hiện được với điều kiện trang thiết bị trong nước.

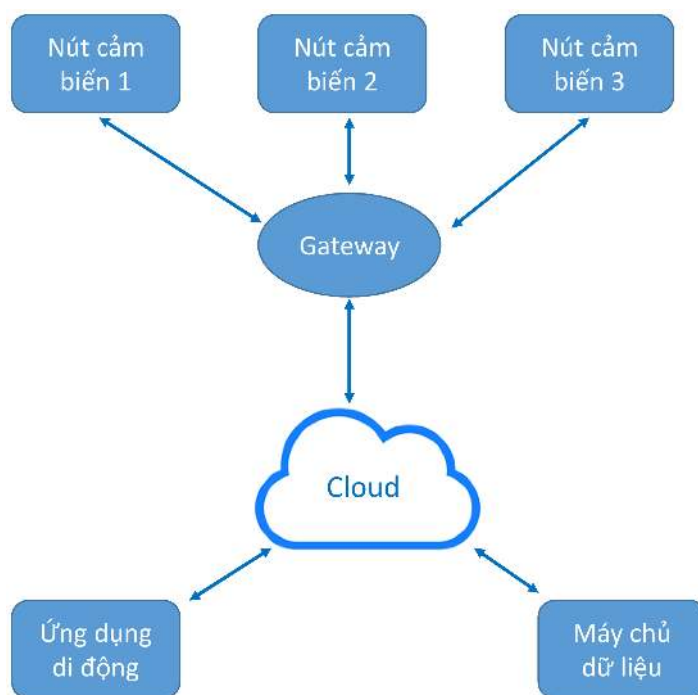
1.1. Giới thiệu nút IoT và ứng dụng

1.1.1. Khái niệm về IoT và nút IoT

Thuật ngữ **IoT** (*Internet of Things*) nghĩa là **Internet của vạn vật** được đề xuất lần đầu tiên bởi Kevin Ashton năm 1999 với ý tưởng sử dụng máy tính và mạng cục bộ để quản lý các thiết bị nhận dạng vô tuyến (*RFID - Radio frequency Identification*) [19]. Tuy nhiên trong các thập niên tiếp theo, khái niệm IoT đượ mở rộng ra bao gồm các lĩnh vực như giao thông, y tế,

quân sự, cho tới các ứng dụng khác của cuộc sống. Khái niệm “vạn vật” thay đổi cùng với sự phát triển khoa học kỹ thuật với mục đích tạo ra một mạng thông tin sử dụng các cảm biến kết nối với máy tính hoạt động không cần sự can thiệp của con người. Theo ước tính của các nhà khoa học [20], tới năm 2020 sẽ có khoảng 50 tỷ đồ vật kết nối vào internet và tăng mạnh trong những năm tiếp theo.

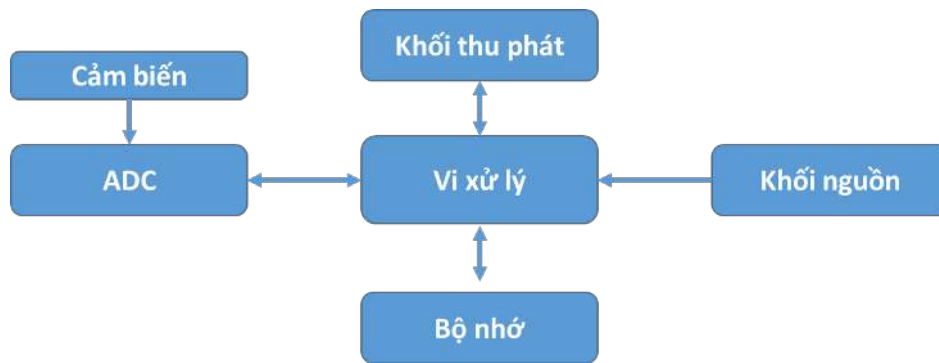
Hình 1.1 mô tả sơ đồ khối của một hệ thống IoT điển hình với các nút IoT, hệ thống máy chủ, điện toán đám mây và gateway.



Hình 1.1: Mô hình hệ thống IoT.

Trên sơ đồ Hình 1.1, nút IoT chiếm số lượng lớn và đóng vai trò quan trọng, vì nút IoT có chức năng thu thập dữ liệu từ cảm biến, gửi dữ liệu từ cảm biến qua gateway lên mạng internet. Dữ liệu từ cảm biến có thể được lưu trên máy chủ hoặc gửi tới người sử dụng thông qua các ứng dụng di động.

Hình 1.2 thể hiện cấu trúc cơ bản của nút IoT với bốn thành phần chính



Hình 1.2: Mô tả cấu trúc của một nút cảm biến IoT.

là cảm biến, khối vi xử lý, khối thu phát và khối nguồn. Các cảm biến đóng vai trò quan trọng trong nút IoT vì nó trực tiếp thu thập tín hiệu từ các đối tượng cần theo dõi. Bộ vi xử lý thường được kết hợp với bộ lưu trữ với dung lượng hạn chế và bộ biến đổi tương tự/số (ADC). Tín hiệu thu thập được từ cảm biến được số hóa tại ADC và được đưa tới bộ vi xử lý. Khối thu phát vô tuyến kết nối các nút vào mạng, gửi và nhận các dữ liệu thu được từ nút hoặc bao gồm cả các nút lân cận tới các nút khác hoặc tới máy chủ thông qua gateway.

1.1.2. Ứng dụng của nút IoT

Ngày nay cùng với sự phát triển mạnh mẽ của cách mạng công nghiệp 4.0 và Internet, nút IoT được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như giao thông, chăm sóc sức khỏe và các ứng dụng khác của cuộc sống.

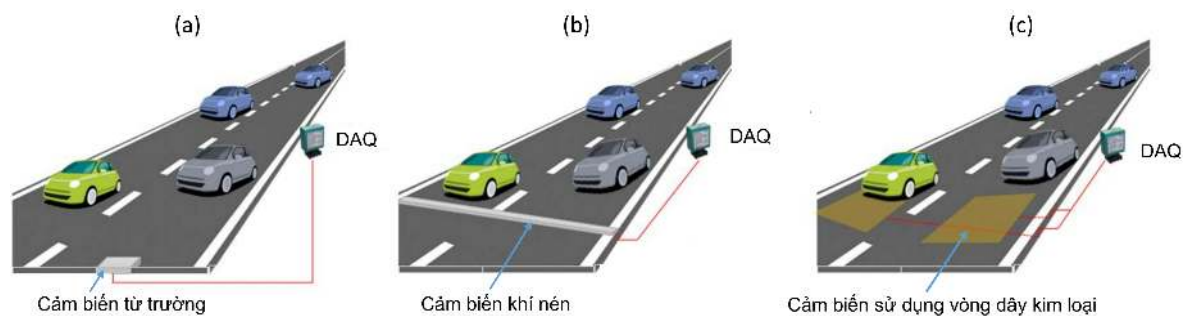
Ứng dụng của nút IoT trong giao thông

Hệ thống giao thông là nền tảng cơ bản của mỗi quốc gia đối với sự phát triển. Song với tốc độ tăng dân số cũng như mật độ dân số tập trung ở các đô thị, nhiều thành phố lớn trên thế giới đang đối mặt với sự gia tăng mật độ các phương tiện giao thông [21]. Điều đó có thể dẫn tới các vấn đề như ùn

tắc, ô nhiễm môi trường, gia tăng chi phí cho hàng hóa. Nghiêm trọng hơn, nó còn dẫn tới nguy cơ cao về tai nạn giao thông, các vấn đề khủng hoảng liên quan khác làm giảm chất lượng cuộc sống.

Hơn nữa, sự phát triển của công nghệ thông tin và truyền thông đã mở ra sự phát triển của hệ thống giao thông thông minh [22–24]. Hệ thống giao thông thông minh dựa trên nền tảng các nút IoT để thu thập và xử lý một lượng lớn các thông tin về tình trạng giao thông và môi trường. Trong đó, các cảm biến nhằm phát hiện chuyển động của xe ô tô đóng vai trò quan trọng vì nó có thể thu thập các thông tin như tốc độ, tải trọng cũng như lưu lượng xe ô tô. Các thông tin này được gửi tới hệ thống quản lý giao thông để phân tích, xử lý và đưa ra những quyết định nhằm bảo đảm giao thông thông suốt, tránh tình trạng tắc nghẽn.

Các cảm biến sử dụng trong nút IoT nhằm phát hiện chuyển động của xe ô tô được chia thành hai loại theo vị trí lắp đặt bao gồm các cảm biến "xâm lấn" (*intrusive sensors*) và cảm biến "không xâm lấn" (*non-intrusive sensors*). Các cảm biến xâm lấn là các loại cảm biến được lắp đặt, triển khai trên bề mặt đường như được minh họa trên Hình 1.3.

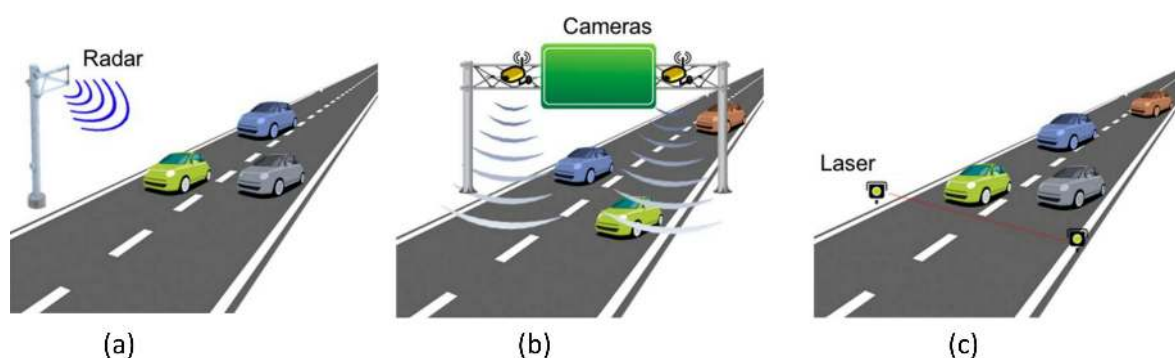


Hình 1.3: Các cảm biến xâm lấn: (a) cảm biến từ trường, (b) cảm biến khí và (c) cảm biến sử dụng các vòng dây kim loại [21].

Cảm biến xâm lấn bao gồm ba loại chính: (a) các cảm biến từ trường được

lắp đặt trên mặt đường và kết nối với bộ thu thập dữ liệu (DAQ); (b) các cảm biến dạng khí nén nhằm phát hiện chuyển động của xe ô tô; (c) cảm biến trên cơ sở sử dụng các vòng dây kim loại.

Trong thời gian gần đây, cảm biến sử dụng các vòng dây được sử dụng phổ biến vì có giá thành rẻ và độ tin cậy cao. Dựa trên nguyên lý làm việc đơn giản, khi có xe cộ chuyển động qua sẽ làm thay đổi dòng điện cảm ứng trong các vòng dây. Tuy nhiên, nhược điểm của cảm biến xâm lấn như tên gọi của nó sẽ xâm lấn tới công trình giao thông khi triển khai lắp đặt. Hơn nữa, việc bảo trì, sửa chữa hệ thống cũng rất phức tạp, khó khăn và tốn kém.



Hình 1.4: Các cảm biến không xâm lấn: (a) cảm biến radar; (b) hệ thống camera và (c) cảm biến laser [21].

Cảm biến không xâm lấn được lắp đặt ở các vị trí khác trong hệ thống giao thông, thông thường bao gồm các cảm biến laser, hệ thống camera hay cảm biến dựa trên nguyên lý radar như được thể hiện trên Hình 1.4. Các cảm biến không xâm lấn có thể thu thập tốt các thông tin giao thông như tốc độ, mật độ cũng như tình trạng giao thông. Tuy nhiên, chúng có giá thành cao và sẽ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường như mưa, tuyết, sương mù v.v..

Trong khi đó, cảm biến áp lực hữu cơ với những ưu điểm riêng biệt có tiềm năng ứng dụng trong việc theo dõi, phân loại xe ô tô trong hệ thống giao

thông minh. Cảm biến hữu cơ có tính mềm dẻo cao dễ dàng được triển khai trên bề mặt đường mà không phải can thiệp tới hệ thống công trình giao thông như các hệ thống cảm biến xâm lấn. Hơn nữa, cảm biến hữu cơ không bị ảnh hưởng bởi các nguồn nhiễu điện trường, từ trường như các cảm biến không xâm lấn.

Ứng dụng của nút IoT trong theo dõi chuyển động bước chân

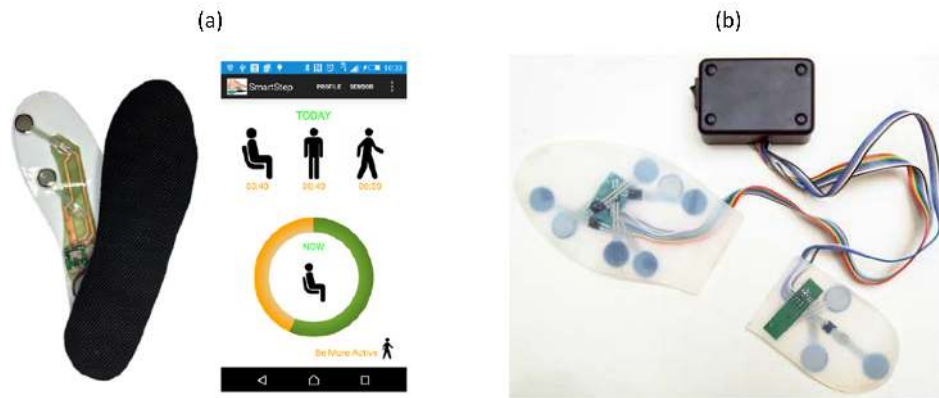
Áp lực hay sự phân bố áp lực của bàn chân phản ánh tình trạng sức khỏe, dáng đi của con người. Trong thời gian gần đây, cảm biến áp lực được sử dụng rộng rãi trong việc theo dõi chuyển động bước chân người. Theo đó, hướng nghiên cứu sử dụng nút cảm biến áp lực được tích hợp vào đế giày hiển thị thông tin trên điện thoại thông minh, máy tính bảng đang được các nhóm nghiên cứu phát triển rộng rãi [25, 26].



Hình 1.5: Nút IoT thu thập áp lực bàn chân phục vụ quá trình phân tích và điều trị bệnh nhân [26].

Bằng cách theo dõi sự phân bố áp lực của bàn chân sử dụng các cảm biến tích hợp trên đế giày, các bác sỹ có thể cải thiện dáng đi, hoặc theo dõi sự hồi phục của các bệnh nhân của W. Wafai, N. Hegde và L. Yang [26–28].

Trong lĩnh vực thể thao, thành tích của các vận động viên có thể được cải



Hình 1.6: (a) Nút IoT thu thập áp lực bàn chân giám sát chuyển động hàng ngày [27] và (b) theo dõi sự hồi phục của bệnh nhân [28].

thiện nhờ việc phân tích sự phân bố của áp lực bàn chân trong quá trình luyện tập [29]. Tuy nhiên, các cảm biến sử dụng trong nút IoT nhằm thu thập áp lực bàn chân hầu hết đều có phương pháp chế tạo phức tạp dẫn tới giá thành cao [30].

Ứng dụng của nút IoT trong theo dõi công trình xây dựng

Công trình xây dựng bao gồm nhà ở, nhà làm việc, các công trình giao thông như cầu đường bộ, hầm đường bộ là cơ sở kinh tế, kỹ thuật có tầm quan trọng đối với sự nghiệp phát triển kinh tế, bảo đảm đời sống nhân dân, hoạt động của xã hội và duy trì quốc phòng, an ninh quốc gia. Các công trình xây dựng từ khi triển khai xây dựng cho tới khi được đưa vào khai thác sử dụng luôn luôn chịu tác động của tải trọng, môi trường, v.v.. dẫn tới xuất hiện biến dạng, hoặc các khuyết tật bên trong kết cấu của công trình như dầm, xà, v.v..

Sự biến dạng hoặc các khuyết tật bên trong kết cấu của công trình ảnh hưởng rất lớn tới khả năng làm việc cũng như độ an toàn khi vận hành của kết cấu chịu lực. Vì vậy, việc kiểm tra giám sát tình trạng các công trình là một yêu cầu thiết yếu nhằm xác định tình trạng, độ an toàn của kết cấu và

công trình. Qua đó giúp cho công tác bảo trì, bảo dưỡng, đăng kiểm được thực hiện kịp thời, thường xuyên và hiệu quả.

Các phương pháp kiểm tra không phá hủy truyền thống như sử dụng sóng siêu âm, tia X quang, v.v.. để phát hiện khuyết tật thường chỉ áp dụng đối với việc kiểm tra định kỳ; khó tiến hành kiểm tra tự động và giám sát liên tục.

Hệ thống giám sát công trình xây dựng sử dụng nút IoT với các cảm biến được tích hợp vào công trình xây dựng để thu thập các thông tin, như sự rung lắc, tình trạng bị uốn cong của công trình để đưa ra cảnh báo. Hệ thống giám sát công trình xây dựng gồm ba thành phần chính [31]:

- Hệ thống cảm biến được gắn tích hợp vào công trình dân dụng tại các vị trí cần giám sát.
- Hệ thống mạch thu thập dữ liệu cảm biến.
- Thuật toán xử lý dữ liệu cảm biến và đưa ra cảnh báo.

1.1.3. Yêu cầu đối với cảm biến áp lực ứng dụng cho IoT

Như đã đề cập ở trên, nhu cầu về cảm biến nói chung và cảm biến áp lực nói riêng là rất lớn. Hơn nữa, sự phát triển bùng nổ của IoT cũng đặt ra những yêu cầu đối với cảm biến áp lực hữu cơ cho các nút IoT kiểu mới. Đó là tính mềm dẻo để dễ dàng tích hợp lên bề mặt của vạn vật.

Trong khi đó, các cảm biến áp lực vô cơ đang sử dụng phổ biến hiện nay thường rất cứng và khó có thể dán lên nhiều loại bề mặt. Điều này có nghĩa là cảm biến hữu cơ sẽ phù hợp với loại ứng dụng này và cần được phát triển. Để áp dụng cảm biến áp lực hữu cơ một cách phổ biến và mang lại lợi ích về mặt quy mô thì phương pháp chế tạo đơn giản giúp giảm giá thành sản phẩm là yêu cầu tiên quyết đối với cảm biến.

Bên cạnh đó, vì các ứng dụng cho IoT thường có tính chất di động cao nên nguồn cung cấp cho cảm biến thường sử dụng pin, điện áp làm việc của cảm biến thường ở mức điện áp nhỏ hơn 5 V. Do đó, điện áp làm việc thấp và năng lượng tiêu thụ nhỏ là yêu cầu sống còn đối với thiết bị.

Ngoài ra, để có thể phù hợp với tính đa dạng trong ứng dụng (ví dụ như phát hiện chuyển động của xe ô tô, theo dõi sự uốn cong của dầm bê tông, theo dõi bước chân) thì cảm biến cần có độ nhạy cao, diện tích lớn và dải áp lực làm việc rộng.

1.2. Giới thiệu cảm biến áp lực hữu cơ

1.2.1. Khái niệm cảm biến áp lực và các tham số cơ bản

Áp lực là đại lượng được tính bằng tỷ số giữa lực và diện tích tác dụng. Áp lực xuất hiện hầu như ở mỗi hoạt động cơ bản nhất của tự nhiên cũng như xã hội loài người. Ví dụ, các hoạt động sinh học như áp lực động mạch, nhãn áp, áp lực của bước chân trên sàn, áp lực của phương tiện giao thông trên nền đường v.v..

Cảm biến áp lực đóng vai trò như là một thiết bị chuyển đổi lực tác động đầu vào thành tín hiệu điện đầu ra. Cảm biến áp lực hữu cơ là cảm biến áp lực được tạo ra từ vật liệu hữu cơ. So với vật liệu vô cơ truyền thống, cảm biến áp lực hữu cơ có những ưu điểm vượt trội ở tính mềm dẻo, có diện tích lớn hơn, chế tạo ở nhiệt độ thấp hơn và thân thiện với môi trường.

Để đánh giá chất lượng cảm biến, người ta thường quan tâm tới các tham số độ nhạy, dải áp lực làm việc, độ trễ, thời gian đáp ứng và độ ổn định.

Độ nhạy và dải áp lực làm việc

Độ nhạy (S) là một trong những tham số quan trọng nhất của cảm biến

thể hiện khả năng chuyển đổi áp lực thành tín hiệu điện. Theo định nghĩa, độ nhạy có thể được biểu diễn theo công thức:

$$S = \frac{\Delta X}{\Delta P} X_0 \quad (1.1)$$

Trong đó ΔX là độ biến đổi của tín hiệu điện (dòng điện, điện áp, điện dung), ΔP là độ biến đổi của áp lực đầu vào, X_0 là giá trị tín hiệu điện ban đầu khi không có áp lực tác động.

Khi mối quan hệ giữa áp lực đầu vào và tín hiệu điện đầu ra được biểu diễn trên đồ thị thì độ nhạy S chính là độ dốc của đường đặc tuyến. Biểu thức 1.1 cho thấy cảm biến có giá trị S càng lớn càng tốt, vì khi đó chỉ một sự thay đổi nhỏ của đầu vào sẽ có một sự thay đổi lớn ở đầu ra. Tuy nhiên, với đoạn đặc tuyến có độ dốc nhỏ thì vẫn có thể ứng dụng trong việc phát hiện có áp lực.

Dải áp lực làm việc là dải áp lực P từ giá trị nhỏ nhất tới giá trị lớn nhất để tạo ra sự thay đổi đầu ra cảm biến ΔX .

Bên cạnh đó, ngưỡng phát hiện (*LOD: Limit of Detection*) hay còn gọi là độ nhạy phát hiện của cảm biến cũng là một tham số quan trọng của cảm biến. LOD là giá trị áp lực nhỏ nhất tại đầu vào để có thể tạo ra sự thay đổi có thể phân biệt được ở tín hiệu đầu ra cảm biến.

Độ trễ và thời gian đáp ứng

Độ trễ của cảm biến được tính bằng độ sai khác lớn nhất của tín hiệu đầu ra cảm biến trong một chu kỳ nén/nhả (*loading/unloading*) tại một giá trị áp lực [32]. Độ trễ gây ra bởi đặc tính "nhớt đàn hồi" (*viscoelasticity*) của lớp vật liệu tích cực.

Thời gian đáp ứng là một tham số quan trọng của cảm biến, đặc biệt là

đối với các cảm biến làm việc trong các thiết bị thời gian thực. Thời gian đáp ứng là khoảng thời gian cần thiết để cảm biến đạt tới 90% của tín hiệu đầu ra ổn định.

Độ ổn định và độ bền

Độ ổn định và độ bền của cảm biến là khả năng duy trì sự ổn định và tin cậy giữa tín hiệu đầu vào/tín hiệu đầu ra đối với các tác động đầu vào có chu kỳ trong thời gian dài. Do đó, cảm biến thường được kiểm tra độ ổn định và tin cậy đối với các áp lực đầu vào có tính chu kỳ trong thời gian dài. Tuy nhiên, số lượng chu kỳ kiểm tra tác động đầu vào là không có tiêu chuẩn. Đối với các sản phẩm nghiên cứu số chu kỳ thử nghiệm thường vào khoảng 500 chu kỳ tới 5000 chu kỳ.

Điện áp làm việc và công suất tiêu thụ

Điện áp làm việc là tham số rất quan trọng và liên quan đến công suất tiêu thụ của cảm biến. Giảm điện áp làm việc và giảm công suất tiêu thụ của cảm biến luôn là một hướng nghiên cứu quan trọng trong cảm biến áp lực cũng như trong các thiết bị điện tử gắn trên cơ thể.

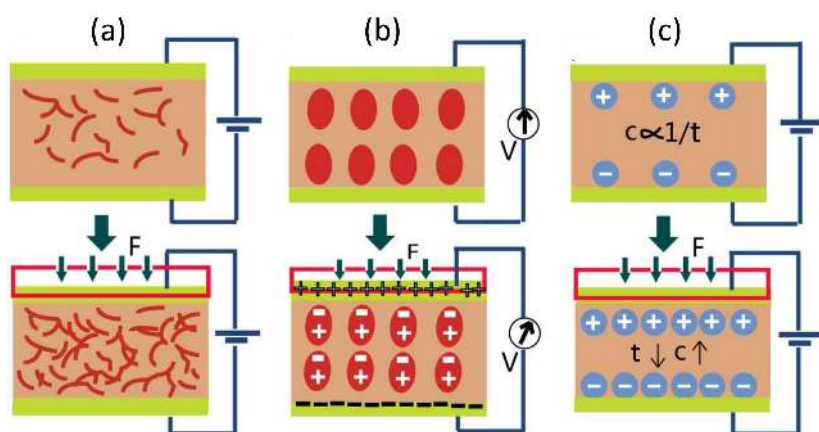
Trong Chương 2 và 3 của luận án này, các cảm biến sau khi chế tạo luôn được đo kiểm bằng các hệ đo lường hiện đại để xác định các tham số cơ bản vừa trình bày ở trên nhằm khẳng định chất lượng của cảm biến đề xuất.

1.2.2. Cấu tạo và phân loại cảm biến

**** Cấu tạo***

Cảm biến áp lực hữu cơ thường bao gồm có lớp vật liệu tích cực được ghép xen giữa hai tấm điện cực như thể hiện trên Hình 1.7 [2].

Như đã trình bày ở các phần trước, cảm biến áp lực là thiết bị chuyển đổi



Hình 1.7: Sơ đồ minh họa nguyên lý làm việc của cảm biến với các hiệu ứng (a) áp trở; (b) áp điện và (c) áp dung [2].

áp lực đầu vào thành tín hiệu điện đầu ra. Vì vậy, phương pháp phân loại phổ biến nhất của cảm biến áp lực hữu cơ dựa trên nguyên lý hay hiện tượng vật lý của quá trình biến đổi tín hiệu.

*** Phân loại theo cấu tạo**

Cảm biến áp lực hữu cơ thường được chia thành cảm biến áp lực điện trở, cảm biến áp lực điện tích, cảm biến áp lực điện dung tương ứng với các hiệu ứng áp trở, áp điện, áp dung, cụ thể như sau:

Cảm biến áp lực điện trở

Cấu trúc thường được sử dụng đối với cảm biến áp lực điện trở là gồm hai điện cực được bố trí song song, xen kẽ nhau trên tấm nền, lớp vật liệu tích cực được tạo ra bên trên hai điện cực. Khi có lực tác dụng, điện trở của lớp tích cực thay đổi do sự biến dạng của lớp vật liệu tích cực dẫn tới sự thay đổi đầu ra của tín hiệu cảm biến.

Cảm biến áp lực hữu cơ dựa trên hiệu ứng áp trở có ưu điểm là dễ dàng thiết kế mạch đọc cảm biến và có thể chế tạo dưới dạng ma trận với mật độ cao.

Cảm biến áp lực điện tích

Là cảm biến áp lực hữu cơ dựa trên hiệu ứng áp điện để thay đổi tín hiệu đầu ra cảm biến. Hiệu ứng áp điện là hiện tượng các điện tích được tạo ra ở một số các vật liệu (ví dụ như tinh thể thạch anh và một số loại gốm) khi có lực tác động. Sự tồn tại của các moment lưỡng cực điện trong tinh thể là nguyên nhân tạo ra hiện tượng áp điện như được minh họa trên Hình 1.7(b).

Cảm biến áp lực điện dung

Cảm biến áp lực điện dung chuyển đổi lực tác động đầu vào thành sự thay đổi điện dung đầu ra. Cảm biến áp lực điện dung có cấu trúc như một tụ điện với hai điện cực song song được xen giữa là vật liệu hữu cơ nhạy áp. Khi đó điện dung được xác định theo công thức điện dung của tụ điện:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (1.2)$$

Với ε là hằng số điện môi của lớp vật liệu tích cực đóng vai trò làm chất điện môi, ε_0 là hệ số điện môi của chân không ($\varepsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} F/m$), A là diện tích phần chồng lấn của hai bản tụ và d là độ dày của lớp điện môi.

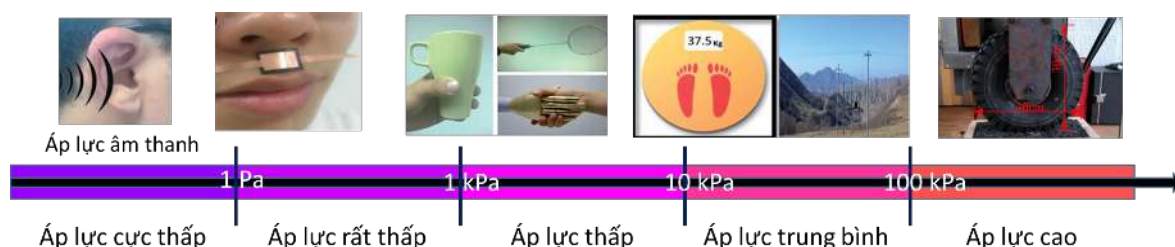
Khi có lực tác động, sự thay đổi điện dung của tụ điện chủ yếu do sự thay đổi độ dày d của lớp điện môi. Do có thể coi ε không đổi với vật liệu cách điện có độ bền điện tốt [10] và A thay đổi là không đáng kể.

Xét về mặt vật liệu, vật liệu hữu cơ có đặc tính áp dụng phong phú hơn nhiều như PDMS (*Polydimethyl Siloxane*), PET (*Polyethylene Terephthalate*), PI (*Polyimide*), PEN (*Polyethylene*) và PU (*Polyurethane*). Do đó, nghiên cứu tiếp theo của luận án sẽ chỉ tập trung vào loại cảm biến áp lực điện dung.

* *Phân loại theo dải áp lực làm việc*

Để tiện cho việc thiết kế cảm biến áp lực nói chung và áp lực hữu cơ nói riêng, cảm biến có thể được phân chia theo dải áp lực làm việc, bao gồm: áp lực cực thấp, áp lực rất thấp, áp lực thấp, áp lực trung bình và áp lực cao [10].

Áp lực cực thấp là các áp lực có giá trị dưới 1 Pa. Các áp lực trong dải này thường là áp lực sóng âm thanh, để phát hiện được các áp lực trong dải này cần các cảm biến có độ nhạy cao.



Hình 1.8: Sự phân chia các dải áp lực và các ứng dụng tương ứng.

Áp lực rất thấp là các áp lực có giá trị trong khoảng (1 Pa - 1 kPa), thường được tạo ra bởi các tương tác yếu và các vật thể nhỏ. Các cảm biến có độ nhạy nằm trong dải này thường được ứng dụng cho da điện tử, màn hình cảm ứng.

Áp lực thấp là các áp lực có giá trị trong khoảng (1 kPa - 10 kPa). Hầu hết các hoạt động cầm nắm bằng tay và các áp lực sinh học bên trong cơ thể người nằm trong dải áp lực này.

Áp lực trung bình có giá trị trong khoảng (10 kPa - 100 kPa). Hầu hết các hoạt động cầm nắm bằng tay và các áp lực sinh học bên trong cơ thể người nằm trong dải áp lực này. Các cảm biến làm việc trong khoảng áp lực này đang nhận được sự quan tâm phát triển các ứng dụng như đo áp lực động

mạch, áp lực bàn chân hoặc các cân điện tử.

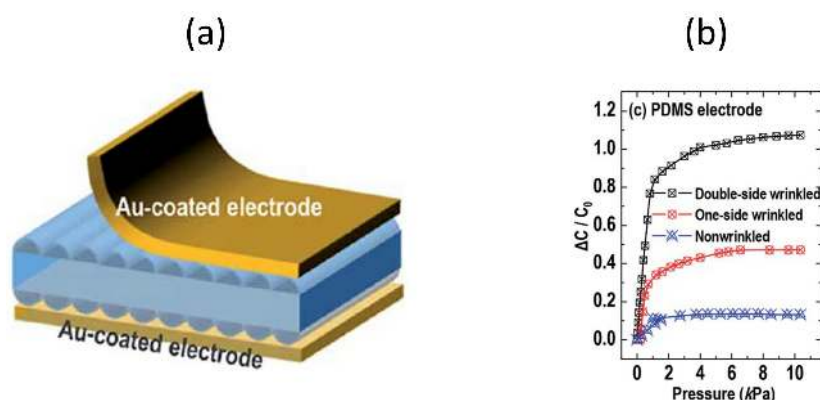
Áp lực cao có giá trị trong khoảng lớn hơn 100 kPa. Áp lực bánh xe của các phương tiện giao thông lên mặt đường thường nằm trong giá trị áp lực cao, ví dụ như: xe máy nằm trong khoảng 140 kPa tới 550 kPa; ô tô vào khoảng 600 kPa tới hơn 1 MPa tùy từng loại xe [33].

1.3. Khảo sát chung về các nghiên cứu cảm biến áp lực hữu cơ

Theo công thức (1.2), dưới tác động của ngoại lực độ dày d của lớp vật liệu tích cực giảm dẫn tới sự thay đổi điện dung của cảm biến. Do đó, cải thiện hệ số nén của vật liệu tích cực có thể mang lại sự cải thiện đáng kể về độ nhạy cảm biến. Theo hướng nghiên cứu này, hàng loạt các công bố sử dụng vật liệu PDMS có cấu trúc bề mặt dạng kim tự tháp ở kích thước micromet [34–36], hoặc PDMS kết hợp với khe hở không khí [37,38], hoặc dưới dạng xếp có các hạt không khí [39,40], hoặc có cấu trúc bề mặt nhám [41] để làm lớp điện môi cho cảm biến.

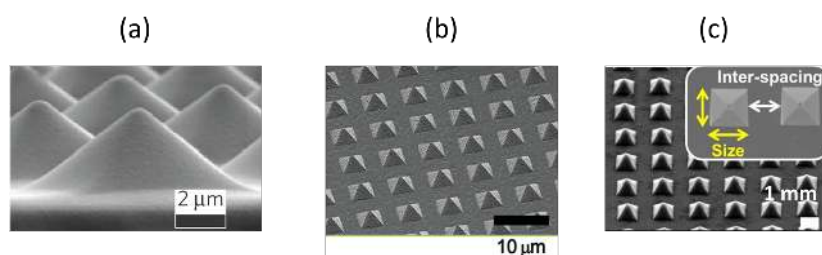
H. Kim và các cộng sự [42] đã phát hiện hiện gel Ecoflex có nguồn gốc từ PDMS khi bị kéo giãn 200% và chiếu tia UV sẽ tạo các đường gợn sóng (*wrinkl*) có kích thước micromet để chế tạo cảm biến, như được thể hiện trên Hình 1.9(a). Bằng cách sử dụng điện cực Au và phương pháp ép nhiệt, cảm biến được chế tạo tương đối đơn giản với độ nhạy $130 \times 10^{-4} \text{ kPa}^{-1}$, thời gian đáp ứng 578 ms. Kim cùng các cộng sự cũng công bố khảo sát so sánh khi sử dụng cấu trúc bề mặt gợn sóng mang lại sự cải thiện về độ nhạy cảm biến, như minh họa trên Hình 1.9(b).

Ở một hướng nghiên cứu khác, các công trình nghiên cứu cảm biến của S. Mannsfeld, C. Pang và S. Jang [34–36] sử dụng màng PDMS có cấu trúc



Hình 1.9: (a) Cấu trúc cảm biến [42] sử dụng PDMS với bề mặt gợn sóng cỡ micromet và (b) đặc tuyến cảm biến khi khảo sát các bề mặt khác nhau.

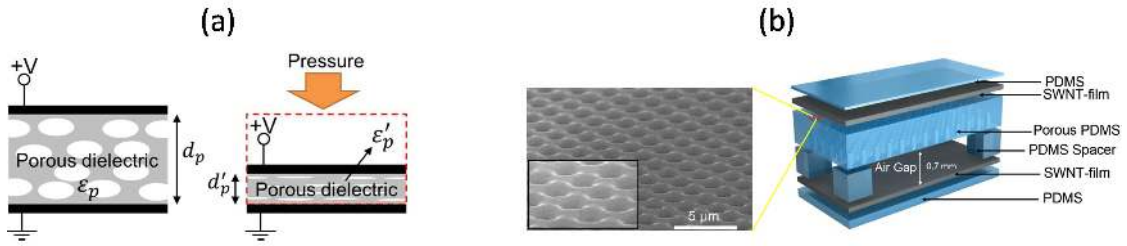
dạng kim tự tháp kích thước micromet sắp xếp đều nhau trên bề mặt (Hình 1.10) mang lại thời gian đáp ứng nhanh và độ nhạy cao hơn cho cảm biến vào khoảng $0,55 \text{ kPa}^{-1}$.



Hình 1.10: (a) Hình ảnh bề mặt lớp tích cực sử dụng PDMS với kết cấu kim tự tháp có kích thước micromet sắp xếp đều nhau trên bề mặt [34], (b) [35] và (c) [36].

Ngoài thay đổi độ dày d của lớp điện môi, một số hướng nghiên cứu còn kết hợp với thay đổi tham số ε bằng cách sử dụng vật liệu Ecoflex dạng xốp có các hạt không khí của D. Kwon [39] hoặc PDMS dạng xốp kết hợp với khe hở không khí của S. Park [38]. Dưới tác dụng của ngoại lực, ngoài khoảng cách d của vật liệu thay đổi thì các bọt khí bị ép ra ngoài hay khe hở không khí bị thu hẹp lại dẫn tới sự thay đổi hệ số điện môi ε của vật liệu, Hình 1.11. Sự kết hợp trên mang lại sự cải thiện đáng kể đối với độ nhạy phát hiện của

cảm biến ở mức 0,2 Pa.



Hình 1.11: Cấu trúc cảm biến sử dụng vật liệu (a) Ecoflex dạng xốp có các bọt khí [39] và (b) PDMS kết hợp khe hở không khí [38].

Cảm biến áp lực hữu cơ kiểu điện dung có cấu trúc đơn giản gồm lớp vật liệu nhạy áp đặt giữa hai tấm điện cực. Bên cạnh đó, phương pháp ép nhiệt được sử dụng nhiều trong các nghiên cứu [42–45] để gia công hoàn thiện cảm biến. Ép nhiệt là kỹ thuật đơn giản, chi phí thấp, phù hợp với điều kiện kỹ thuật trong nước.

Nhận xét:

Từ sự khảo sát các công trình nghiên cứu về cảm biến áp lực hữu cơ trong những năm gần đây (*Kết quả chi tiết được thể hiện trong Phụ lục của luận án*) nghiên cứu sinh có nhận xét như sau:

- Cảm biến áp lực hữu cơ hiện đang được nghiên cứu ứng dụng mạnh mẽ trong các lĩnh vực da điện tử [46–48], y tế [3, 32, 49–51] và tương tác người máy [37, 52, 53]. Đây đang là một trong các hướng nghiên cứu đang nhận được nhiều sự quan tâm hiện nay.

- Hầu hết các cảm biến có khoảng áp lực làm việc nhỏ (dưới 10 kPa và 20 kPa) [4, 9, 32, 54].

- Phần lớn các cảm biến có diện tích nhỏ cỡ mm^2 hoặc vài cm^2 .

- Về phương pháp chế tạo cảm biến còn phức tạp và khó có thể thực hiện với điều kiện về phương tiện và kỹ thuật của các phòng thí nghiệm trong

nước. Trong quá trình chế tạo vật liệu hữu cơ hầu hết được xử lý từ pha lỏng, các phản ứng hóa học, polyme hóa [3, 4, 32, 46], cacbon hóa, hydrat hóa phức tạp [4, 49], mất nhiều thời gian và có thể ảnh hưởng tới môi trường. Bên cạnh đó, trong chế tạo cảm biến thường xuyên sử dụng các bước xử lý nhiệt, lazer kỹ thuật cao [3, 6, 7] để xử lý bề mặt của vật liệu hữu cơ.

- Các hình thái cấu trúc bề mặt của vật liệu ở cấp độ micromet/nanomet, thường sử dụng các "khuôn" có cấu trúc bề mặt phức tạp và tốn kém [3, 6, 7] hoặc kỹ thuật gia công bề mặt yêu cầu kỹ thuật và độ chính xác cao (ví dụ như: photolithography). Đối với vật liệu dạng sợi nano cũng yêu cầu phương pháp kỹ thuật phức tạp để gia công chế tạo như phương pháp "quay điện hóa" (electrospinning) [4, 8, 9, 55, 56].

- Chưa có nhiều nghiên cứu thể hiện tính ứng dụng của cảm biến áp lực hữu cơ trong IoT.

1.4. Kết luận chương

Cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đã bước vào giai đoạn phát triển mạnh các hệ thống lõi IoT đòi hỏi những tính năng mới như hệ thống thu thập dữ liệu chi tiết, kết nối thông suốt và xử lý dữ liệu lớn. Trong đó, cảm biến được coi là khối đầu vào để chuyển đại lượng vật lý không điện thành đại lượng điện để có thể đưa vào mạch xử lý, nghĩa là làm nhiệm vụ thu thập dữ liệu bên ngoài. Vì vậy, cảm biến có vai trò cực kỳ quan trọng và quyết định độ chính xác của hệ thống.

Khảo sát một số ứng dụng của nút IoT và các nghiên cứu đã có về cảm biến áp lực như cảm biến áp lực điện trở, cảm biến áp lực điện tích và cảm biến áp lực điện dung cho thấy cảm biến áp lực điện dung hữu cơ hoàn toàn

có thể đáp ứng cho một số ứng dụng IoT. Cảm biến áp lực hữu cơ có tính mềm dẻo, diện tích lớn và dải áp lực làm việc rộng, do vậy phù hợp với các ứng dụng trong giao thông như theo dõi, phát hiện chuyển động của xe ô tô, hệ thống theo dõi chuyển động bước chân và hệ thống tự động theo dõi tình trạng các công trình xây dựng.

Từ các yêu cầu đối với cảm biến áp lực hữu cơ định hướng ứng dụng cho IoT và kết quả phân tích các công trình nghiên cứu về cảm biến áp lực hữu cơ trong những năm gần đây, luận án đề xuất nghiên cứu phát triển cảm biến áp lực hữu cơ mềm dẻo kiểu điện dung với phương pháp sản xuất đơn giản bằng ép nhiệt. Nhờ đó quá trình chế tạo có thể thực hiện với chi phí sản xuất thấp phù hợp với điều kiện kỹ thuật trong nước nhưng vẫn có thể đạt được tham số đủ tốt cho mục đích triển khai hệ thống ứng dụng trong thực tế.

Chương 2

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ SỬ DỤNG MÀNG MỎNG PU

Nội dung chính của chương 2 là khảo sát các nghiên cứu trước đây về cảm biến áp lực hữu cơ bao gồm cả về cấu trúc, loại vật liệu và công nghệ chế tạo. Mục đích là để đề xuất được loại cảm biến có tham số kỹ thuật tốt, được chế tạo với thiết bị trong nước và chi phí sản xuất thấp. Tiếp theo chương 2 trình bày quá trình chế tạo cảm biến trong phòng thí nghiệm với nhiều điều kiện khác nhau để tìm ra kích thước vật lý và điều kiện chế tạo tối ưu. Cuối cùng, cảm biến chế tạo thành công được đưa ra thử nghiệm và đo kiểm bởi các thiết bị đo có độ chính xác cao để xác định đặc tuyến và tham số về độ nhạy, độ lặp lại, độ trễ v.v..

Các kết quả của chương 2 được thể hiện trong *Công trình nghiên cứu J1, J3, J4 và P1*.

2.1. Giới thiệu

Trong thời gian gần đây, cảm biến áp lực sử dụng vật liệu polyme được quan tâm nghiên cứu cả trong giới học thuật và công nghiệp vì loại cảm biến này có những ưu thế mà cảm biến vô cơ không có. Đó chính là có thể sản xuất ở nhiệt độ thấp nên giảm chi phí sản xuất, đặc tính cơ học mềm dẻo và diện tích rộng [10, 25, 34, 44, 45, 51, 57–64]. Điều này chỉ ra tiềm năng xây dựng mạng IoT kiểu mới với các cảm biến không chỉ cần công suất thấp, giá

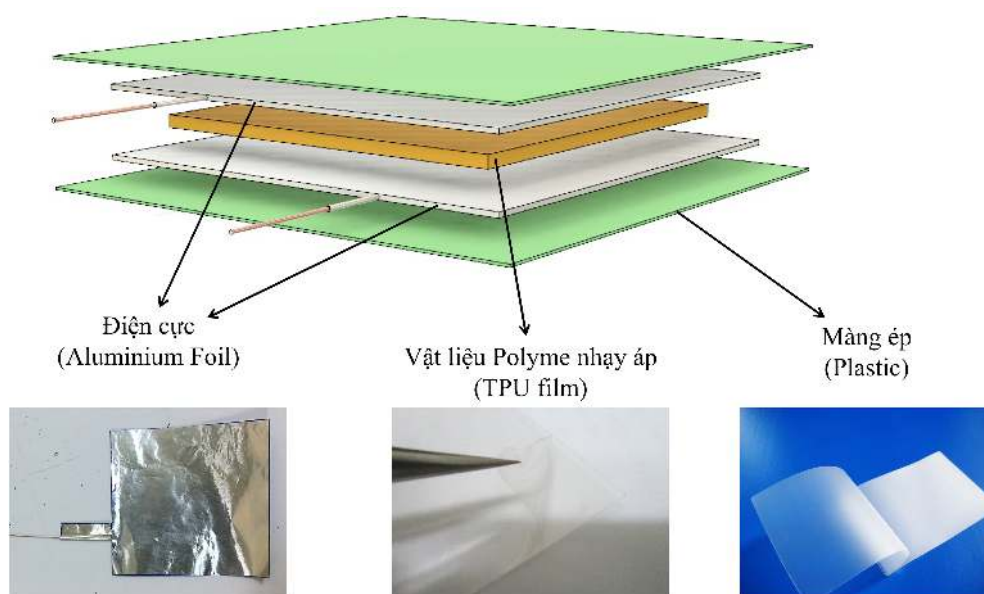
thành rẻ mà còn tương tích với nhiều loại bề mặt [59, 65].

Về mặt cấu trúc, cảm biến áp lực gồm một lớp polyme tích cực nằm giữa hai điện cực [10, 25, 34, 44, 45, 51, 58–64]. Khi đặt áp lực lên cảm biến các thông số của lớp vật liệu polyme như điện trở, điện tích hay điện dung thay đổi, tín hiệu điện đầu ra của cảm biến (tương ứng là cảm biến áp trở, áp điện và áp dung) cũng thay đổi theo. Lớp vật liệu tích cực thường được chọn là polyme nhạy áp, hỗn hợp polyme và hạt nano hoặc polyme pha tạp ống nano cacbon [10, 25, 34, 44, 45, 51, 58–64]. Ví dụ, Ding và các cộng sự đã thêm các hạt nickel dạng cầu gai vào cao su silicon lỏng [57]. Khi đó, dải áp lực mà cảm biến hoạt động là từ 0 đến 6,4 MPa. Mohiuddin và Van Ho lại chế tạo cảm biến áp lực bằng cách trộn ống nano cacbon đa vách vào polyme polyether ether ketone (PEEK) để cảm biến có dải đo lên tới 40 MPa [66]. Tuy nhiên, kỹ thuật chế tạo các cảm biến trên là vô cùng phức tạp và chi phí lớn vì việc pha tạp đòi hỏi sự đồng nhất ở mức rất cao. Do vậy, trong nghiên cứu này luận án lựa chọn cấu trúc cơ bản với lớp polyme ở giữa hai điện cực và thực hiện chế tạo theo phương pháp ép nhiệt để giảm thiểu chi phí sản xuất.

Về mặt vật liệu tích cực, polyme nhạy áp có tính chất mềm dẻo được sử dụng cho lớp vật liệu tích cực phổ biến nhất là PDMS (Polydimethyl Siloxane), PET (Polyethylene Terephthalate), PEN (Polyethylene) và PU (Polyurethane). Trong đó vật liệu PDMS được sử dụng ở các nghiên cứu [4, 67–69], vật liệu PET [32, 48, 70] và PEN [52, 60]. Trong thời gian gần đây, PU là vật liệu đã được chứng minh có những tính chất vượt trội về khả năng biến dạng [71], độ mềm dẻo, khả năng chịu áp lực lớn [72]. Thêm nữa, PU còn có hệ số điện môi lớn hơn các polyme cùng loại và có ứng suất young thấp và độ bền kéo cao [71].

Bên cạnh đó, vật liệu sử dụng làm điện cực thường được chọn như vàng (Au), đồng (Cu) hay nhôm (Al) dưới dạng mỏng cỡ μm thể hiện có khả năng dẫn điện tốt và tính mềm dẻo cao. Tuy nhiên, tấm kim loại nhôm có độ mềm dẻo vượt trội, giá thành rẻ và quan trọng nhất là có độ liên kết tốt với PU khi gia công bằng phương pháp ép nhiệt. Do đó, để phát triển cảm biến áp lực điện dung bằng phương pháp ép nhiệt nhằm đơn giản hoá trong chế tạo với chi phí thấp, luận án đề xuất sử dụng cấu trúc cảm biến xen kẽ với lớp vật liệu điện môi màng mỏng PU được đặt giữa hai tấm điện cực nhôm.

Cấu trúc của cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU đề xuất được thể hiện trên Hình 2.1. Trong đó, vật liệu polyme nhạy áp được đặt giữa hai tấm điện cực nhôm. Điện cực nhôm và vật liệu polyme được liên kết và bảo vệ bởi lớp màng nhựa (plastic) bên ngoài cùng. Thêm vào đó, các điện cực nhôm được kết nối với dây dẫn ra bên ngoài.



Hình 2.1: Cấu trúc cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU.

Các tấm điện cực nhôm sử dụng từ các tấm nhôm (Aluminium foil) 99,999 % của hãng Sigma-Aldrich/Singapore có điện trở suất $2,6548 \mu\Omega\text{cm}$ và độ

dày 30 μm . Vật liệu polyme nhạy áp sử dụng màng mỏng PU của hãng Sanyo Chemical/Nhật Bản, có độ bền kéo lên tới 38 MPa. Lớp màng ép bảo vệ bên ngoài cùng sử dụng các loại giấy ép bằng nhựa có sẵn keo dính trên thị trường.

2.2. Quy trình chế tạo cảm biến

Quy trình chế tạo cảm biến đề xuất bao gồm ba bước: Xử lý bề mặt điện cực; chuẩn bị điện cực, màng PU; và bước gia công hoàn thiện cảm biến.

- **Bước 1:** Xử lý bề mặt điện cực

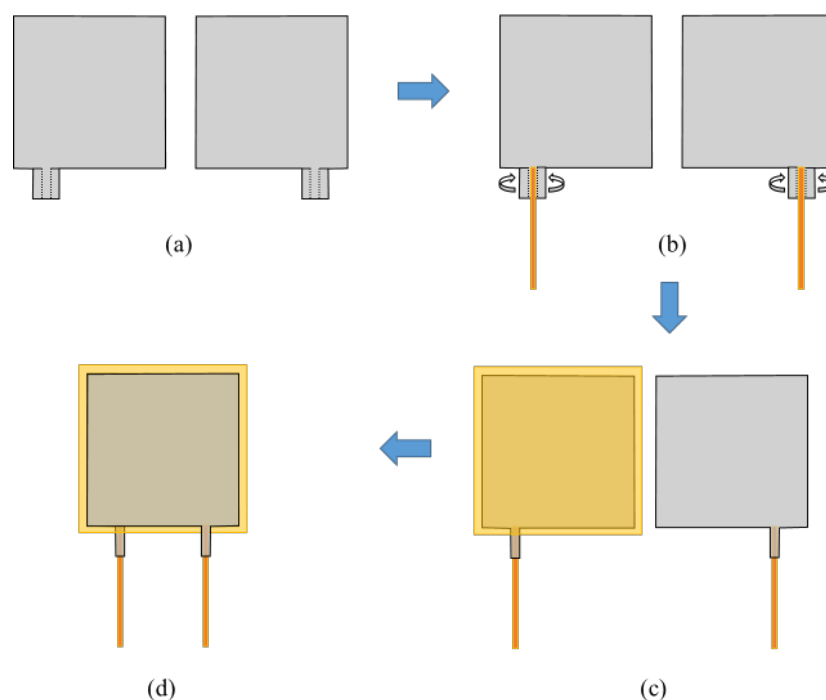
Khi các tấm điện cực nhôm tiếp xúc với không khí, các nguyên tử nhôm trên bề mặt dễ phản ứng với oxy trong không khí để tạo ra lớp ô-xít nhôm bao phủ trên bề mặt các tấm điện cực nhôm này. Cùng với các hạt bụi nhỏ trong không khí, lớp ô-xít nhôm có thể ảnh hưởng tới độ dẫn điện cũng như ảnh hưởng tới chất lượng của cảm biến sau khi chế tạo. Do đó, cần thiết phải có bước xử lý bề mặt các điện cực nhôm để loại bỏ các phân tử ô-xít nhôm cũng như các tạp chất trên bề mặt của các điện cực.

Bước xử lý bề mặt điện cực bằng phương pháp ăn mòn plasma được tiến hành như sau: Tấm điện cực nhôm được đưa vào buồng ăn mòn chân không và được đặt ở áp suất ở 10^{-6} Torr. Sau đó, dòng khí argon được cấp vào buồng với tốc độ 20 $\text{cm}^3/\text{phút}$ và áp suất trong buồng được duy trì ở mức 0,1 Pa. Một quy trình ăn mòn tự động được thiết lập để ăn mòn các điện cực nhôm. Trong đó, công suất ăn mòn được thiết lập ở mức 30 W với tốc độ ăn mòn 0,5 nm/phút. Các ion khí argon có động năng cao ở trong môi trường trạng thái plasma va chạm với bề mặt của các điện cực nhôm. Năng lượng khi va chạm đủ lớn để đánh văng các phân tử trên bề mặt điện cực nhôm giúp làm sạch các bề mặt điện cực. Thời gian tiến hành của một quy trình ăn

mòn tự động được thực hiện trong thời gian khoảng từ 5 phút tới 10 phút.

- **Bước 2:** Chuẩn bị điện cực, màng PU

Quá trình chuẩn bị các tấm điện cực và màng PU được tiến hành trong điều kiện phòng thí nghiệm, được thể hiện trên Hình 2.2.



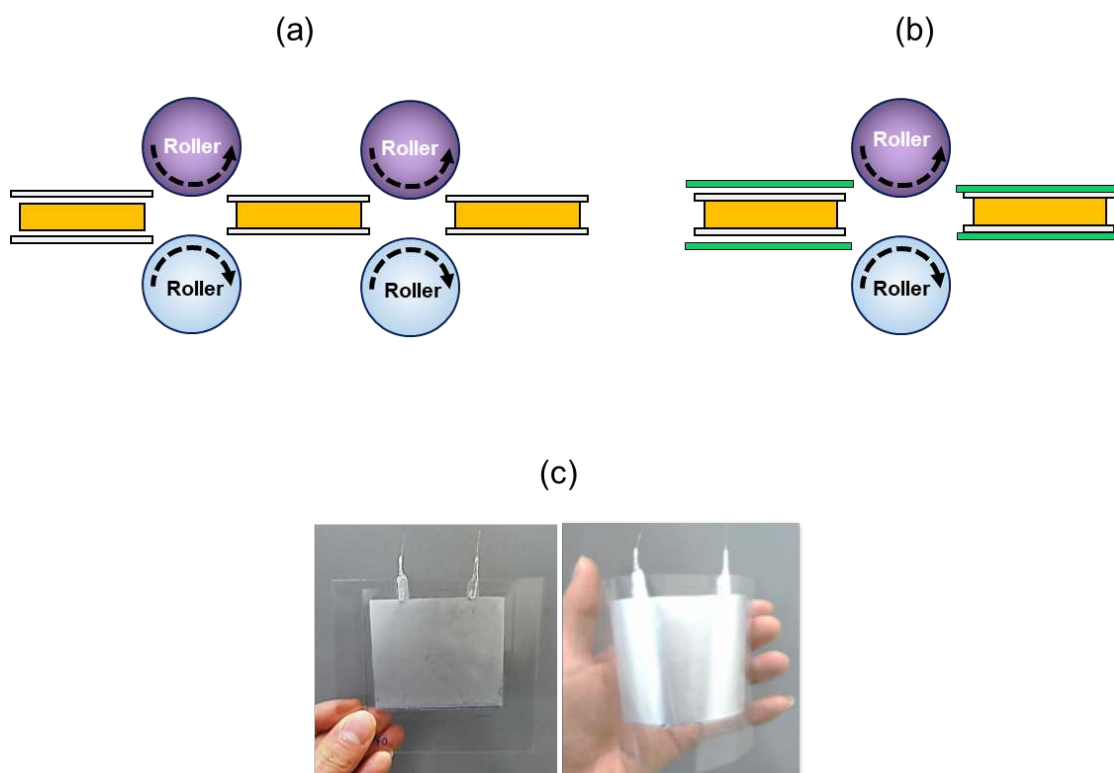
Hình 2.2: Các bước chuẩn bị điện cực và màng PU.

Tấm điện cực bằng nhôm sau khi được xử lý bề mặt bằng phương pháp ăn mòn plasma, được cắt ra thành hai điện cực giống nhau với kích thước đã định trước (7×7) cm². Mỗi tấm điện cực nhôm được cắt có một phần tai để kết nối với dây dẫn (Hình 2.2(a)). Phần tai của mỗi điện cực sau khi được đặt các dây dẫn bằng đồng (đường kính 0,1 mm) được gấp mép để tăng diện tích tiếp xúc giữa dây dẫn và điện cực (Hình 2.2(b)). Tấm màng PU có độ dày 100 μ m được cắt thành miếng với kích thước (8×8) cm² lớn hơn kích thước phần điện cực để tránh ngắn mạch. Sau đó màng PU được ghép xen

giữa hai tấm điện cực nhôm (Hình 2.2(c)(d)).

- **Bước 3:** Gia công hoàn thiện cảm biến

Các bước của quá trình gia công hoàn thiện cảm biến được thể hiện trên Hình 2.3.

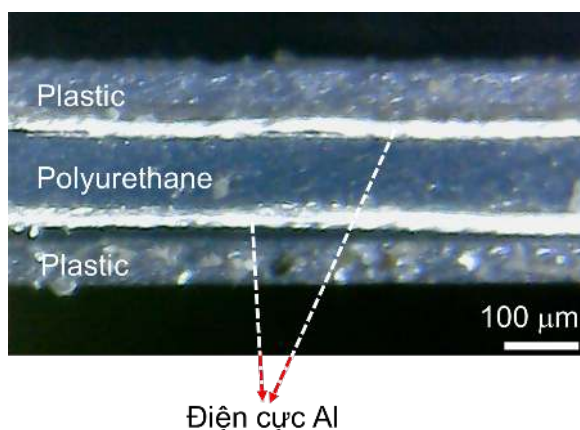


Hình 2.3: Gia công hoàn thiện cảm biến: (a) quá trình tạo lớp điện cực, (b) đóng gói cảm biến, (c) cảm biến ở trạng thái thường (bên trái) và ở trạng thái uốn cong (bên phải).

Trong đó, tấm màng PU ghép xen giữa hai tấm điện cực được thực hiện ép hai lần, với thiết bị ép nhiệt được đặt ở nhiệt độ 80 °C. Quá trình ép nhiệt tạo ra sự liên kết giữa các điện cực và màng PU; đồng thời giúp loại bỏ hơi nước và không khí ở phần tiếp xúc giữa màng PU với điện cực (Hình 2.3(a)). Tiếp theo, lớp vỏ bảo vệ bằng màng nhựa được phủ bên ngoài cảm biến bằng phương pháp ép nhiệt ở nhiệt độ 80 °C (Hình 2.3(b)). Hình 2.3(c) thể hiện

hình ảnh cảm biến sau khi hoàn thiện.

Sau khi hoàn thiện chế tạo cảm biến, để kiểm tra tính đồng nhất cũng như tính liên kết của các lớp vật liệu cảm biến, mặt cắt của cảm biến được chụp bởi kính hiển vi điện tử có độ phóng đại 1000 lần và được thể hiện trên Hình 2.4.



Hình 2.4: Ảnh mặt cắt cảm biến sau chế tạo.

Theo Hình 2.4, cảm biến sau chế tạo có tính liên kết tốt giữa các thành phần điện cực, màng PU và lớp vỏ bảo vệ bên ngoài bằng nhựa. Trong đó, các lớp điện cực song song và cách đều với nhau, được xen giữa là lớp màng PU.

2.3. Kiểm tra và thử nghiệm xác định tham số cảm biến

Các thí nghiệm đã được tiến hành để khảo sát đặc tuyến của cảm biến sau chế tạo. Trong thí nghiệm này, thiết bị nén thủy lực UH 500-kN (Shimadzu/Nhật Bản) được sử dụng để tạo áp lực tác động lên cảm biến. Điện dung đầu ra cảm biến được đo bằng đồng hồ đo điện dung HIOKI 3522-50 (Hioki/Nhật Bản). Hình ảnh quá trình thí nghiệm được trình bày trên Hình 2.5.

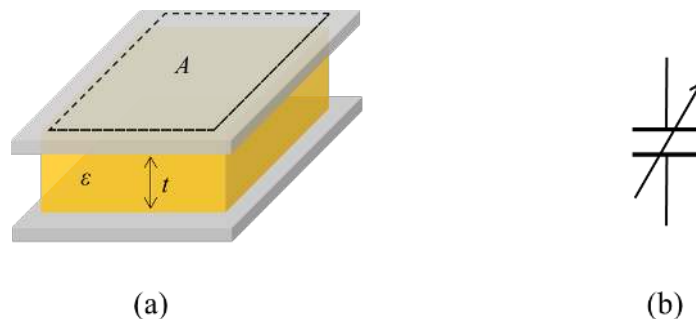
Cảm biến được đặt lên bàn gia lực của thiết bị nén thủy lực, sau đó UH-500



Hình 2.5: Thí nghiệm khảo sát đặc tuyến cảm biến.

kN được thiết lập ở chế độ làm việc bán tự động với dải lực nén tác động từ 0 tới 6000 N, tốc độ hành trình 0,1 mm/phút. Trong quá trình thử nghiệm, sự thay đổi điện dung của cảm biến sẽ được đo bằng thiết bị HIOKI 3522-50. Toàn bộ quá trình thí nghiệm được tiến hành ở điều kiện phòng thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN:17025 với nhiệt độ $(25 \pm 10) ^\circ\text{C}$. Đặc tính kỹ thuật của các thiết bị sử dụng để khảo sát đặc tuyến cảm biến được thể hiện trên Bảng 2.1.

Với cấu trúc theo thiết kế, cảm biến có thể được xem như là một tụ điện có điện dung thay đổi như thể hiện trên Hình 2.6.



Hình 2.6: (a) Hình ảnh minh họa và (b) sơ đồ tương đương của cảm biến.

Điện dung của tụ điện có hai điện cực song song được tính theo công thức

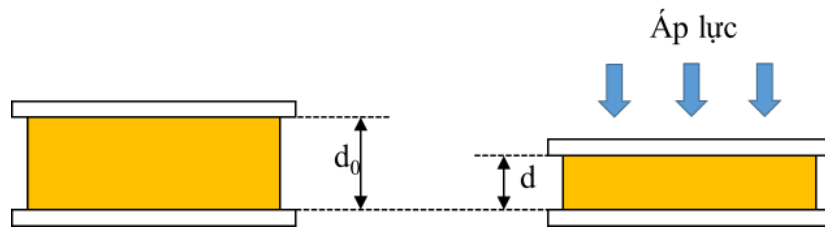
Bảng 2.1: Đặc tính kỹ thuật các thiết bị đo, thiết bị thử nghiệm sử dụng trong luận án.

STT	Tên thiết bị/Đặc tính kỹ thuật	Ghi chú
1	Thiết bị nén thủy lực UH 500-kN - Dải lực nén: (0 - 500) kN; - Tốc độ hành trình: (0,1 - 800) mm/phút; - Độ chính xác: $\pm 0,5 \%$.	Shimazu/Nhật Bản
2	Đồng hồ đo điện dung HIOKI 3522-50 - Dải đo điện dung: 0,1 pF - 20 mF; - Thang đo: 2000 pF/20 nF/200 nF/2 μ F/20 μ F/200 μ F/20 mF; - Độ chính xác: $\pm (0,5 \% + 3 \text{ đ.v.đ})$.	Hioki Electronics/ Nhật Bản
3	Hệ thống thử nghiệm độ sâu vết hàn bánh xe - Kích thước mẫu thử: (300 x 300) mm; - Độ dày mẫu thử: (40 - 120) mm; - Đường kính bánh xe: 203 mm; - Phạm vi thử: 230 mm; - Tốc độ thử nghiệm: 52-53 lần/phút; - Lực thử: 710 N.	Infratest-Humburg/ CHLB Đức
4	Thiết bị đo vận tốc xe ô tô Stalker Lidar RR - Dải đo vận tốc: (0,3 - 481) km/h; - Độ chính xác: 2 km/h; - Khoảng cách đo: 1,5 m/762 m/1200 m; - Thời gian đo: 0,4 s.	Stalker/ Mỹ
5	Hệ thống kiểm tra đặc tuyến IC bán dẫn Keithley 4200 - Kiểm tra đặc tuyến dòng điện một chiều: 10^{-10} A - 1 A; - Kiểm tra đặc tuyến điện áp một chiều: 0,2 μ V - 210 V.	Keithley/ Mỹ
6	Nguồn chuẩn GPC-3030D - Điện áp một chiều: (0 -30) V; Sai số: 0,01 % + 5 mV - Dòng điện một chiều: (0 - 3) A; Sai số: 0,2 % + 3 mA.	Gwinstek/ Đài Loan
7	Đồng hồ đo dòng điện Fluke 87V - Dải đo dòng điện một chiều: 0,01 μ A - 10 A; - Độ chính xác: 0,2 %.	Fluke/ Mỹ

(1.2). Về mặt lý thuyết, điện dung của cảm biến thay đổi khi thay đổi các tham số sau:

- i) Thay đổi hằng số điện môi ε của màng PU.
- ii) Thay đổi diện tích điện cực A .
- iii) Thay đổi độ dày d của màng PU.

Tuy nhiên, hằng số điện môi ε của màng PU hầu như không thay đổi khi có lực tác động. Và sự thay đổi diện tích điện cực của cảm biến là cũng không phù hợp trong thiết kế này. Vì vậy, toàn bộ sự thay đổi điện dung cảm biến có được bằng cách thay đổi độ dày màng PU d . Điều này là hoàn toàn hợp lý vì đặc tính đàn hồi cực tốt của màng PU. Khi có áp lực tác động, độ dày d giảm xuống, dẫn tới điện dung của cảm biến tăng lên theo công thức (1.2). Ngược lại, khi không có áp lực tác động, do đặc tính đàn hồi của màng PU, độ dày d tăng dẫn tới điện dung cảm biến trở lại giá trị ban đầu. Quá trình thay đổi giá trị điện dung cảm biến được minh họa trên Hình 2.7.

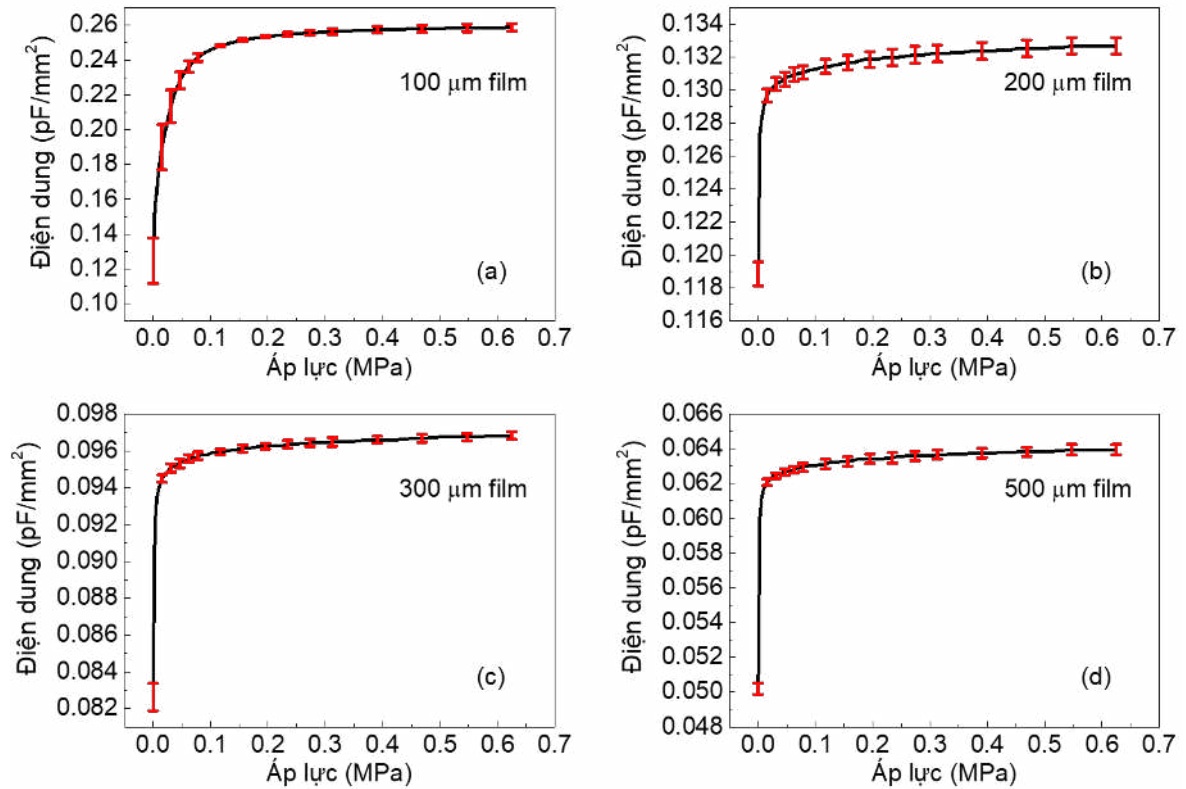


Hình 2.7: (a) Cảm biến ở trạng thái thường và (b) trạng thái khi tác động lực.

2.3.1. Độ nhạy cảm biến

Để khảo sát sự ảnh hưởng của độ dày lớp màng PU tới khả năng thay đổi điện dung, cũng như độ nhạy của cảm biến, các cảm biến có độ dày 100 μm , 200 μm , 300 μm và 500 μm đã được chế tạo theo phương pháp ép nhiệt trên đây. Với bốn cảm biến được chế tạo cùng điều kiện và kích thước giống nhau, các kết quả đo sau đó được lấy trung bình, đặc tuyến của các cảm biến với độ dày của lớp màng PU 100 μm , 200 μm , 300 μm và 500 μm được biểu diễn trên Hình 2.8.

Theo Hình 2.8, đặc tuyến của các cảm biến có giá trị ban đầu là: 0,13; 0,19; 0,083 và 0,050 pF/mm² tương ứng với các cảm biến có độ dày 100 μm ,



Hình 2.8: Đặc tuyến cảm biến ở độ dày (a) 100 μm , (b) 200 μm , (c) 300 μm và (d) 500 μm .

200 μm , 300 μm và 500 μm . Đặc tuyến cảm biến có độ dốc lớn ở phần đầu đặc tuyến và tiến tới bão hòa với chiều tăng của giá trị áp lực p . Đối với các cảm biến ứng dụng chăm sóc sức khỏe [34, 44, 45, 51, 61–64], cấu trúc cảm biến với các khe hở không khí thường được sử dụng để tăng giá trị độ nhạy cảm biến. Tuy nhiên, điều này dẫn tới dải đo của các cảm biến thường bị giới hạn ở mức nhỏ hơn 0,1 MPa. Trong luận án này, do đặc tính mềm dẻo của màng PU có độ bền kéo lên tới 38 MPa, do đó dải đo của cảm biến có thể tăng lên tới 0,65 MPa.

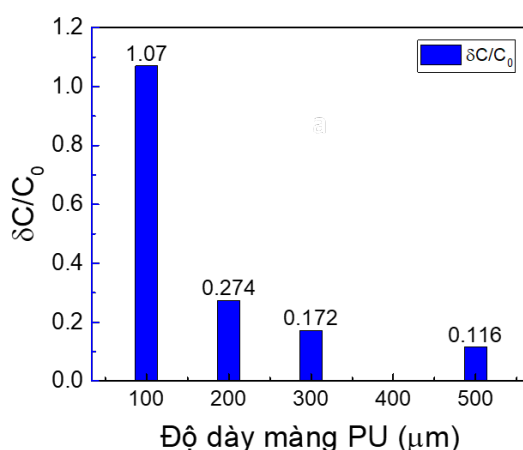
Mặt khác, để khảo sát độ nhạy của cảm biến theo độ dày của lớp màng PU, độ thay đổi điện dung hiệu quả của cảm biến có thể được tính theo công

thức [45]:

$$\frac{\delta C}{C_0} = \frac{C_{Max} - C_0}{C_0} \quad (2.1)$$

Trong đó, C_{max} là giá trị điện dung tại áp lực $p = 0,65$; C_0 là giá trị điện dung tại $p = 0$.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, độ thay đổi điện dung hiệu quả giảm đáng kể từ 1,070 tới 0,274; 0,172 và 0,116 tương ứng với độ dày của cảm biến 100 μm , 200 μm , 300 μm và 500 μm theo đồ thị Hình 2.9. Điều này ám chỉ rằng cảm biến với độ dày 100 μm có độ thay đổi điện dung tốt nhất. Do đó, độ nhạy của cảm biến loại 100 μm sẽ tốt nhất so với ba loại còn lại là 200 μm , 300 μm và 500 μm .



Hình 2.9: Độ thay đổi điện dung hiệu quả của cảm biến ứng theo độ dày của màng PU

Độ nhạy của cảm biến áp lực được tính theo công thức:

$$S = \frac{\delta(\Delta C/C_0)}{\Delta P} \quad (2.2)$$

Trong đó, ΔC là sự thay đổi điện dung cảm biến, C_0 là điện dung ban đầu của cảm biến khi chưa có lực tác dụng và ΔP là sự thay đổi áp lực tác dụng vào cảm biến.

Độ nhạy của các loại cảm tính toán trên dữ liệu thí nghiệm và được thể hiện trên Bảng 2.2.

Bảng 2.2: Độ nhạy của cảm biến khảo sát ở các độ dày khác nhau.

Áp lực (MPa)	Độ nhạy (kPa^{-1})			
	$d = 100 \mu\text{m}$	$d = 200 \mu\text{m}$	$d = 300 \mu\text{m}$	$d = 500 \mu\text{m}$
0-0,03	$2,42 \times 10^{-2}$	$3,40 \times 10^{-3}$	$5,33 \times 10^{-3}$	$8,77 \times 10^{-3}$
0,03-0,2	$2,98 \times 10^{-3}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,89 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-4}$
0,20-0,65	$1,18 \times 10^{-4}$	$5,57 \times 10^{-5}$	$5,07 \times 10^{-5}$	$8,35 \times 10^{-5}$

Bảng 2.2 cho thấy, độ nhạy của cảm biến phụ thuộc vào độ dày của màng PU. Theo đó độ nhạy cảm biến S tăng lên khi độ dày d giảm đi. Theo kết quả thực nghiệm, độ nhạy trung bình trong dải (0 – 0,03) MPa lần lượt là: $2,42 \times 10^{-2}$; $3,40 \times 10^{-3}$; $5,33 \times 10^{-3}$ và $8,77 \times 10^{-3} \text{ kPa}^{-1}$ tương ứng với các cảm biến có độ dày $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$ và $500 \mu\text{m}$. Đối với cảm biến độ dày $100 \mu\text{m}$ giá trị độ nhạy tốt nhất được ghi nhận ở mức $S = 8 \times 10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$ tại giá trị áp lực dưới 0,003 MPa (tương ứng với lực tác dụng 20 N).

Sự phụ thuộc của độ nhạy cảm biến vào độ dày có thể được giải thích như sau, với điện dung của cảm biến được tính theo công thức (1.2):

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

Trong đó, C là điện dung của cảm biến; ε , d hằng số điện môi và độ dày của màng PU; A là phần diện tích chồng lấn của hai điện cực nhôm.

Bằng cách lấy vi phân hai vế công thức trên ta có:

$$\frac{\partial C}{\partial d} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{A}{d^2} \quad (2.3)$$

Theo công thức (2.3), để có độ nhạy lớn ($\frac{\partial C}{\partial d}$ lớn) ta luôn mong muốn d nhỏ nhất có thể. Tuy nhiên khi d nhỏ lại dẫn tới thu hẹp khoảng làm việc của

cảm biến. Theo đó, với độ cứng của vật liệu là k thì lực tác động vào cảm biến có thể được tính:

$$\Delta F = k\Delta d \quad (2.4)$$

trong đó ΔF là độ thay đổi của lực tác động, Δd là độ thay đổi độ dày cảm biến. Do đó về mặt lý thuyết, lực tác động lớn nhất vào cảm biến (được tính khi hai điện cực chạm vào nhau $\Delta d = d$):

$$F_{max} = kd \quad (2.5)$$

Từ công thức (2.3) và (2.5) nhận thấy rằng, có sự trả giá giữa tham số độ nhạy và dải áp lực làm việc của cảm biến khi lựa chọn độ dày của lớp điện môi. Cụ thể, độ dày màng PU càng nhỏ thì dải áp lực làm việc của cảm biến càng hẹp lại theo công thức (2.5).

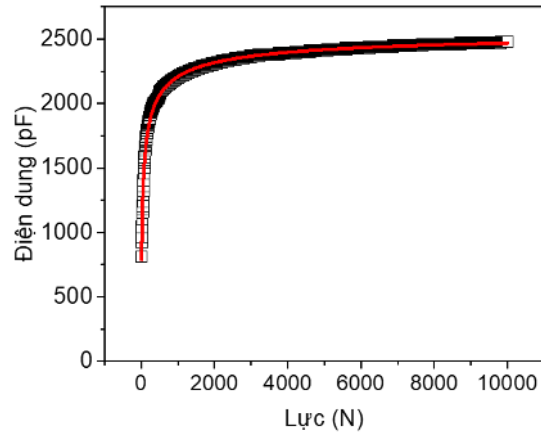
Do đó, tuy chưa có điều kiện thí nghiệm với cảm biến có độ dày nhỏ hơn $100 \mu\text{m}$ nhưng căn cứ vào các kết quả thí nghiệm đã có cùng với cơ sở lý thuyết trên, ta có thể thấy rằng: Với độ dày màng PU nhỏ hơn $100 \mu\text{m}$, độ nhạy có thể được cải thiện tốt hơn nhưng dải áp lực của cảm biến sẽ bị thu hẹp lại.

Vì vậy, độ dày $d = 100 \mu\text{m}$ là lựa chọn mang tới sự cân bằng giữa độ nhạy và dải áp lực làm việc của cảm biến sử dụng màng PU.

Bên cạnh đó, để tìm biểu thức toán học của đặc tuyến cảm biến; bằng cách đồng nhất dữ liệu thí nghiệm với hàm toán học trên phần mềm OriginPro, đường cong đặc tuyến của cảm biến $100 \mu\text{m}$ tuân theo quy luật hàm mũ được thể hiện trên Hình 2.10.

Đặc tuyến của cảm biến tuân theo quy luật hàm mũ có dạng:

$$y = \frac{abx^{1-c}}{1 + bx^{1-c}} \quad (2.6)$$



Hình 2.10: Đặc tuyến cảm biến của cảm biến 100 μm theo quy luật hàm mũ.

Bảng 2.3 so sánh cảm biến của luận án với các công trình nghiên cứu gần đây trên các tham số diện tích, khoảng đo và độ nhạy.

Bảng 2.3: So sánh kết quả đánh giá của cảm biến đề xuất với một số nghiên cứu gần đây

STT	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo, năm
1	(10×15) mm ²	100 Pa-6 MPa	0,35 kPa ⁻¹ @ <1 kPa 0,05 kPa ⁻¹ @ (1-10) kPa 10 ⁻⁵ kPa ⁻¹ @ >500 kPa	[46] 2016
2	(1,2×1,2) cm ²	11 kPa	0,38 kPa ⁻¹	[73] 2017
3	(3×3) cm ²	27 kPa	(0,042-0,152) kPa ⁻¹	[47] 2018
4	~ 1 cm ²	3 MPa	0,09 kPa ⁻¹	[74] 2016
5	0,25 cm ²	5 kPa	0,38 kPa ⁻¹	[75] 2017

Bảng 2.3: (tiếp theo)

STT	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo, năm
6	NA	1,2 MPa	<500 kPa: 1,62 MPa ⁻¹ >500 kPa: 0,57 MPa ⁻¹	[76] 2014
7	(1×1) cm ²	4 kPa	0,8 kPa ⁻¹	[36] 2018
8	(1×1) cm ²	~ kPa	0,7 kPa ⁻¹	[38] 2014
9	NA	(0-10) kPa	130×10 ⁻⁴ kPa ⁻¹	[44] 2017
10	4 mm ²	1,5 MPa	0,025 Mpa ⁻¹	[60] 2018
11	2,5 cm ²	8,5 MPa	~ 0,9 kPa ⁻¹	[77] 2006
12	~mm ²	5 N	9,3×10 ⁻³ kPa ⁻¹	[78] 2017
13	(7×7) cm ²	0,65 MPa	2,24×10 ⁻² kPa ⁻¹ @ <30 kPa 2,98×10 ⁻³ kPa ⁻¹ @ (30-200) kPa 1,18×10 ⁻⁴ kPa ⁻¹ @ >200 kPa	Nghiên cứu của luận án

Theo Bảng 2.3, dải đầu đặc tuyến với giá trị áp lực trong khoảng (0-0,03) MPa, cảm biến đề xuất có độ nhạy bằng $2,42 \times 10^{-2} \text{ kPa}^{-1}$ ở mức tương đương có thể so sánh được với các nghiên cứu [44, 46, 47, 74, 78]. Trong khi hầu hết các công trình nghiên cứu gần đây có diện tích cảm biến nhỏ, khoảng làm việc ở mức cỡ $\sim \text{kPa}$, cảm biến đề xuất có diện tích lớn $(7 \times 7) \text{ cm}^2$ và

dải làm việc rộng tới 0,65 MPa. Ở dải làm việc áp lực cao (0,2-0,65) MPa, cảm biến đề xuất có độ nhạy ở mức tương đương có thể so sánh được với các công trình [60, 76] và [46].

2.3.2. Độ lặp lại của cảm biến

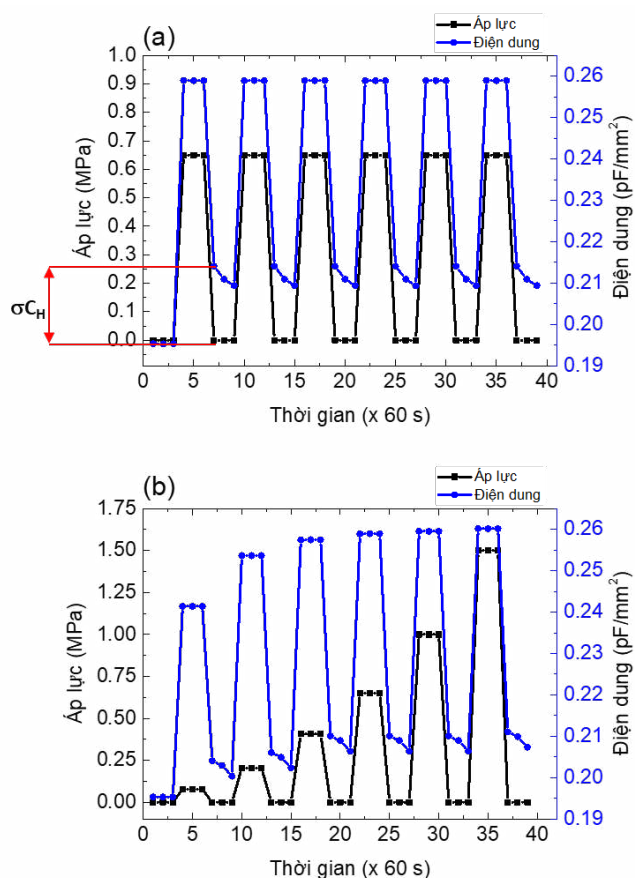
Kết quả khảo sát độ nhạy cảm biến theo độ dày cho thấy, cảm biến có độ dày 100 μm cho độ nhạy tốt nhất. Do đó, các thí nghiệm khảo sát độ lặp lại của cảm biến được tiến hành đối với cảm biến có độ dày 100 μm với ba thử nghiệm chính như sau.

- i) Thử nghiệm với các áp lực lặp lại ở mức 0,65 MPa, sử dụng thiết bị nén thủy lực UH 500-kN.
- ii) Thử nghiệm với các áp lực lặp lại ở mức khác nhau: 0,08; 0,2; 0,4; 0,65; 1,0 và 1,5 MPa sử dụng thiết bị UH 500-kN.
- iii) Thử nghiệm đáp ứng của cảm biến đối với các áp lực lặp lại trong một thời gian dài, sử dụng Hệ thống thử nghiệm độ sâu vết hần bánh xe Infratest-Humburg.

Các kết quả thử nghiệm (i) và (ii) được biểu diễn trên Hình 2.11. Như được thể hiện trên Hình 2.11(a), kết thúc chu kỳ xung thứ nhất, tại áp lực $p = 0$ điện dung cảm biến không trở về giá trị ban đầu. Nguyên nhân do sự biến dạng của màng PU cần một khoảng thời gian nhất định để khôi phục lại trạng thái ban đầu gây ra hiện tượng trễ cảm biến [11, 32, 37].

Độ trễ của cảm biến được tính theo kết quả thí nghiệm (Hình 2.11(a)):

$$\frac{\sigma C_H}{C_{Max}} = \frac{0,215 - 0,195}{0,26} = 7,7\% \quad (2.7)$$

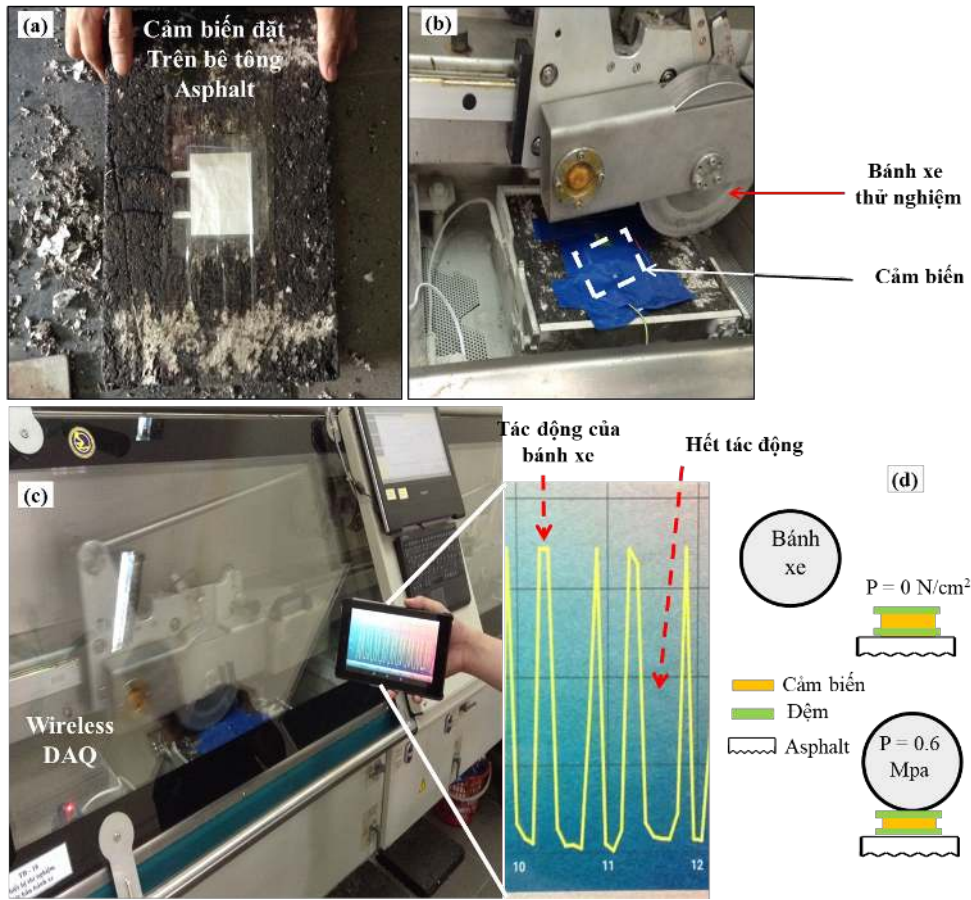


Hình 2.11: Đáp ứng của cảm biến với (a) các áp lực lặp lại 0,65 MPa và (b) các áp lực lặp lại thay đổi 0,08; 0,2; 0,4; 0,65; 1,0 và 1,5 MPa.

Với σC_H là hiệu số C sau chu kỳ áp lực thứ nhất với C_0 trên Hình 2.11(a).

Tuy nhiên, ở chu kỳ thứ hai trở đi, đáp ứng của cảm biến cho thấy độ lặp lại tốt. Tương tự như vậy, ở phép thử đối với các chu kỳ áp lực thay đổi được thể hiện trên Hình 2.11(b), cảm biến cũng cho thấy độ lặp lại tốt giữa các chu kỳ.

Hình ảnh thử nghiệm cảm biến đối với các áp lực lặp lại trong thời gian dài được thể hiện trên Hình 2.12. Cảm biến được cố định lên tấm bê tông asphalt làm mẫu thử bằng băng dính thông thường. Sau đó, tấm bê tông được đưa vào Hệ thống thử nghiệm độ sâu vết hằn bánh xe. Trong quá trình thử nghiệm, tín hiệu từ cảm biến được hiển thị trên máy tính bằng bảng kết

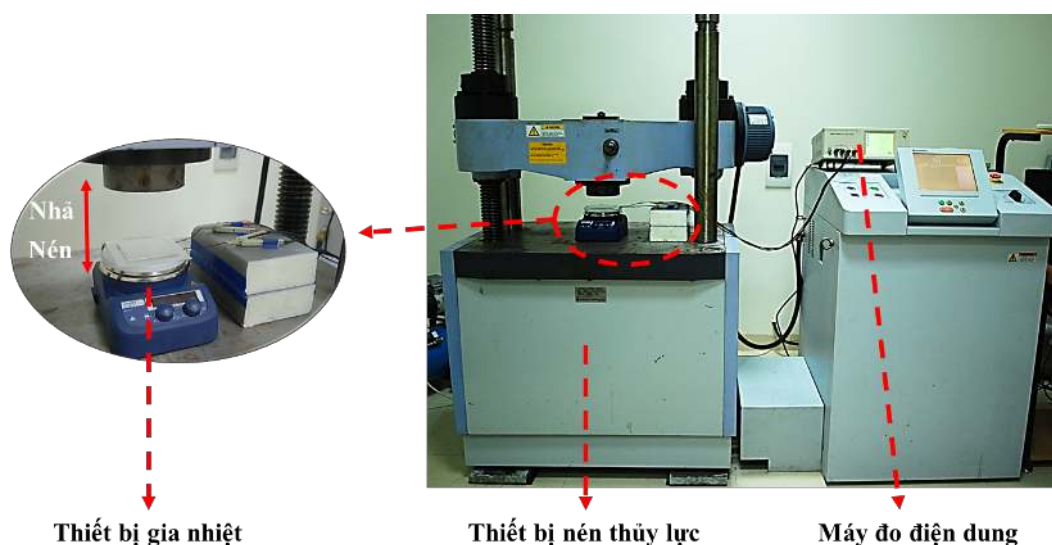


Hình 2.12: Thử nghiệm độ lặp lại cảm biến sử dụng hệ thống thử nghiệm độ sâu vết hằn bánh xe. (a) Cảm biến được gắn lên tấm bê tông asphalt, (b) mẫu thử được đặt dưới bánh xe hệ thống thử nghiệm vết hằn bánh xe, (c) tín hiệu cảm biến thu được trên máy tính bằng trong quá trình thử nghiệm và (d) minh họa quá trình thử nghiệm.

nối wifi. Quá trình thử nghiệm cho thấy, cảm biến có thể chịu đựng hơn 500 lần thử mà vẫn đảm bảo làm việc tốt.

2.3.3. Sự ảnh hưởng của nhiệt độ

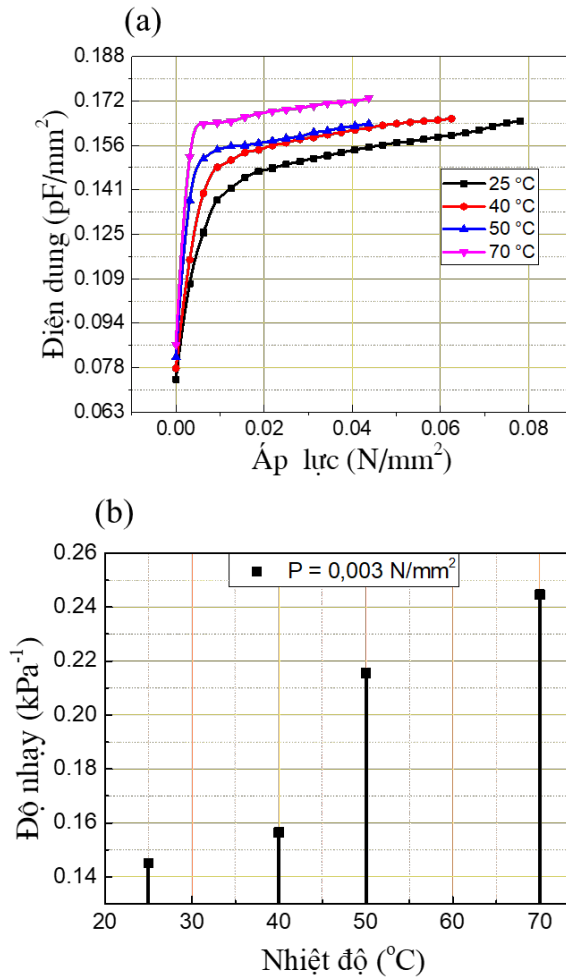
Các công trình nghiên cứu [40, 79] đã chỉ ra rằng đặc tuyến của cảm biến áp lực hữu cơ phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ. Vì vậy, nghiên cứu sinh đã tiến hành thí nghiệm khảo sát sự ảnh hưởng của nhiệt độ tới đặc tuyến cũng như tham số độ nhạy của cảm biến loại $100 \mu\text{m}$. Chi tiết quá trình thí nghiệm được mô tả trên Hình 2.13.



Hình 2.13: Thử nghiệm tác động của nhiệt độ đối với cảm biến $100 \mu\text{m}$.

Theo đó, cảm biến sau khi chế tạo được đặt trên thiết bị gia nhiệt SCILO-GEX MS-H280-Pro. Thiết bị gia nhiệt có chức năng làm nóng và duy trì nhiệt độ của cảm biến ở các nhiệt độ cần khảo sát. Thiết bị nén thủy lực UH-500 kN làm việc ở chế độ bán tự động, tốc độ hành trình 1 mm/phút , được sử dụng để tạo lực nén tác dụng lên cảm biến trong quá trình thí nghiệm. Điện dung cảm biến trong quá trình thử được giám sát bởi thiết bị HIOKI 3522-50 ở chế độ xoay chiều, tần số $100 \text{ Hz}/1 \text{ kHz}$ - phù hợp với cảm biến hữu cơ có tần số đáp ứng thấp [80].

Các đồ thị đặc tuyến cảm biến tại các nhiệt độ thử nghiệm được thể hiện trên Hình 2.14(a). Theo đó, các đồ thị đặc tuyến của cảm biến tăng khá đều theo giá trị nhiệt độ. Cụ thể, đường đặc tuyến cảm biến ở 25°C thấp nhất với điểm đầu đặc tuyến ở giá trị khoảng $0,072 \text{ pF/mm}^2$, đặc tuyến tăng nhanh ứng với giá trị áp lực trong khoảng $(0-0,02) \text{ N/mm}^2$, sau đó tăng chậm rồi có xu hướng bão hòa ở giá trị $0,16 \text{ pF/mm}^2$. Các đặc tuyến nhiệt độ còn lại ở 40°C , 50°C , 70°C sắp xếp khá đều trên đường đặc tuyến 25°C theo khoảng



Hình 2.14: Sự phụ thuộc của (a) đặc tuyến cảm biến và (b) độ nhạy theo nhiệt độ.

gia tăng của nhiệt độ. Trong đó, đường đặc tuyến cảm biến ở 70 °C nằm cao nhất với điểm đầu đặc tuyến ở giá trị khoảng 0,082 pF/mm², đặc tuyến tăng nhanh ứng với giá trị áp lực trong khoảng (0-0,003) N/mm², sau đó tăng chậm rồi có xu hướng bão hòa ở giá trị 0,172 pF/mm². Cùng với đó, các đặc tuyến ở nhiệt độ cao hơn có xu hướng tiến tới giá trị bão hòa nhanh hơn.

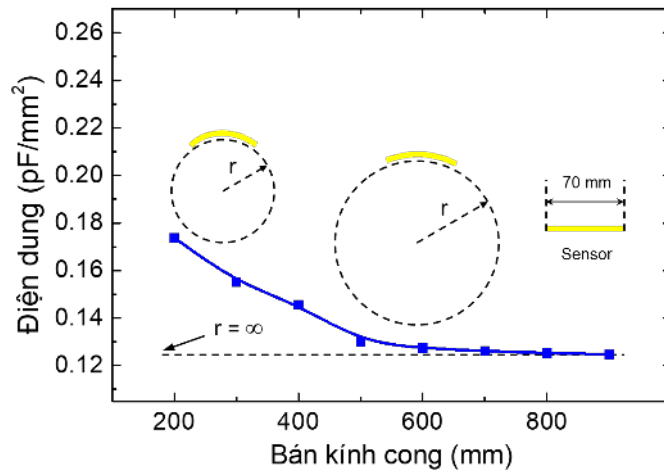
Cùng với đặc tuyến theo nhiệt độ của cảm biến, tham số độ nhạy cũng thay đổi theo nhiệt độ như được thể hiện trên Hình 2.14(b). Xét tại giá trị áp lực $P = 0,03 \text{ N/mm}^2$, độ nhạy cảm biến ở 25 °C nhỏ nhất với giá trị 0,145 kPa⁻¹, độ nhạy ở các nhiệt độ 40 °C, 50 °C, 70 °C tăng dần tương ứng với

các giá trị $0,159 \text{ kPa}^{-1}$, $0,218 \text{ kPa}^{-1}$, $0,245 \text{ kPa}^{-1}$.

Kết quả thí nghiệm cho thấy, cảm biến áp lực hữu cơ chế tạo từ vật liệu PU có hệ số ảnh hưởng nhiệt độ dương. Tương tự như các khảo sát về ảnh hưởng của nhiệt độ tới cảm biến áp lực hữu cơ tại các công trình nghiên cứu của A. Shirinov [79] và S. Wan [40]. Do đó, đặc tuyến nhiệt độ của cảm biến là tham số rất quan trọng để thực hiện các giải pháp bù nhiệt cho các mạch giao tiếp cho các cảm biến.

2.3.4. Độ uốn cong của cảm biến

Để khảo sát khả năng uốn cong của cảm biến sử dụng màng PU, điện dung đầu ra của cảm biến được đo khi cảm biến được uốn cong với các bán kính khác nhau thay đổi từ 200 mm tới vô cùng (trạng thái bình thường).



Hình 2.15: Điện dung cảm biến phụ thuộc vào bán kính cong.

Hình 2.15 cho thấy, điện dung cảm biến thay đổi tương đối lớn với các bán kính cong từ 200 mm tới 500 mm. Từ giá trị bán kính cong 500 mm trở lên, điện dung cảm biến hầu như không thay đổi và tiến tới bão hòa. Điều này chứng tỏ rằng, cảm biến có thể làm việc tốt khi bị uốn cong với bán kính

cong lớn hơn 500 mm.

2.4. Kết luận chương

Các kết quả khảo sát những nghiên cứu trước cho thấy hầu hết các cảm biến áp lực có độ nhạy tốt, dải áp lực làm việc rộng đều có cấu trúc phức tạp với công nghệ chế tạo đòi hỏi sự khắt khe của quá trình pha tạp phần tử dẫn điện vào polyme. Với điều kiện còn hạn chế của trang thiết bị kỹ thuật tại Việt Nam, luận án mạnh dạn đề xuất quy trình chế tạo cảm biến áp lực sử dụng cấu trúc kẹp giữa hai điện cực nhôm là màng mỏng PU bằng phương pháp ép nhiệt.

Kết quả đo tham số của cảm biến sau khi chế tạo cho thấy cấu trúc tối ưu của chiều dày lớp PU là $100 \mu\text{m}$, diện tích cảm biến là $(7 \times 7) \text{cm}^2$. Khi này cảm biến có độ nhạy lên tới $2,42 \times 10^{-2} \text{kPa}^{-1}$ trong dải áp lực nhỏ hơn 30 kPa và $1,18 \times 10^{-4} \text{kPa}^{-1}$ trong dải áp lực lớn hơn 200 kPa. Thêm vào đó, các thử nghiệm về độ uốn cong ảnh hưởng tới các tham số cho thấy cảm biến nên làm việc với bán kính cong lớn hơn 500 mm. Ngoài ra, độ bền của cảm biến cũng rất tốt thể hiện trong việc lặp lại các thử nghiệm áp lực lên tới hơn 500 lần mà cảm biến vẫn làm việc bình thường.

Tuy nhiên, độ trễ cảm biến còn tương đối cao ở mức 7,7 %. Điều này có thể được khắc phục khi kết hợp cảm biến với OTFT mà sẽ được trình bày trong Chương 3 của luận án.

Chương 3

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ TÍCH CỰC DỰA TRÊN OTFT THƯỜNG ĐÓNG

Trong nội dung chương này, luận án khảo sát các nghiên cứu về cảm biến tích cực để đề xuất cấu trúc dễ dàng liên kết với cảm biến thụ động đã có nhằm nâng cao được hiệu năng của cảm biến. Phần tiếp theo là quy trình chế tạo OTFT được mô tả chi tiết và xác định tham số bằng hệ đo chuyên nghiệp và gia công toán học. Phần cuối là mô tả các thực nghiệm nhằm xác định tham số của cảm biến tích cực và so sánh với kết quả của cảm biến thụ động đã có.

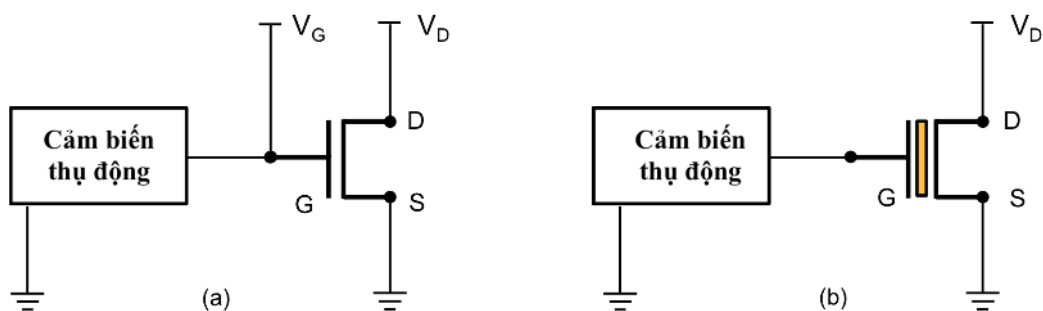
Các kết quả của chương 3 được thể hiện trong *Công trình nghiên cứu J2* và *C2*.

3.1. Giới thiệu

Cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU do luận án đề xuất mặc dù có các tham số có thể so sánh được với các nghiên cứu khác nhưng các giá trị này vẫn cần được cải thiện để có thể đáp ứng cho nhiều ứng dụng hơn. Một trong các giải pháp thực hiện chính là từ cảm biến thụ động đã có tạo ra cảm biến tích cực bằng cách sử dụng transistor để khuếch đại tín hiệu nhận được. Cảm biến áp lực tích cực sử dụng transistor màng mỏng hữu cơ (OTFT) trong các nghiên cứu [34, 81–83] đã chứng minh có sự cải thiện đáng kể về độ nhạy, độ trễ và giảm điện áp làm việc của cảm biến. (*Tham số chi*

tiết được tổng hợp trong Phụ lục của luận án).

Cảm biến tích cực gồm thành phần thụ động được kết nối với OTFT. Thành phần thụ động thường là cảm biến áp lực điện dung hoặc cảm biến áp lực điện tích. Khi có áp lực tác động thì điện dung, điện tích của thành phần thụ động thay đổi dẫn tới sự thay đổi tín hiệu đầu ra của OTFT. Để sử dụng tính năng khuếch đại tín hiệu, thành phần thụ động được nối với ngõ vào, tức là cực cửa (G: Gate electrode) của OTFT [34, 81, 84] như minh họa trên Hình 3.1.

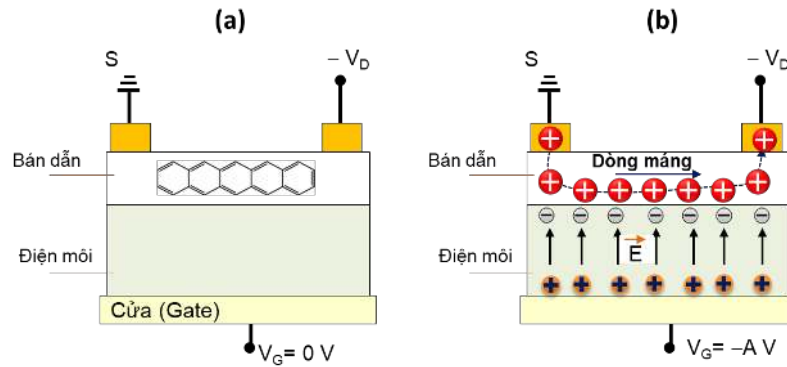


Hình 3.1: Cấu trúc của cảm biến tích cực sử dụng (a) OTFT thường mở và (b) OTFT thường đóng.

Do bán dẫn hữu cơ không có sẵn hạt dẫn mà cần được cung cấp từ bên ngoài, cho nên khi chưa cấp điện áp cực cửa (V_{GS} : Gate-Source voltage) cho OTFT thì kênh dẫn tại lớp bán dẫn chưa hình thành (trạng thái thường mở: normally off state) như mô tả trên Hình 3.2(a).

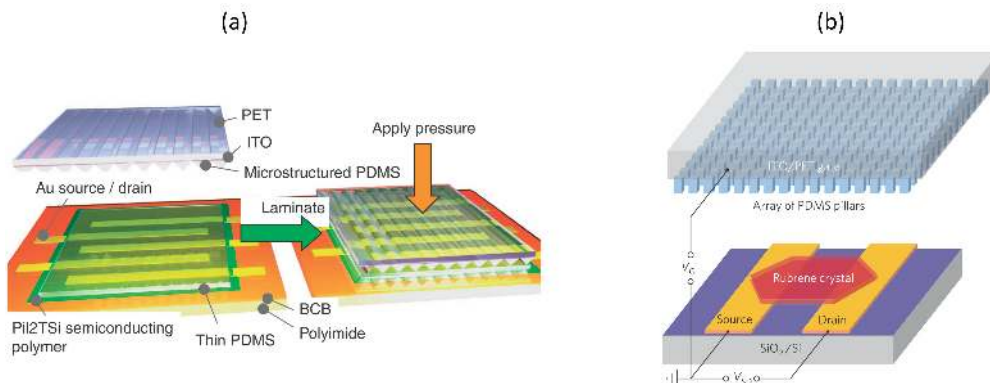
Muốn chuyển OTFT của cảm biến sang trạng thái dẫn (trạng thái thường đóng: normally on state), cần cung cấp điện áp V_{GS} đủ lớn để tạo điện trường hút hạt dẫn lỗ trống từ điện cực nguồn vào lớp bán dẫn như được mô tả trên Hình 3.2(b).

Thông thường V_{GS} và V_{DS} khá lớn như trong thiết kế cảm biến của G. Schwartz [81] và S. mannsfeld [34] với cấu trúc cảm biến được thể hiện ở Hình



Hình 3.2: (a) OTFT ở chế độ thường mở và (b) OTFT ở chế độ đóng khi được cung cấp điện áp V_{GS} .

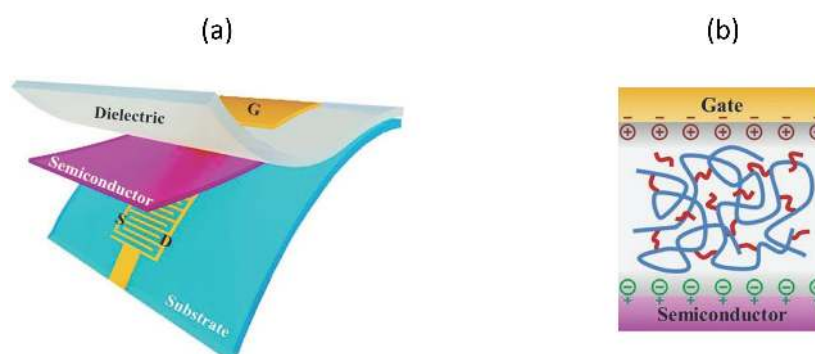
3.3 có các mức điện áp tương ứng là $V_{DS} = V_{GS} = -200$ V và $V_{DS} = -80$ V, $V_{GS} = -20$ V. Bên cạnh đó, nhiều OTFT yêu cầu điện áp làm việc cao > 20 V [85–88]. Các mức điện áp này là rất khó khăn với khả năng áp dụng của cảm biến, nhất là các ứng dụng mạng tính chất di động với nguồn cung cấp thường giới hạn đóng mức nhỏ hơn 5 V.



Hình 3.3: Cấu trúc cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng OTFT (a) [81] và (b) [34].

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng ở mức độ linh kiện để giảm công suất tiêu thụ, cần phải giảm nguồn cấp [10, 83]. Trong khi, V_{DS} là điện áp không thể thiếu để gom hạt dẫn tạo dòng I_{DS} ngõ ra, do đó giảm điện áp cung cấp cho cực cửa V_{GS} là nội dung được tập trung nghiên cứu nhằm giảm công suất cho cảm biến.

Theo mục tiêu đó, nhiều công trình nghiên cứu nỗ lực giảm điện áp cung cấp cho OTFT nhằm giảm công suất tiêu thụ của cảm biến. Các nghiên cứu tập trung vào tối ưu hóa cấu trúc cảm biến cũng như vật liệu sử dụng làm lớp điện môi cực cửa.

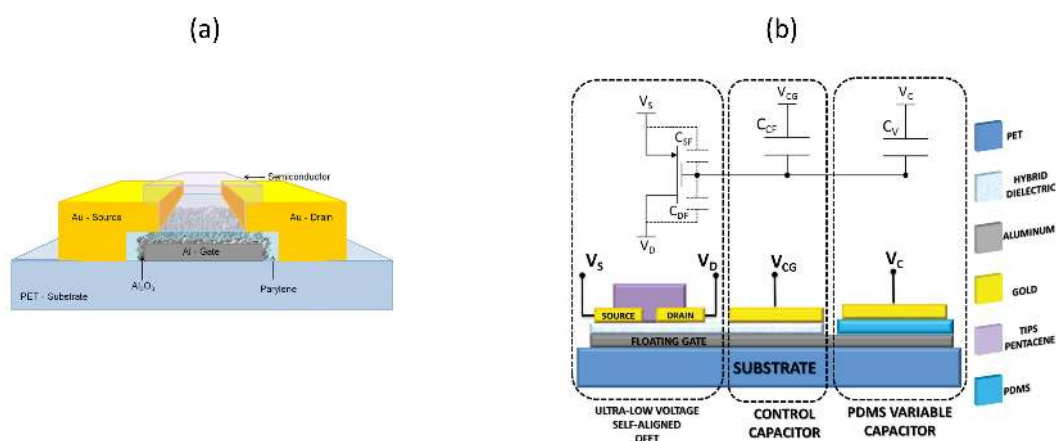


Hình 3.4: (a) Cấu trúc cảm biến và (b) lớp điện môi cực cửa của PEG/PAA của [89].

Theo đó, với mục đích cải thiện vật liệu nhằm tăng hệ số điện môi cực cửa, M. Yin đã công bố cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng OTFT làm việc với điện áp thấp $V_{DS} = V_{GS} = -2$ V [83]. Khi đó, tác giả sử dụng vật liệu EIPH (Elastic Ionic Polyacrylamide Hydrogel), một loại polyme có tính ion nhằm gia tăng điện dung cực cửa. Thời gian gần đây, Z. Liu tuyên bố nghiên cứu thành công OTFT với điện áp $V_{DS} = V_{GS} = -0,7$ V khi sử dụng hỗn hợp PAA/PEG (Polyacrylic Acid/ Poly(Ethylene Glycol)) làm lớp điện môi cực cửa của OFET (Hình 3.4) [89].

Theo một hướng nghiên cứu khác, gần đây một số nhóm đã nỗ lực nghiên cứu sử dụng thêm cực cửa thứ hai gọi là cực cửa thả nổi (floating-gate) bằng kim loại hay electrolyte trong OTFT và nối trực tiếp với điện cực ra của thành phần thụ động [82, 90–93]. Với cấu trúc cảm biến như vậy, điện tích của thành phần thụ động sinh ra do áp lực tác động sẽ nạp trực tiếp cho cực thả nổi và qua đó làm tăng nồng độ hạt dẫn trên kênh dẫn. Ý tưởng này tuy

có thể giúp giảm độ lớn, nhưng vẫn phải cung cấp cho V_{GS} một giá trị nhất định để kênh dẫn được hình thành, chẳng hạn $V_{GS} = -2$ V trong công bố gần đây của S. Lai [90] và các cộng sự Hình 3.5. Trong đó, nhóm tác giả sử dụng cấu trúc OFET với lớp Al_2O_3 6 nm kết hợp Parylene 25 nm được tạo ra trên cực cửa để giảm công suất tiêu thụ cho linh kiện [94].



Hình 3.5: OTFT làm việc ở điện áp thấp khi sử dụng lớp Al_2O_3 6 nm kết hợp Parylene 25 nm (a) [94] và (b) cảm biến sử dụng OTFT với cấu trúc cực cửa thả nổi [90].

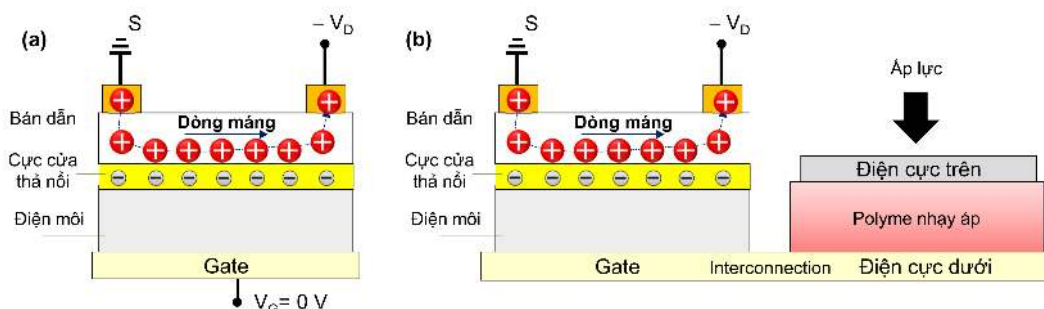
Như vậy, các cảm biến tích cực được đề cập ở trên đều phải chế tạo tích hợp cùng với cảm biến thụ động, vì lớp polymer của cảm biến thụ động chính là một lớp (hoạt động như điện cực thả nổi) trong cấu trúc của OTFT. Nghĩa là việc chế tạo cảm biến đòi hỏi công nghệ chế tạo phức tạp. Xuất phát từ thực tế này, luận án đề xuất giải pháp tận dụng cảm biến thụ động đã được chế tạo thành công với quy trình ép nhiệt đơn giản kết nối kiểu dây dẫn với OTFT cũng được sản xuất riêng biệt.

Xét ở góc độ OTFT, bằng việc sử dụng OTFT thường mở như các nghiên cứu đã có thì các cảm biến tích cực đã nâng cao được hiệu năng nhưng phải trả giá bởi công suất tiêu thụ lớn do điện áp điều khiển cực cửa lớn. Do đó, nên sử dụng OTFT thường đóng để có thể hoạt động ngay cả khi điện áp cực

cửa bằng $0V$ như thể hiện trên Hình 3.1(b). Vấn đề lớn nhất trong việc sử dụng OTFT thường đóng là việc mạch tiêu thụ công suất ngay cả khi chưa có tín hiệu điều khiển hoàn toàn có thể được giải quyết bằng cách cấp nguồn xung cho điện cực máng chỉ khi cảm biến chịu áp lực.

3.2. Cấu trúc cảm biến áp lực dựa trên OTFT thường đóng

Cảm biến áp lực tích cực do luận án đề xuất sử dụng cảm biến áp lực đã có như phần tử thụ động kết nối với cực cửa của OTFT thường đóng như biểu diễn trên Hình 3.6(b).



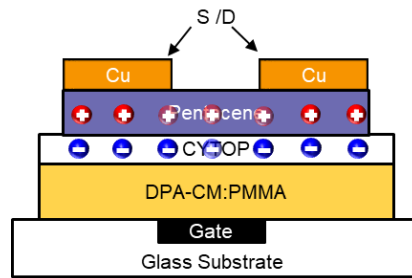
Hình 3.6: (a) Cấu trúc OTFT thường đóng và (b) cảm biến áp lực hữu cơ trên cơ sở OTFT thường đóng.

Trong đó, cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU đóng vai trò làm thành phần thụ động đã được chế tạo trong Chương 2. OTFT thường đóng sẽ được tạo ra bằng cách lập trình thường đóng từ OTFT thường mở như mô tả chi tiết trong phần dưới đây.

3.2.1. Cấu trúc chi tiết của OTFT

Hình 3.7 mô tả cấu trúc OTFT thường đóng với các lớp màng điện môi cực cửa, lớp cực cửa thả nổi, lớp bán dẫn và các điện cực được tạo ra trên tấm nền thủy tinh ITO.

Trong đó, lớp điện môi cực cửa được tạo ra từ hợp chất DPA-CM (6-[4'-



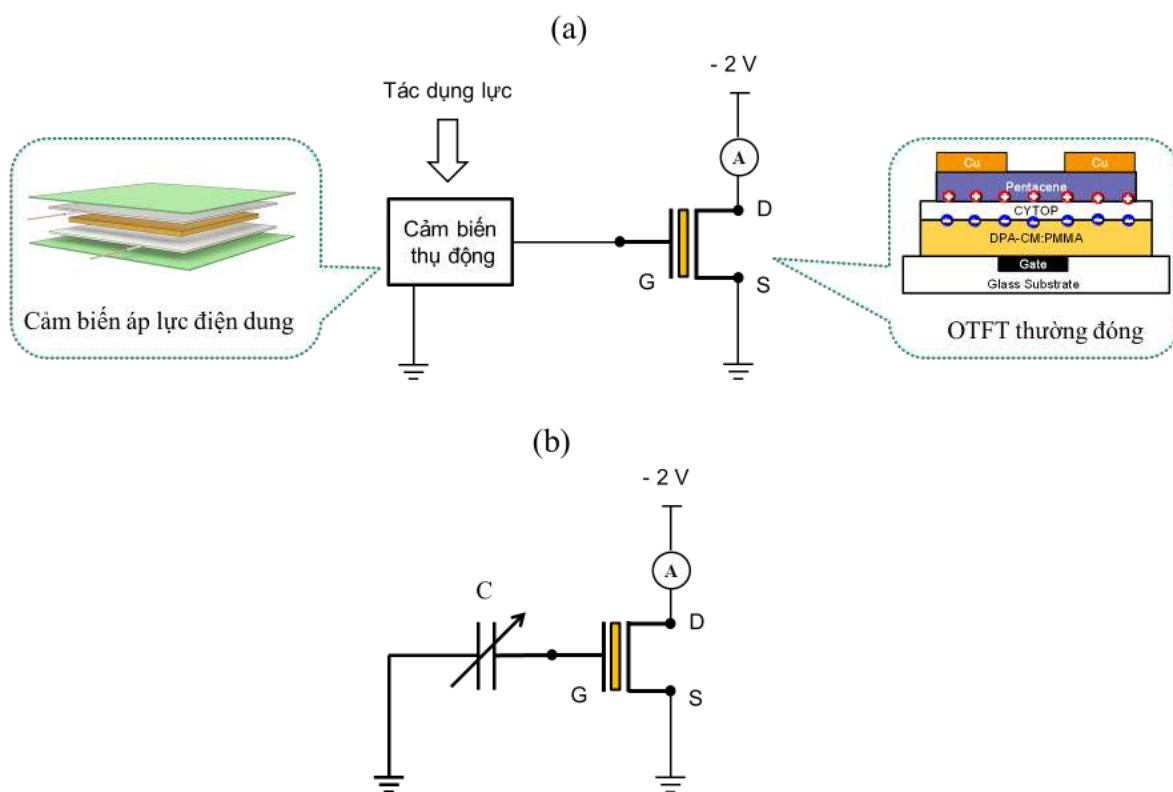
Hình 3.7: Cấu trúc OTFT với cực cửa thả nổi bằng vật liệu hữu cơ Cytrop.

(N,N-diphenylamino)phenyl]-3-ethoxycarbonylcoumarin) và PMMA (Poly-methyl methacrylate). Trong khi đó, lớp màng Cytrop đóng vai trò như một cực cửa thả nổi có tính năng bẫy điện tử. Lớp bán dẫn của OTFT được chọn từ vật liệu Pentacene vì tính phổ biến của bán dẫn trong chế tạo OTFT kênh p. Kim loại đồng được chọn làm vật liệu để làm các điện cực vì giá thành rẻ. Lớp Cytrop hoạt động tương tự như một cực cửa thả nổi sẽ bẫy/giải phóng điện tử nhờ điện áp lập trình bên ngoài.

3.2.2. Cấu trúc chi tiết của cảm biến tích cực

Cảm biến áp lực hữu cơ tích cực được tích hợp trên cơ sở cảm biến áp lực hữu cơ điện dung sử dụng vật liệu PU và OTFT thường đóng như được thể hiện trong Hình 3.8(a).

Hình 3.8(b) thể hiện sơ đồ tương đương của cảm biến áp lực hữu cơ tích cực. Theo đó cảm biến làm việc ở điện áp cung cấp (V_{DS}) thấp và không cần điện áp cực cửa. Dòng điện I_{DS} có mối quan hệ tỉ lệ thuận với điện dung cực cửa của OTFT. Khi có lực tác động, điện dung của thành phần thụ động tăng, làm cho điện dung cực cửa của OTFT tăng lên, dẫn tới dòng điện cực máng I_{DS} của OTFT tăng lên.



Hình 3.8: (a) Cảm biến áp lực hữu cơ trên cơ sở OTFT và (b) sơ đồ tương đương của cảm biến.

3.3. Quy trình chế tạo cảm biến dựa trên OTFT thường đóng

3.3.1. Quy trình chế tạo OTFT

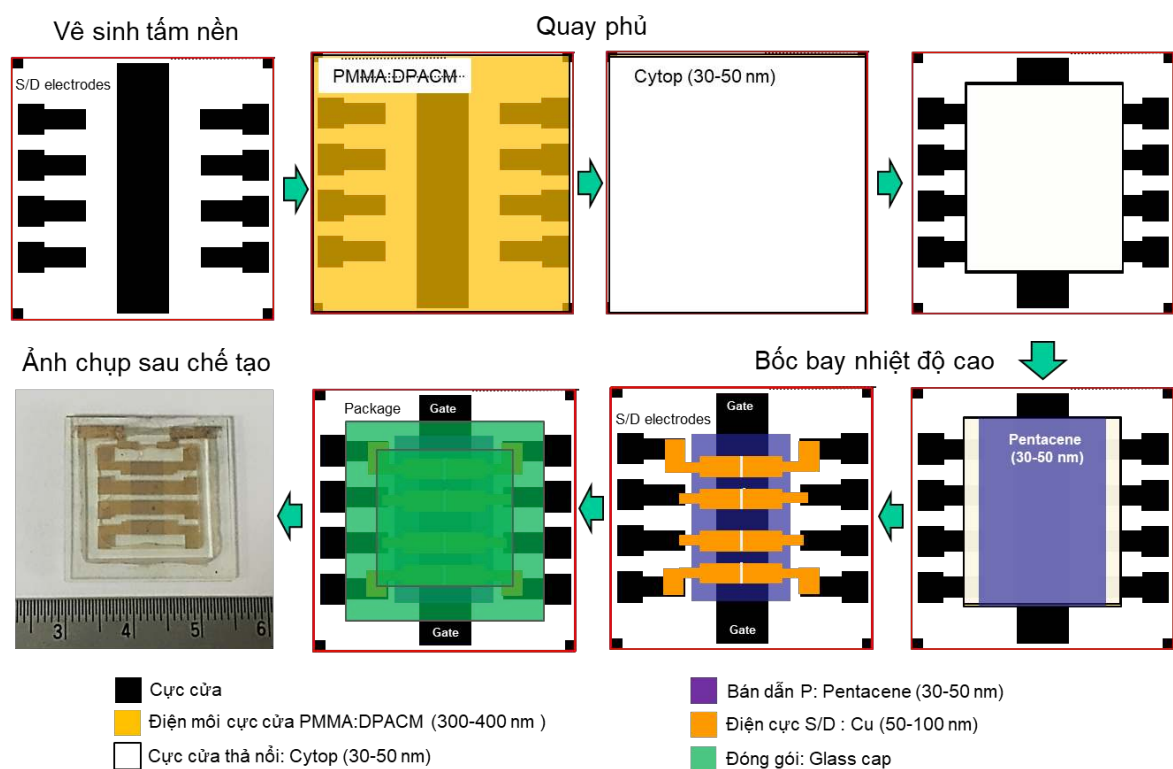
Các bước chế tạo OTFT được thể hiện trên Hình 3.9.

- **Bước 1:** Vệ sinh tấm nền ITO

Tấm nền thủy tinh được mạ điện cực của ITO được vệ sinh bằng dung dịch isopropanol và acetone kết hợp với sóng siêu âm. Sau đó được làm khô để loại bỏ hơi nước trước khi xử lý bằng tia UV kết hợp với Ozon.

- **Bước 2:** Tạo lớp điện môi cực cửa

Các hợp chất hữu cơ DPA-CM và PMMA được hòa tan trong dung dịch chloroform với tỷ lệ phân tử 1:10. Sau đó lớp điện cực cửa được tạo ra trên tấm nền ITO thủy tinh bằng phương pháp quay phủ hợp chất DPA-



Hình 3.9: Mô tả các bước chế tạo OTFT.

CM và PMMA với tốc độ 4000 vòng/phút trong thời gian 1 phút. Sau đó tấm nền IOT được làm nóng ở nhiệt độ 100 °C trong thời gian 60 phút để loại bỏ hơi nước và dung môi còn lại.

- Bước 3: Tạo lớp cực cửa thả nổi

Cytop (CTX-809AP2, Asahi Glass, Japan) được hòa tan trong dung dịch fluoro carbon với tỷ lệ 0,5 khối lượng phần trăm dung dịch. Lớp màng Cytop được tạo ra bên trên lớp điện môi cực cửa bằng phương pháp quay phủ với tốc độ 2000 vòng/phút trong thời gian 1 phút. Sau đó tấm nền ITO được làm nóng ở nhiệt độ 100 °C trong thời gian 60 phút để loại bỏ hơi nước và dung môi còn lại.

- Bước 4: Loại bỏ một phần lớp Cytop và lớp điện môi cực cửa

Lớp Cytop và lớp điện môi cực cửa DPA-CM:PMMA được loại bỏ một

phần trên bề mặt của tấm nền ITO, tại các vị trí của điện cực S/D/G.

- Bước 5: Tạo lớp bán dẫn Pentacene

Lớp màng 30 nm bán dẫn pentacene được tạo ra trên bề mặt lớp Cytop bằng phương pháp bốc bay nhiệt độ cao với tốc độ bốc bay 0,02 nm/s ở áp suất 2×10^{-6} Torr.

- Bước 6: Tạo lớp điện cực S/D

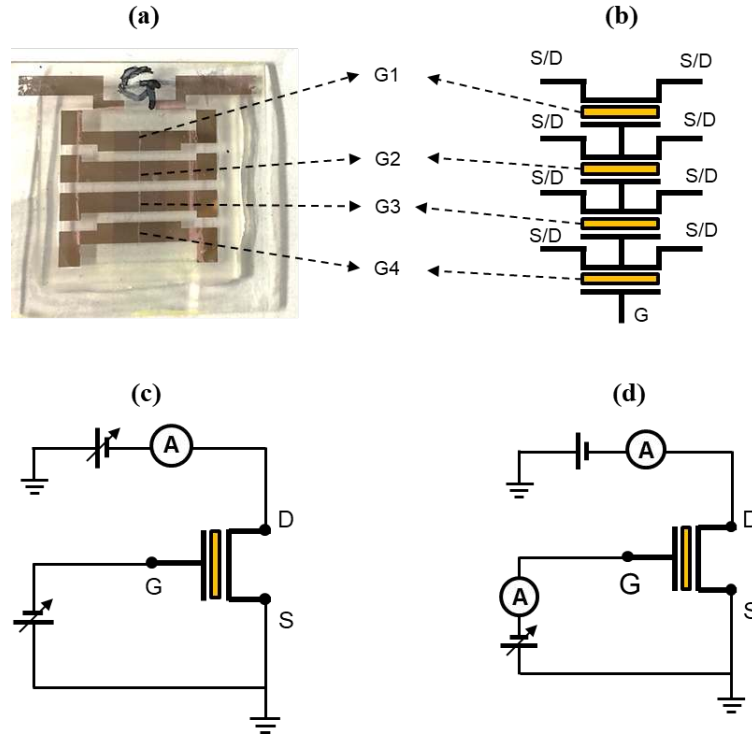
Các điện cực S/D được tạo ra bằng phương pháp bốc bay kim loại đồng (Cu) nhiệt độ cao với tốc độ 0,1 nm/s tại áp suất 5×10^{-6} Torr qua mặt nạ. Độ dài (L) và độ rộng kênh (W) tương ứng là 50 và 2000 μm .

- Bước 7: Đóng gói

Cuối cùng, để bảo vệ OTFT khỏi các tác động của oxy và nước trong không khí cũng như các tác động vật lý khác, OTFT được đóng gói bằng glasscap sử dụng keo dán chuyên dụng. Quá trình đóng gói được thực hiện trong buồng ni-tơ để tránh ảnh hưởng của các yếu tố môi trường tới bán dẫn hữu cơ.

Sau khi chế tạo, các OTFT được kiểm tra đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt sử dụng hệ thống đo, kiểm tra SCS4200 (Keithley, USA). Các dữ liệu kiểm tra đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt được sử dụng để ước lượng độ linh động điện tử và điện áp ngưỡng của OTFT. Hình 3.10 thể hiện hình ảnh của OTFT và sơ đồ mạch tương đương của bốn OTFT cũng như sơ đồ kiểm tra đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt của OTFT.

Đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt của OTFT được thể hiện trên Hình 3.11. Đối với đặc tuyến ra, như được thể hiện trên Hình 3.11(a), dòng điện cực máng I_{DS} tăng theo chiều tăng của điện áp cực của V_{GS} . Tại vùng tuyến

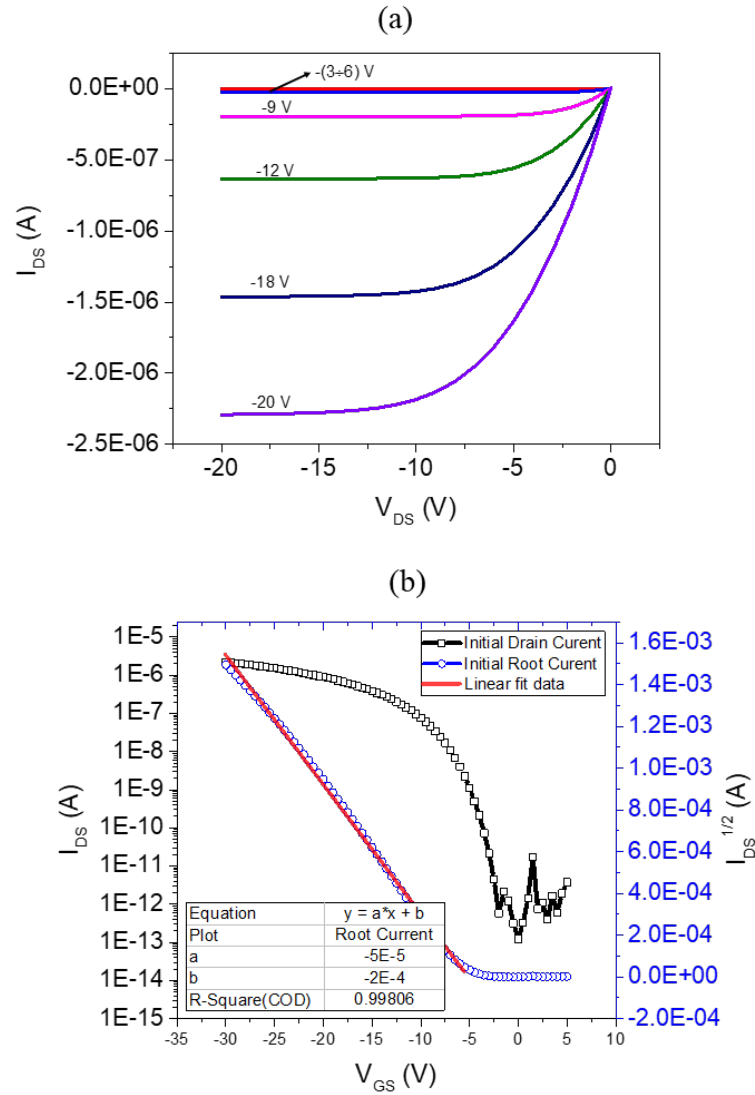


Hình 3.10: Hình ảnh của OTFT sau khi chế tạo (a), sơ đồ tương đương của bốn OFET (b), sơ đồ kiểm tra đặc tuyến ra (c) và đặc tuyến truyền đạt (d).

tính, giá trị I_{DS} tăng tuyến tính theo V_{GS} chứng tỏ rằng điện trở tiếp xúc tốt giữa các lớp bán dẫn pentacene, điện cực S/D cũng như điện cực cửa. Sau đó I_{DS} tiến tới trạng thái bão hòa theo chiều tăng của V_{GS} . Đây là đặc tuyến điển hình của OTFT kênh P.

Đường cong với biểu tượng hình vuông trên Hình 3.11(b) thể hiện đặc tuyến truyền đạt của OTFT. Tại điện áp $V_{GS}=0$ V, OTFT ở trạng thái mở (ngắt) với dòng I_{DS} vào khoảng -10^{-13} A. Để OTFT chuyển trạng thái đóng (dẫn), cần cung cấp điện áp cực cửa $V_{GS} = -20$ V, khi đó dòng I_{DS} có giá trị bằng khoảng -10^{-6} A. Bên cạnh đó, đường cong với biểu tượng hình tròn thể hiện giá trị $\sqrt{I_{DS}}$ cũng được thể hiện để thực hiện ước lượng giá trị độ linh động điện tử μ , và điện áp ngưỡng V_{Th} của transistor.

Về mặt lý thuyết, cũng giống với MOSFET silic (vô cơ), mối quan hệ giữa



Hình 3.11: Đặc tuyến ra (a) và đặc tuyến truyền đạt (b) của OTFT.

dòng I_{DS} và điện áp V_{GS} được thể hiện theo công thức [83, 95]:

- Ở chế độ tuyến tính, với $V_{DS} < (V_{GS} - V_{Th})$:

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_G \left(\frac{W}{L} \right) [2(V_{GS} - V_{Th})V_{DS} - V_{DS}^2]. \quad (3.1)$$

- Ở chế độ bão hòa, với $V_{DS} > (V_{GS} - V_{Th})$:

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_G \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{Th})^2; \quad (3.2)$$

Trong đó W và L là độ rộng và độ dài kênh của transistor; C_G là giá trị điện dung lớp điện môi cực cửa/đơn vị diện tích. Giá trị C_G được đo bằng máy đo LCR meter (Hioki 3522-50, Japan) có giá trị là 14 pF/mm².

Bằng cách lấy căn bậc 2, công thức (3.2) có thể được viết thành:

$$\sqrt{I_{DS}} = \sqrt{\frac{1}{2}\mu C_G \left(\frac{W}{L}\right)} \times V_{GS} - \sqrt{\frac{1}{2}\mu C_G \left(\frac{W}{L}\right)} \times V_{Th} \quad (3.3)$$

Công thức (3.3) có dạng phương trình bậc nhất biểu diễn mối quan hệ giữa $\sqrt{I_{DS}}$ và V_{GS} :

$$y = a \times x + b \quad (3.4)$$

Trong đó:

$$y = \sqrt{I_{DS}}; x = V_{GS}; a = \sqrt{\frac{1}{2}\mu C_G \left(\frac{W}{L}\right)}; b = \sqrt{\frac{1}{2}\mu C_G \left(\frac{W}{L}\right)} \times V_{Th} \quad (3.5)$$

Đồ thị thể hiện mối quan hệ giữa $\sqrt{I_{DS}}$ và V_{GS} được thể hiện trên Hình 3.11(b) dựa trên kết quả khảo sát đặc tuyến truyền đạt. Bên cạnh đó, đường thẳng (màu đỏ) được xây dựng từ các kết quả thực nghiệm sử dụng phần mềm OriginLab với độ chính xác 99,81 %. Vì vậy công thức (3.4) có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$y = -5 \times 10^{-5}x - 2 \times 10^{-4} \quad (3.6)$$

Từ công thức (3.5) và (3.6), cùng với các tham số đã biết của transistor W , L và C_G độ linh động điện tử μ và điện áp ngưỡng V_{Th} của OTFT được tính toán tương ứng là 0,893 cm²/Vs và -4 V.

Bảng 3.1 thể hiện các tham số của transistor sau khi chế tạo. OTFT có độ linh động điện tử cao và điện áp ngưỡng thấp có thể so sánh với các công

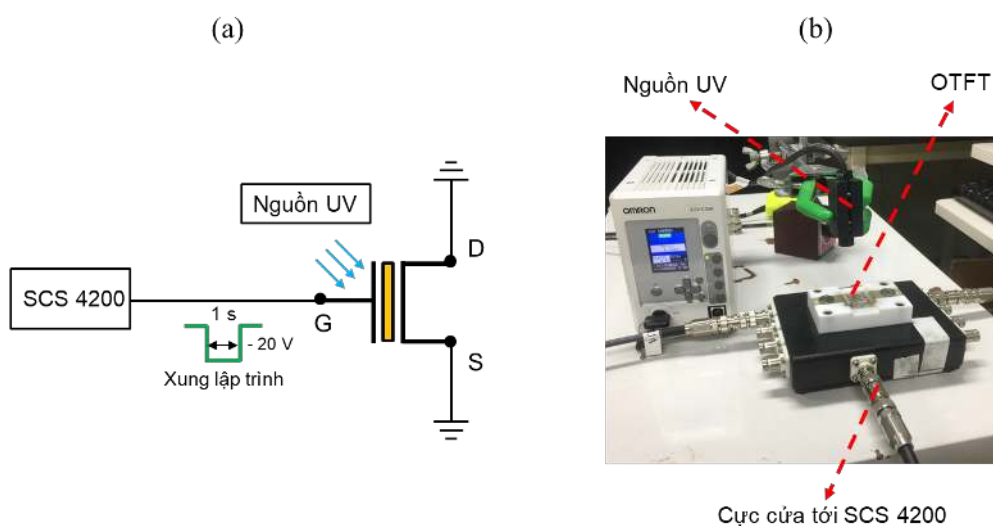
trình nghiên cứu gần đây [81], [96] có giá trị tương ứng là $0,09 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ và $1,5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

Bảng 3.1: Các tham số kỹ thuật của OTFT

Tham số	Đơn vị đo	Giá trị	Ghi chú
W	μm	2000	Tham số thiết kế
L	μm	50	
C_G	nF/cm^2	140	
μ	cm^2/Vs	0,893	Tham số tính toán
V_{Th}	V	-4	
I_{on}/I_{off}	-	10^{-7}	

3.3.2. Thiết lập OTFT sang trạng thái thường đóng

Như được thể hiện trên đặc tuyến truyền đạt ở Hình 3.11(b), sau khi chế tạo OTFT ở trạng thái thường mở. Để chuyển transistor sang trạng thái thường đóng, cần thực hiện bước lập trình trạng thái thường đóng cho OTFT.

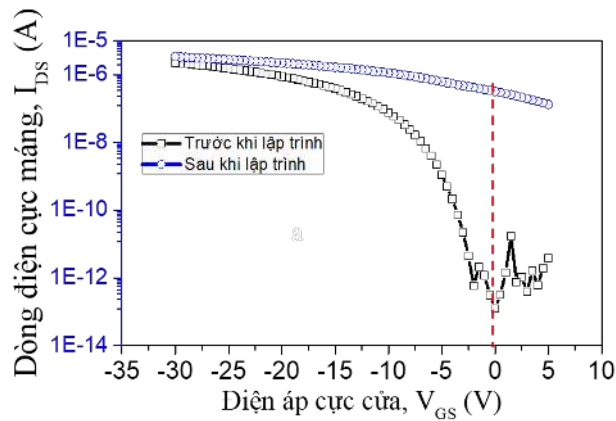


Hình 3.12: Lập trình thường đóng cho OTFT (a) và hình ảnh của bước lập trình (b).

Hình 3.12 mô tả sơ đồ khối quá trình lập trình trạng thái thường đóng cho OTFT và hình ảnh thực tế của bước lập trình. Một xung lập trình có biên

độ -20 V độ rộng xung 1 s được cấp tới cực cửa trong khi OTFT được chiếu bởi tia UV. Tia UV có bước sóng $\lambda = 365$ nm được tạo ra từ nguồn phát Omron ZUV và được đặt ở mức công suất $8,8$ mW/cm².

Dưới tác dụng của điện áp lập trình và tia UV, các quang điện tử được tạo từ các phân tử DPA-CM. Các điện tử này sẽ được bẫy ở mặt tiếp giáp giữa lớp DPA-CM:PMMA và lớp Cytop, khi mật độ các điện tử đủ lớn để hút các lỗ trống từ các điện cực vào lớp bán dẫn pentacene để tạo thành kênh dẫn. Khi đó OTFT sẽ chuyển sang trạng thái đóng mà không cần cấp điện áp V_{GS} . Để kiểm tra lập luận trên đây, đặc tuyến truyền đạt của OTFT sau khi lập trình trạng thái thường đóng đã được kiểm tra và thể hiện trên Hình 3.13.



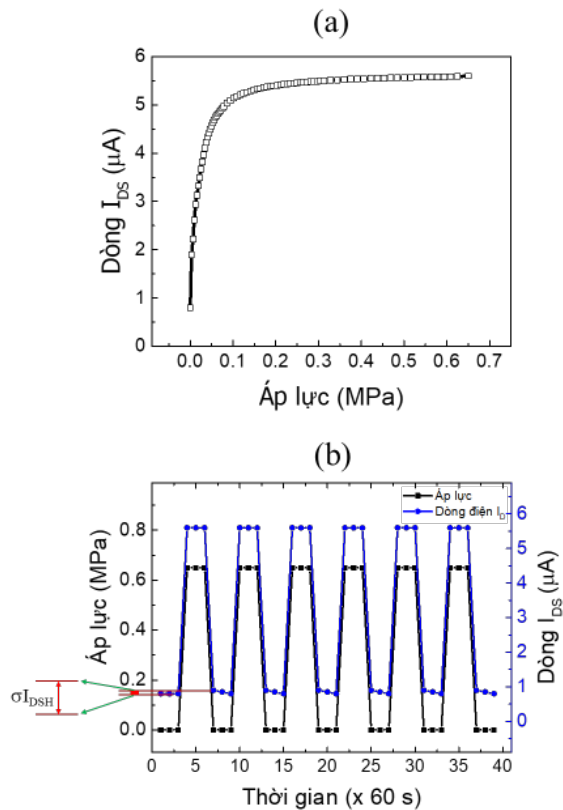
Hình 3.13: Đặc tuyến truyền đạt của OTFT trước và sau khi lập trình thường đóng.

Sau khi lập trình, OTFT chuyển sang trạng thái thường đóng với dòng điện cực máng I_{DS} của transistor ở mức -10^{-6} A tại giá trị điện áp cực cửa $V_{GS}=0$ V. OTFT thường đóng được phát triển sẽ giúp giảm công suất tiêu thụ của linh kiện cũng như giảm độ phức tạp về phần cứng vì không cần nguồn cung cấp cho cực cửa.

3.4. Đánh giá tham số của cảm biến áp lực hữu cơ dựa trên OTFT thường đóng

Quá trình đánh giá tham số của cảm biến áp lực hữu cơ tích cực sử dụng thiết bị nén thủy lực UH- 500 kN để tạo lực thử nghiệm, thiết bị đo dòng Fluke 87V được sử dụng để đo dòng điện I_{DS} của cảm biến.

Đặc tuyến và độ lặp lại của cảm biến khảo sát được thể hiện trên Hình 3.14. Đặc tuyến của cảm biến tích cực Hình 3.14(a) có dạng gần tương đồng với đặc tuyến của thành phần thụ động được thể hiện trên Hình 2.8(a).



Hình 3.14: (a) Đặc tuyến cảm biến tích cực sử dụng OTFT và (b) kết quả thử nghiệm đáp ứng của cảm biến đối với các áp lực lặp lại tại $p = 0,65$ MPa.

Độ nhạy của cảm biến áp lực được tính theo dòng điện cực máng I_D :

$$S = \frac{\delta(\Delta I_{DS}/I_{DS0})}{\Delta P} \quad (3.7)$$

Theo kết quả thử nghiệm, độ thay đổi dòng điện hiệu quả của cảm biến:

$$\frac{\delta I_{DS}}{I_{DS0}} = \frac{I_{DSMax} - I_{DS0}}{I_{DS0}} = \frac{5,6 - 0,8}{0,8} = 6 \quad (3.8)$$

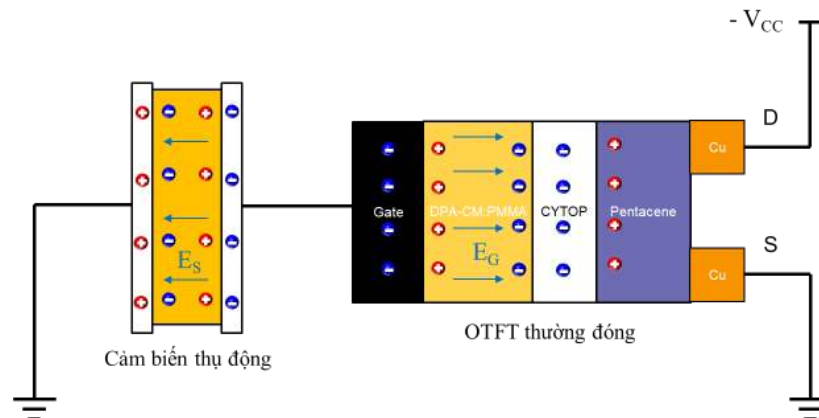
Giá trị này là lớn hơn đáng kể so với độ thay đổi điện dung hiệu quả của thành phần thụ động $\frac{C_{Max}-C_0}{C_0} = 1,070$ (theo công thức (2.1)). Do đó, độ nhạy của cảm biến tích cực được cải thiện đáng kể so với thành phần thụ động.

Bên cạnh đó, độ trễ của cảm biến cũng được cải thiện đáng kể, cụ thể độ trễ cảm biến tính toán dựa trên kết quả thử nghiệm (Hình 3.14b) như sau:

$$\frac{\sigma I_{DSH}}{I_{DSMax}} = \frac{0,9 - 0,8}{5,6} = 1,8\% \quad (3.9)$$

Với σI_{DSH} là hiệu số giữa I_{DS} sau chu kỳ áp lực thứ nhất với I_{DS0} (Hình 3.14b).

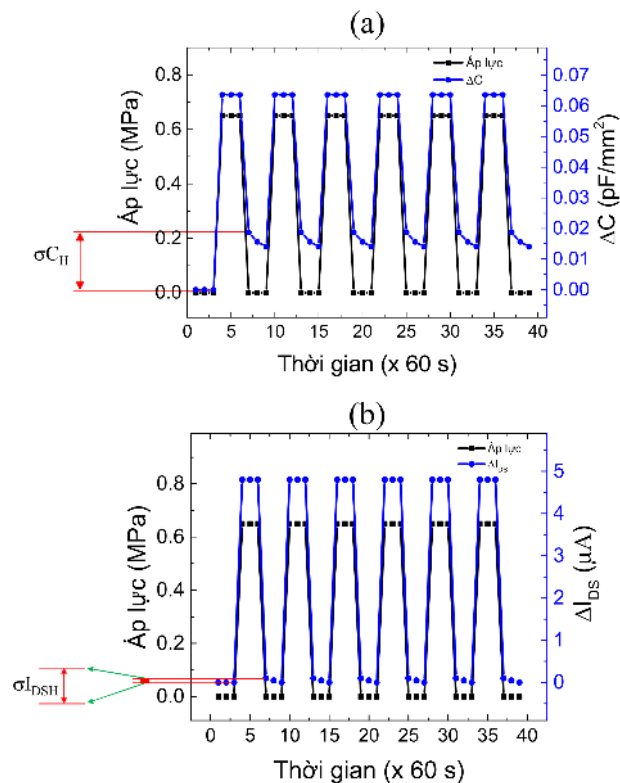
Nguyên lý làm việc của cảm biến tích cực có thể được giải thích cơ bản dựa trên sơ đồ biểu diễn sự phân bố điện tích và điện trường của cảm biến Hình 3.15.



Hình 3.15: Sơ đồ mô tả sự phân bố điện tích và điện trường của cảm biến tích cực.

Theo đó, khi được kết nối với nguồn, cảm biến có sự phân bố điện tích trên thành phần thụ động và các lớp của OTFT thường đóng như được thể hiện trên Hình 3.15. Đồng thời, các điện trường \vec{E}_S và \vec{E}_G được tạo ra bên trong thành phần thụ động và bên trong lớp điện môi cực cửa. Khi có lực tác dụng, điện tích của cảm biến thụ động thay đổi làm cho điện trường \vec{E}_S thay đổi, dẫn tới cường độ điện trường tổng $\vec{E}_{td} = \vec{E}_S + \vec{E}_G$ thay đổi theo lực tác dụng. Điện trường \vec{E}_{td} thay đổi dẫn tới thay đổi mật độ các lỗ trống tạo thành kênh dẫn bên trong lớp bán dẫn pentacene, làm thay đổi dòng điện đầu ra I_{DS} của OTFT.

Khi kết hợp với OTFT, độ trễ của cảm biến được cải thiện đáng kể, Hình 3.16.



Hình 3.16: So sánh độ trễ cảm biến: (a) Đáp ứng cảm biến thụ động với độ trễ 7,7 % và (b) đáp ứng cảm biến khi kết hợp với OTFT với độ trễ 1,8 %.

Các tham số của cảm biến thụ động và cảm biến sử dụng OTFT được trình bày tại Bảng 3.2.

Bảng 3.2: Các tham số cơ bản của cảm biến thụ động và cảm biến tích cực

Tham số cảm biến		Cảm biến thụ động	Cảm biến tích cực (TP thụ động+OTFT)
Độ nhạy kPa ⁻¹	(0-3) kPa	8×10^{-2}	35×10^{-2}
	(3-30) kPa	$2,42 \times 10^{-2}$	12×10^{-2}
	(30-200) kPa	$2,98 \times 10^{-3}$	16×10^{-3}
	(0,2-0,65) MPa	$1,18 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-4}$
Trễ cảm biến, %		7,7	1,8
Diện tích, cm²		(7×7)	(7×7)
Điện áp làm việc, V		5	2
Công suất tiêu thụ		0,42 W	$11,2 \times 10^{-6} \text{W}$

Như được thể hiện trên Bảng 3.2, độ nhạy của cảm biến tăng lên từ 4 đến 5 lần sử dụng kết hợp với OTFT đặc biệt là ở đầu dải áp lực. Độ trễ cảm biến giảm xuống từ 7,7 % xuống còn 1,8 %. Trong khi đó, với điện áp làm việc thấp và không cần điện áp cực cửa, công suất tiêu thụ lớn nhất của cảm biến ở mức thấp vào $11,2 \times 10^{-6} \text{ W}$. Tuy nhiên, công suất tiêu thụ thấp cũng làm tăng thêm độ phức tạp đối với thiết bị đọc tín hiệu của cảm biến (dòng điện cỡ μA).

Bảng 3.3 so sánh các tham số cảm biến tích cực với một số công trình nghiên cứu tiêu biểu gần đây. Theo đó, cảm biến phát triển bởi luận án có độ nhạy ở mức tương đương có thể so sánh được với các cảm biến gần đây trong Bảng 3.3. Ưu điểm của cảm biến tích cực theo đề xuất của luận án mang lại những cải thiện: Dải áp lực làm việc rộng, diện tích lớn, điện áp làm việc thấp và công suất tiêu thụ nhỏ.

Bảng 3.3: So sánh kết quả đánh giá của cảm biến dựa trên OTFT thường đóng với một số nghiên cứu gần đây

STT	Vật liệu bán dẫn/ Diện tích cảm biến	Độ linh động (cm^2/Vs)	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Điện áp làm việc	Tham khảo, năm
1	PiI2T-Si 1 cm^2	2,45	(0-60) kPa	8,4 kPa^{-1}	V_{GS} : -200 V V_{DS} : -200 V	[81] 2013
2	Rubrene 64 mm^2	1	(0-20) kPa	0,55 kPa^{-1}	V_{GS} : -80 V V_{DS} : -20 V	[34] 2010
3	PDPP3T (1×2) mm^2	0,34	(0-20) kPa	192 kPa^{-1}	V_{GS} : -60 V V_{DS} : -60 V	[82] 2015
4	Pentacene 1 cm^2	0,028	(0-300) Pa	20 mN	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[91] 2016
5	PIDT-BT:TCNQ 49 mm^2	NA	10 kPa	17,95 kPa^{-1}	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[83] 2019
6	DNTT (5×5) mm^2	0,56	360 kPa	$2,2 \times 10^{-4}$ kPa^{-1}	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[97] 2018
7	Graphene (0,6×0,6) mm^2	212	3 MPa	0,205 kPa^{-1}	V_{GS} : 25 V V_{DS} : 0,1 V	[62] 2018
8	Pentacene (7×7) cm^2	0,893	0,65 MPa	0,35 kPa^{-1}	V_{GS} : 0 V V_{DS} : -2 V	Luận án này

Xét công suất tiêu thụ của cảm biến sử dụng OTFT, vì $I_{GS} \ll I_{DS}$ nên có thể bỏ qua dòng I_{GS} , khi đó công suất tiêu thụ của cảm biến chủ yếu được tính qua dòng I_{DS} . Công suất tiêu thụ lớn nhất của cảm biến được tính dựa trên dòng I_{DS} và điện áp V_{DS} , theo đó, cảm biến phát triển bởi luận án có điện áp làm việc nhỏ, công suất thấp ở mức tương đương, có thể so sánh được với các công trình nghiên cứu về cảm biến công suất thấp và được thể hiện trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4: Công suất tiêu thụ của cảm biến dựa trên OTFT thường đóng so với các công trình nghiên cứu gần đây.

	[91]	[83]	[97]	[62]	Luận án này
I_{DS-Max} (A)	8×10^{-8}	3×10^{-5}	3×10^{-6}	80×10^{-6}	$5,6 \times 10^{-6}$
V_{DS} (V)	2	2	2	0,15	2
Công suất tiêu thụ (W)	16×10^{-8}	6×10^{-5}	6×10^{-6}	2×10^{-6}	$13,2 \times 10^{-6}$

3.5. Kết luận chương

Cảm biến tích cực do sử dụng transistor khuếch đại tín hiệu nhận được nên có hiệu năng tốt hơn so với cảm biến thụ động nhưng khi đó cảm biến lại tiêu thụ công suất. Với đặc tuyến của vật liệu bán dẫn hữu cơ là không có sẵn hạt dẫn nên các OTFT khi đó đều là loại thường mở, nghĩa là cần điện áp cực cửa khá lớn để tạo kênh dẫn. Điều này có nghĩa mục đích tăng hiệu năng bằng cách sử dụng OTFT thường mở sẽ bị trả giá bởi việc sử dụng điện áp cao và tiêu thụ công suất lớn.

Để giải quyết thách thức trên, luận án đề xuất kết hợp cảm biến thụ động với OTFT thường đóng để mạch có thể làm việc ngay cả khi không có điện áp tại cực cửa. Cấu trúc OTFT mà luận án thực hiện là loại sử dụng lớp Cytop làm cực cửa thả nổi, sau khi chế tạo và đo kiểm tham số, OTFT này được cấp điện áp -20 V và chiếu tia UV vào cực cửa để OTFT trở thành loại thường đóng.

Cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU kết hợp với OTFT thường đóng đã được chứng minh cải thiện đáng kể về độ nhạy từ $1,18 \times 10^{-4}$ lên $6,5 \times 10^{-4}$ kPa $^{-1}$ và độ trễ cảm biến giảm từ 7,7 % xuống còn 1,8 %. Đồng thời, với trạng thái thường đóng, cảm biến tích cực có công suất tiêu thụ thấp ở mức ($11,2 \times 10^{-6}$ W) và làm việc ở chế độ bão hòa mà không cần thiên

áp cực cửa ($V_{GS} = 0 \text{ V}$, $V_{DS} = -2 \text{ V}$).

Với các tham số đã đạt được và ưu thế về việc không sử dụng điện áp điều khiển lớn cảm biến hữu cơ tích cực mà luận án phát triển hoàn toàn có thể ứng dụng trong các nút IoT. Tuy nhiên, do thời gian có hạn nên tại thời điểm này, luận án mới chỉ triển khai ứng dụng cho cảm biến thụ động mà sẽ trình bày trong Chương 4. Việc đưa cảm biến tích cực vào hệ thống ứng dụng thực tế sẽ được tiếp tục thực hiện trong thời gian sắp tới.

Chương 4

XÂY DỰNG VÀ THỬ NGHIỆM ỨNG DỤNG NÚT IoT VỚI CẢM BIẾN ÁP LỰC

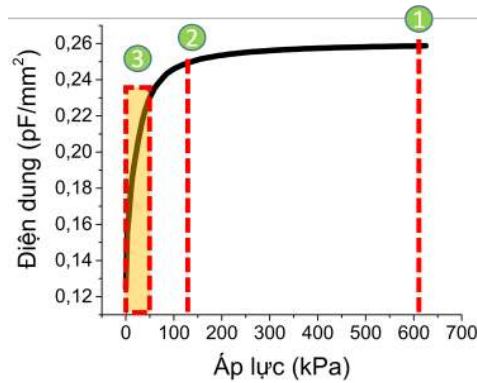
Nội dung chương này trình bày quá trình xây dựng và thử nghiệm ba nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ ứng dụng trong hệ thống giám sát, phát hiện chuyển động của xe ô tô; hệ thống tự động theo dõi chuyển động bước chân và hệ thống theo dõi tình trạng các công trình xây dựng. Nút IoT thu thập dữ liệu thông qua cảm biến áp lực hữu cơ màng mỏng PU, truyền dẫn vô tuyến tới người sử dụng và hiển thị trên điện thoại thông minh/máy tính bảng theo thời gian thực hoặc truyền về trang web hệ thống để lưu trữ và phát triển các công cụ quản trị dữ liệu. Các kết quả thử nghiệm trên hệ thống thực tế sẽ là minh chứng quan trọng nhằm đánh giá chất lượng cũng như hoàn thiện quá trình thiết kế chế tạo cảm biến.

Các kết quả của chương 4 được thể hiện trong *Công trình nghiên cứu J3, C1, C3 và P1*.

4.1. Xây dựng nút IoT

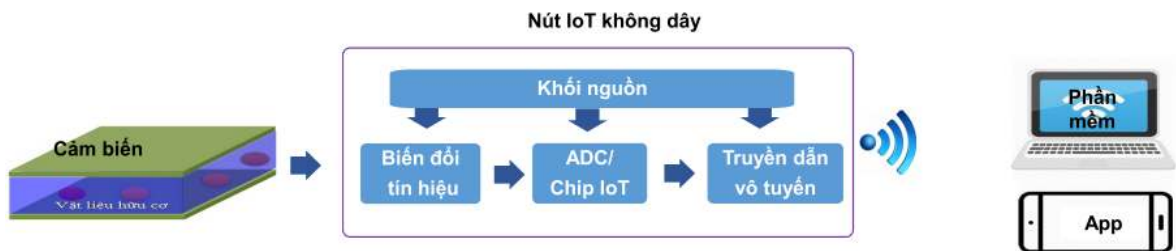
Theo đặc tuyến cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng PU đã được khảo sát ở trong chương 2, ở dải đầu đặc tuyến với độ nhạy cao, cảm biến có thể được sử dụng như một cảm biến biến dạng ứng dụng trong theo dõi công trình xây dựng. Hơn nữa, cảm biến còn có dải làm việc rộng phù hợp với mức áp lực của bàn chân người hoặc bánh xe ô tô trên đường ở mức 140 kPa [98]

và 0,6 MPa [33] như được thể hiện trên Hình 4.1.



Hình 4.1: Các mức áp lực: (1) áp lực của bánh xe ô tô, (2) áp lực của bàn chân người, (3) áp lực biến dạng của dầm bê tông.

Trên cơ sở cấu trúc nút IoT Hình 1.2 và để phù hợp với xu hướng không dây hiện nay, nút IoT không dây được xây dựng để phát triển các ứng dụng của cảm biến với sơ đồ khối chức năng được thể hiện trên Hình 4.2, trong đó sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ thụ động được phát triển trong Chương 2.



Hình 4.2: Cấu trúc nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ.

Tín hiệu nhận được từ cảm biến được biến đổi thành tín hiệu dạng chuỗi xung. Tín hiệu sau khi được số hóa tại ADC được xử lý tại chip IoT. Tín hiệu được truyền dẫn vô tuyến tới người sử dụng và hiển thị trên điện thoại thông minh/máy tính bảng theo thời gian thực. Hơn nữa các dữ liệu cảm biến có thể truyền về trang web hệ thống để lưu trữ hoặc phát triển các công cụ quản trị dữ liệu.

4.2. Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động của ô tô

Giới thiệu

Giám sát sự chuyển động của xe ô tô là bước quan trọng trong hệ thống giao thông thông minh (ITS). Thông qua quá trình giám sát, hệ thống sẽ thu thập các thông tin như vận tốc, trọng tải và mật độ xe ô tô để đưa ra các cảnh báo, chỉ dẫn nhằm đảm bảo giao thông thông suốt và hạn chế tai nạn giao thông.

Như đã được đề cập trong chương 1, các cảm biến xâm lấn và không xâm lấn đang được sử dụng tại các nút IoT giao thông nhằm thu thập các thông tin chuyển động của ô tô trong hệ thống ITS [21]. Tuy nhiên, những hạn chế của các loại cảm biến này có thể ảnh hưởng tới khả năng ứng dụng chúng. Các cảm biến sử dụng vòng dây kim loại [99, 100] khi triển khai dưới nền đường sẽ phải can thiệp vào phần lớn diện tích mặt đường. Hoặc đối với các cảm biến từ trường [65, 101, 102] ngoài việc xâm lấn tới mặt đường thì vấn đề xử lý tín hiệu từ trường nhận được từ cảm biến còn khá phức tạp. Bên cạnh đó tín hiệu nhận được từ cảm biến từ trường còn có hiện tượng xuyên nhiễu từ các xe lân cận hoặc các vật thể kim loại khác.

Các cảm biến không xâm lấn như cảm biến laser, cảm biến ảnh, cảm biến nhiệt độ lại dễ bị ảnh hưởng bởi các điều kiện môi trường như mưa, tuyết hoặc bóng của các vật thể khác.

Trong khi đó, những năm gần đây cảm biến áp lực hữu cơ gần đây nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu của cộng đồng khoa học vì những ưu điểm như chi phí sản xuất thấp, tính mềm dẻo cao và có diện tích lớn. Do đó, cảm biến áp lực hữu cơ có tiềm năng to lớn trong phát hiện chuyển động

của ô tô. Với đặc tính mềm dẻo, cảm biến hữu cơ có thể dễ dàng được đặt trên mặt đường. Đặc điểm này giúp quá trình thi công, triển khai cũng như bảo dưỡng hệ thống nhanh gọn, hiệu quả và chi phí thấp. Quan trọng hơn, cảm biến áp lực hữu cơ không bị ảnh hưởng bởi các yếu tố gây nhiễu như các cảm biến không xâm lấn đã đề cập ở trên.

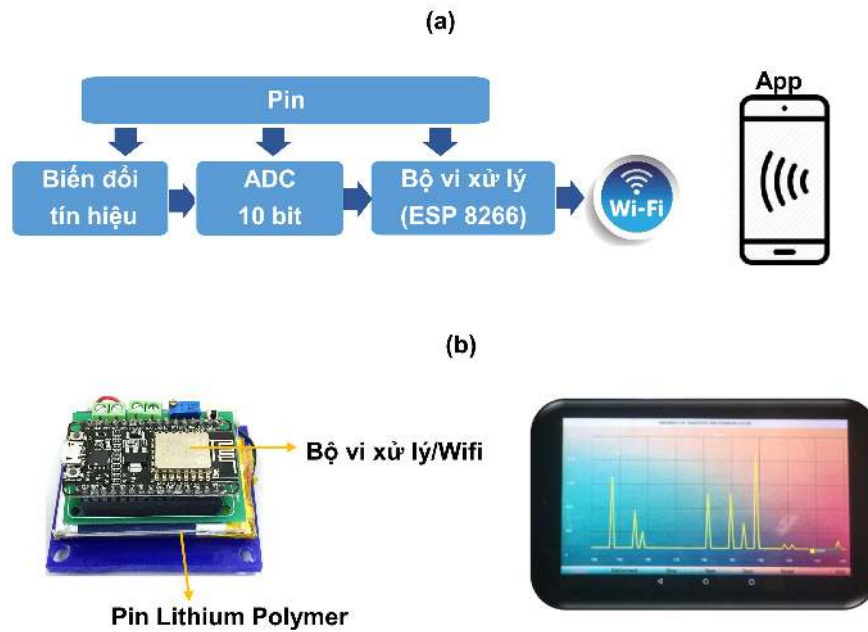
Tuy nhiên, hầu hết các cảm biến áp lực hữu cơ có dải làm việc thấp (dưới 10 kPa) nên không thể áp dụng trong hệ thống ITS. Một số cảm biến có dải áp lực phù hợp [57, 58, 66] thì quá trình gia công chế tạo còn phức tạp. Ví dụ, S. Ding đã chế tạo cảm biến sử dụng các hạt nano niken [57] có dải làm việc lên tới 6,4 MPa, tuy nhiên quy trình chế tạo còn gặp nhiều khó khăn trong việc tạo được mật độ đồng đều của các hạt nano niken. Ở một nghiên cứu khác M. Mohiuddin đã phát triển cảm biến có dải áp lực làm việc lên tới 40 MPa [66]. Tuy nhiên, nghiên cứu này vẫn chưa đánh giá độ mềm dẻo của cảm biến và chưa đưa ra thử nghiệm ứng dụng trong hệ thống ITS.

Do đó, để khắc phục các nhược điểm trên, luận án đề xuất ứng dụng cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng mỏng PU trong việc phát hiện chuyển động của xe ô tô; đồng thời xây dựng nút IoT không dây nhằm thu thập dữ liệu cảm biến, hiển thị và lưu giữ kết quả trên máy tính bảng/điện thoại thông minh.

Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động ô tô

Hệ thống giám sát chuyển động của ô tô được thiết kế bao gồm nút IoT không dây và máy tính bảng được thể hiện trên Hình 4.3.

Theo sơ đồ Hình 4.3, thông tin nhận được từ cảm biến được biến đổi sang dạng tín hiệu phù hợp sau đó được số hóa tại bộ ADC 10 bit. Với mục tiêu thiết kế nút IoT không dây với kích thước nhỏ, công suất thấp, chọn module

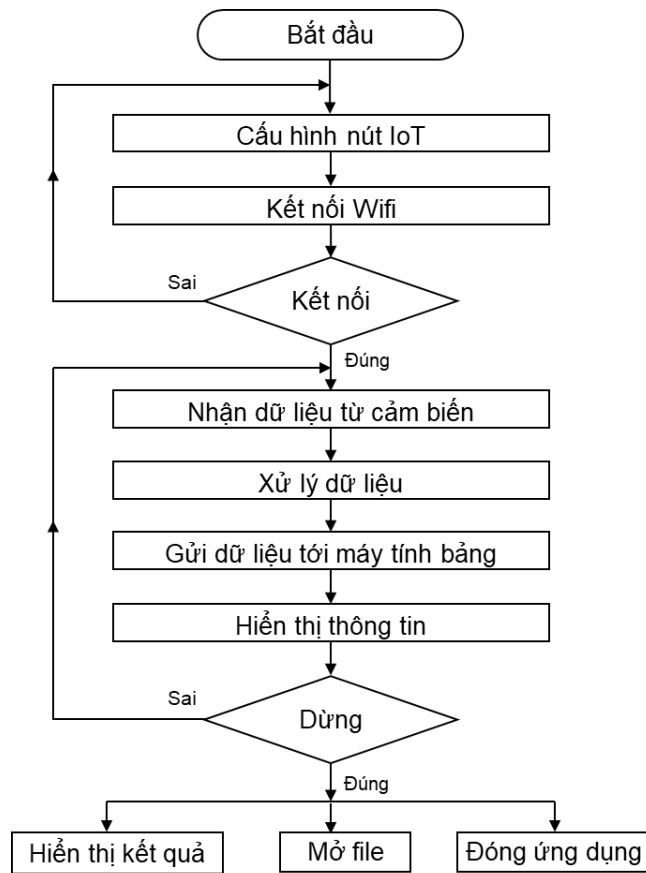


Hình 4.3: (a) Nút IoT không dây thu thập dữ liệu cảm biến và (b) hình ảnh hệ thống.

ESP 8266 được tích hợp chip vi xử lý chuyên dùng cho IoT L106 32-bit RISC và bộ thu phát sóng WiFi theo chuẩn IEEE 802.11 b/g/n. Nút IoT được cấp nguồn bởi pin LiPo 3,7 V có kích thước nhỏ gọn, phù hợp với nút IoT.

Module ESP 8266 có chức năng thu thập dữ liệu cảm biến, xử lý tính toán và gửi thông tin tới máy tính bảng/điện thoại thông minh. Trên máy tính bảng/điện thoại thông minh, phần mềm ứng dụng chạy trên hệ điều hành Android cũng được xây dựng cho phép máy tính bảng lưu trữ, hiển thị thông tin và truy xuất dữ liệu sang định dạng file Excel để tạo dữ liệu phục vụ cho việc phân tích khi cần thiết.

Lưu đồ thuật toán làm việc của hệ thống được thể hiện trên Hình 4.4. Sau khi khởi động hệ thống và chạy phần mềm ứng dụng trên điện thoại thông minh, hệ thống sẽ tự cấu hình nút IoT, thiết lập kết nối WiFi với máy tính bảng/điện thoại thông minh. Khi tín hiệu WiFi được kết nối, tín hiệu nhận được từ cảm biến được tính toán, xử lý tại ESP 8266 và gửi tới phần mềm để



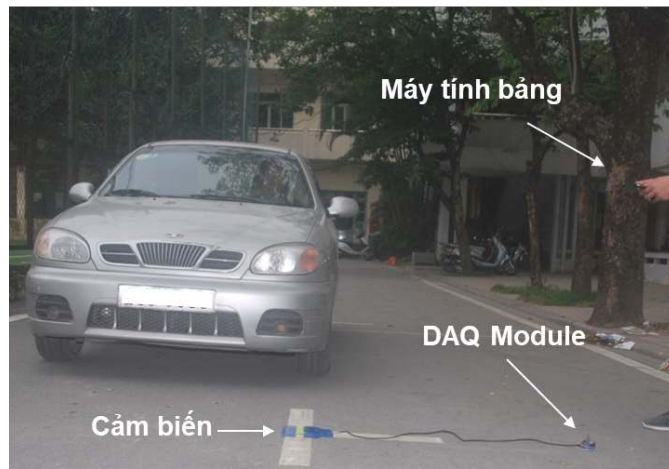
Hình 4.4: Lưu đồ thuật toán làm việc hệ thống giám sát chuyển động của ô tô.

hiển thị lên màn hình điện thoại thông minh/máy tính bảng. Chương trình sẽ dừng lại khi nhận được yêu cầu từ người sử dụng trên phần mềm máy tính bảng. Khi đó, người sử dụng có thể lựa chọn các thực đơn hiển thị, lưu dữ liệu, hoặc truy xuất dữ liệu đã được lưu trước đó.

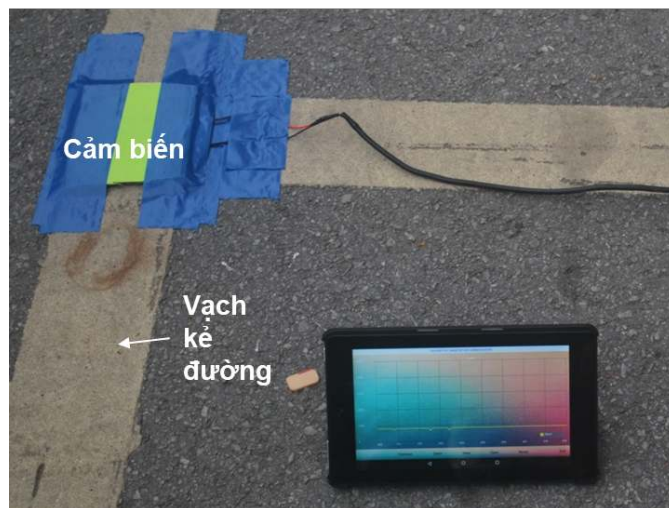
Thử nghiệm nút IoT giám sát chuyển động xe ô tô

Quá trình thử nghiệm nút IoT giám sát chuyển động của xe ô tô được tiến hành như được thể hiện trên Hình 4.5. Theo đó, cảm biến áp lực hữu cơ dễ dàng được triển khai lên mặt đường bằng keo dính thông thường mà không gây tổn hại tới mặt đường như các loại cảm biến xâm lấn. Hơn nữa diện tích cảm biến với kích thước (7×7) cm² là phù hợp với khả năng tiếp xúc với tiết diện bánh xe ô tô.

(a)



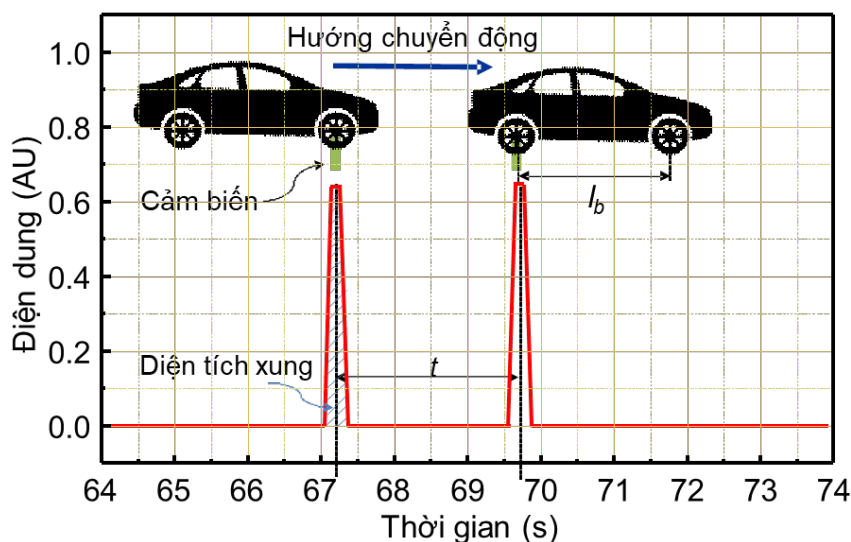
(b)



Hình 4.5: (a) Thử nghiệm nút IoT giám sát chuyển động xe ô tô và (b) cận cảnh cảm biến gắn trên mặt đường và máy tính bảng.

Một xe ô tô con bốn bánh có trọng tải từ 1000 kg tới 1400 kg được sử dụng trong quá trình thử nghiệm. Ô tô được điều khiển chạy qua cảm biến với vận tốc thay đổi từ 0 tới 35 km/h trong các lần thử nghiệm. Vận tốc của xe được giám sát bằng thiết bị kiểm tra vận tốc Stalker Lidar RR. Ở vận tốc nhỏ 2 km/h, vận tốc xe được giám sát kết hợp với tính toán thời gian và quãng đường chuyển động để có kết quả thử nghiệm chính xác nhất.

Hình 4.6 thể hiện các tín hiệu xung nhận được từ cảm biến tương ứng với thời điểm bánh trước và bánh sau của xe chèn qua cảm biến. Dựa vào tín hiệu xung này, để tính toán và ước lượng tốc độ và trọng tải của xe ô tô [58, 103, 104].



Hình 4.6: Tín hiệu xung bánh trước và bánh sau của xe ô tô với vận tốc 5 km/h.

Với các đỉnh xung trên Hình 4.6 tương ứng với vị trí của bánh trước và bánh sau của xe, vận tốc của xe có thể được tính theo công thức [103]:

$$V = \frac{l_b}{t} \quad (4.1)$$

trong đó, l_b là khoảng cách giữa hai trục của bánh trước và bánh sau và t là khoảng thời gian giữa xung thứ nhất và xung thứ hai nhận được tại đầu ra cảm biến (Hình 4.6). Và trọng tải của xe được tính theo công thức [103]:

$$W = V \times A_X \times K_W \quad (4.2)$$

với A_X là diện tích xung (Hình 4.6) và K_W hệ số hiệu chuẩn. Hệ số hiệu chuẩn được xác định bằng cách thử nghiệm xe ô tô với trọng tải đã biết.

Sau nhiều lần thử nghiệm ở các vận tốc khác nhau, kết quả ước lượng (tính

trung bình 5 thử nghiệm với kết quả tốt nhất) vận tốc của xe ô tô với khoảng cách hai bánh xe $l_b=2600$ mm được thể hiện trên Bảng 4.1. Nhìn chung, sai số ước lượng tốc độ của xe ô tô ở mức tương đối tốt (dưới 10 %), với sai số lớn nhất ở vận tốc 30 km/h vào khoảng 10 %.

Ở vận tốc 20 km/h, sai số của hệ thống ở mức tương đương có thể so sánh được với công trình [105] tương ứng là 6,05 % và 5,67 %.

Sai số của hệ thống có thể được cải thiện khi phát triển các thuật toán xử lý sai số cho hệ thống. Tuy nhiên, ở tốc độ 35 km/h tín hiệu xung đầu ra cảm biến không được ghi nhận. Điều này chứng tỏ rằng có thể ở vận tốc càng lớn thì sự biến dạng của cảm biến là càng nhỏ, dẫn tới diện tích xung càng hẹp. Vì vậy có thể kết luận rằng, hệ thống hiện tại có thể phát hiện chuyển động của xe ở vận tốc nhỏ hơn 35 km/h.

Bảng 4.1: Kết quả tính toán vận tốc của xe ô tô và sai số

STT	Vận tốc thực tế (km/h)	Vận tốc tính toán (km/h)	Sai số (%)
1	2	2,02	1,00
2	5	5,13	2,60
3	10	10,35	3,50
4	15	15,61	4,06
5	20	21,21	6,05
6	25	26,79	7,16
7	30	33,25	10,83
8	35	N/A	N/A

Ngoài ứng dụng tính toán vận tốc xe ô tô, cảm biến còn được sử dụng để tính toán trọng tải xe ô tô trong phạm vi từ 1000 kg tới 1400 kg. Theo đó, xe ô tô với trọng tải thay đổi trong khoảng từ 1000 kg tới 1400 kg được điều

khuyến đi qua cảm biến ở vận tốc 5 km/h. Kết quả thử nghiệm tính toán trọng tải xe ô tô được thể hiện trên Bảng 4.2. Kết quả ước lượng trọng tải của xe ô tô có sai số tương đối tốt ở mức nhỏ hơn 0,5 %.

Ở trọng tải 1400 kg, sai số của hệ thống ở mức tương đương có thể so sánh được với công trình [106] tương ứng là 0,33 % và 0,42 %.

Quá trình thử nghiệm gặp nhiều khó khăn vì thiếu các tải trọng mẫu nên trọng tải thử nghiệm bị giới hạn ở mức 1400 kg. Tuy nhiên, với những kết quả thử nghiệm cho thấy, hệ thống cùng với cảm biến có tiềm năng ứng dụng cao trong phát hiện các thông tin về vận tốc và trọng tải của xe ô tô. Do đó, khẳng định cảm biến có tiềm năng ứng dụng to lớn trong phát triển hệ thống giao thông thông minh.

Bảng 4.2: Kết quả tính toán trọng tải của xe ô tô tại $v = 5$ km/h và sai số

STT	Trọng tải thực tế (kg)	Trọng tải tính toán (kg)	Sai số (%)
1	1000	999,51	0,049
2	1050	1048,45	0,15
3	1100	1104,05	0,37
4	1200	1205,46	0,46
5	1300	1296,15	0,30
6	1400	1404,56	0,33

Nhận xét

Hệ thống theo dõi chuyển động của xe ô tô được xây dựng nhờ nút IoT không dây thu thập dữ liệu cảm biến áp lực hữu cơ, hiển thị thông tin lên điện thoại thông minh/máy tính bảng. Phần mềm ứng dụng hiển thị và lưu thông tin trên điện thoại thông minh/máy tính bảng chạy hệ điều hành Android

cũng được phát triển. Mạng giao tiếp kết nối với điện thoại thông minh, máy tính bảng bằng sóng WiFi. Qua thử nghiệm thực tế, hệ thống có thể ước lượng tốc độ xe ô tô tới 35 km/h và trọng tải tới 1400 kg với sai số tương đối tốt. Qua đó khẳng định rằng, cảm biến có tiềm năng ứng dụng to lớn trong hệ thống giao thông thông minh vì tính đơn giản trong chế tạo cũng như sự thuận tiện trong triển khai hệ thống. Hướng nghiên cứu tiếp theo là bổ sung các thuật toán xử lý tín hiệu, cũng như cải thiện chất lượng cảm biến để tăng độ chính xác và mở rộng dải phát hiện vận tốc của xe ô tô.

4.3. Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động bước chân

Giới thiệu

Thời gian gần đây, các nghiên cứu phát triển các ứng dụng chăm sóc sức khỏe, vận động sử dụng cảm biến để phân tích sự phân bố lực của bàn chân đang thu hút được sự quan tâm nghiên cứu của các nhóm nghiên cứu cũng như các công ty công nghệ [25,30]. Các nghiên cứu này tập trung phát triển các ứng dụng với cảm biến hoặc hệ thống cảm biến được tích hợp vào giày, tất với mục đích theo dõi sự di chuyển của bệnh nhân hoặc các vận động viên thể thao.

Trong lĩnh vực theo dõi sức khỏe, các nghiên cứu chủ yếu sử dụng giày có tích hợp hệ thống cảm biến để theo dõi sự hồi phục của bệnh nhân. Crosbie và Nicol [107] đã đề xuất hệ thống theo dõi sự hồi phục của bệnh nhân chấn thương thần kinh liên quan tới khả năng vận động, bằng cách sử dụng các cảm biến để phân tích bước chân và sự phân bố lực trên bàn chân khi tiếp xúc với mặt đất. Các công trình nghiên cứu cũng đã đưa ra phương pháp theo dõi sự phục hồi của bệnh nhân sau chấn thương [108–110] và bệnh nhân

đột quy sử dụng giày đeo tích hợp cảm biến để thu thập các thông tin về độ dài và áp lực bước chân.

Trong lĩnh vực thể thao, đáng chú ý nhất là các nghiên cứu của Salpavaara [111] và Holleczeck [29] về theo dõi thời gian và sự chuyển động bước chân của vận động viên trong các quá trình ném, nhảy và chạy ở các môn thể thao. Nhiều môn thể thao cần sự kết hợp tốt của các động tác chạy, ném, nhảy để vận động viên mang lại thành tích tốt nhất. Các thông tin từ kết quả phân tích thời gian và sự chuyển động của bước chân, các vận động viên có thể đạt được kết quả tốt nhất trong quá trình luyện tập, cũng như giảm thiểu các chấn thương có thể mắc phải.

Mặt khác, áp lực của bước chân người trưởng thành khi di chuyển vào khoảng 120 kPa [98], giá trị này nằm trong khoảng đo của cảm biến được thể hiện trên Hình 4.1.

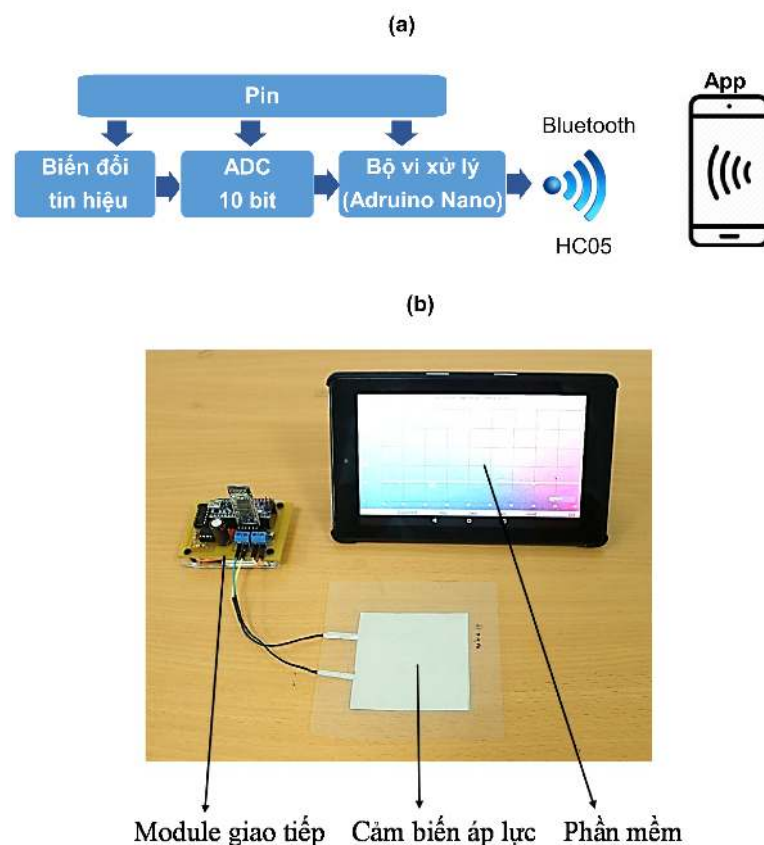
Nút IoT được thiết kế bao gồm mạch giao tiếp cảm biến áp lực hữu cơ, máy tính bảng để hiển thị dữ liệu đã được thiết kế để theo dõi chuyển động bước chân. Đồng thời phần mềm ứng dụng cài đặt trên điện thoại thông minh, máy tính bảng sử dụng hệ điều hành Android để hiển thị và lưu trữ thông tin cảm biến cũng xây dựng. Kết quả thử nghiệm cho thấy, hệ thống có thể hiển thị chính xác tín hiệu bước chân người đi bộ.

Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động bước chân

Hệ thống giám sát chuyển động bước chân được thiết kế bao gồm nút IoT. Theo đó, mục tiêu thiết kế mạch giao tiếp cảm biến để sử dụng dưới dạng đeo hoặc gắn trên cơ thể. Vì vậy tiêu chí nhỏ gọn, công suất tiêu thụ thấp được nhóm tác giả quan tâm hàng đầu trong việc lựa chọn linh kiện sử dụng. Bên cạnh đó tiêu chí giá thành và tính sẵn có, phổ biến trên thị trường. Qua

nghiên cứu và khảo sát, chọn họ vi điều khiển Atmega328 được tích hợp trên bo mạch Arduino Nano vì bo mạch này có tích hợp bộ ADC 10 bit, với 8 đầu vào analog và 14 đầu ra digital rất thuận tiện để mở rộng, nâng cấp sử dụng cho nhiều cảm biến khác nhau.

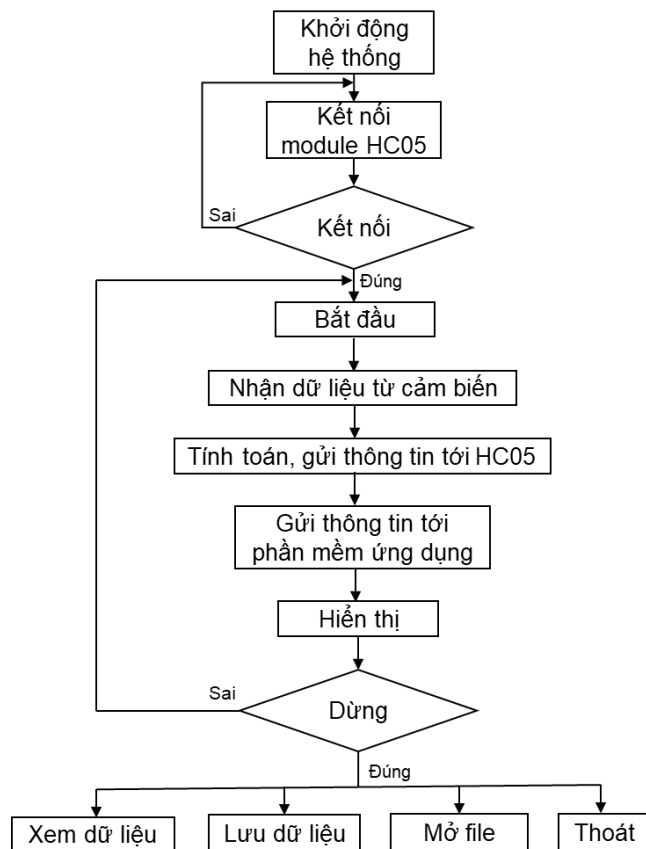
Để hiển thị tín hiệu bước chân trên điện thoại thông minh, máy tính bảng tác giả đã lựa chọn ngôn ngữ lập trình Java để xây dựng phần mềm ứng dụng cài đặt trên điện thoại thông minh, máy tính bảng sử dụng hệ điều hành Android. Vì hệ điều hành Android có tính phổ biến cao và hơn nữa còn hỗ trợ rất tốt các ứng dụng mà nguồn mở.



Hình 4.7: (a) Sơ đồ khối nút IoT theo dõi chuyển động bước chân và (b) hình ảnh hệ thống.

Hệ thống theo dõi chuyển động bước chân được thiết kế bao gồm nút IoT không dây và máy tính bảng được thể hiện trên Hình 4.7. Theo đó, thông

tin nhận được từ cảm biến được biến đổi sang dạng tín hiệu phù hợp sau đó được số hóa tại bộ ADC 10 bit. Mô-đun Arduino Nano được tích hợp chip vi xử lý Atmega328 phù hợp cho nút IoT không dây với kích thước nhỏ, công suất thấp. Vi điều khiển Atmega328 được kết nối với điện thoại thông minh, máy tính bảng thông qua mô-đun bluetooth HC-05. Tín hiệu cảm biến được truyền bằng bluetooth tới điện thoại/máy tính bảng để hiển thị trên màn hình của ứng dụng Android.



Hình 4.8: Lưu đồ làm việc của hệ thống theo dõi chuyển động bước chân.

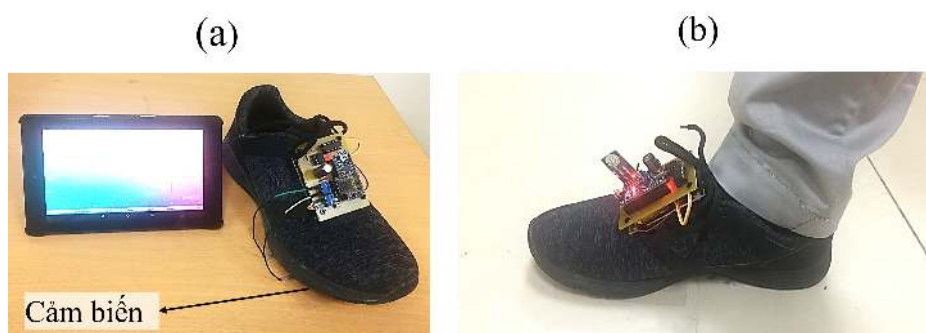
Các bước làm việc và chức năng chính của hệ thống (gồm phần cứng và phần mềm ứng dụng) được thể hiện trên Hình 4.8. Phần mềm ứng dụng được xây dựng trên môi trường Android Studio, giúp tạo ra chương trình ổn định, nhưng vẫn đảm bảo tính tùy biến cao, cho phép người lập trình dễ dàng sửa

đổi, bổ sung các chức năng theo mục đích sử dụng. Hơn nữa phần mềm ứng dụng còn có tính tương tác cao, ngoài việc hiển thị và lưu trữ dữ liệu trên điện thoại còn có thể hỗ trợ hiển thị và lưu trữ dữ liệu lên máy chủ. Do đó, mạch giao tiếp cảm biến có thể coi như một nút IoT.

Như được thể hiện trên Hình 4.8, sau khi khởi động hệ thống và chạy phần mềm ứng dụng trên điện thoại thông minh, phần mềm sẽ kết nối bluetooth với mô-đun HC05 trên mạch giao tiếp cảm biến. Sau khi ghép nối bluetooth, tín hiệu nhận được từ cảm biến sẽ liên tục được gửi tới phần mềm để hiển thị lên màn hình điện thoại. Khi kết thúc chương trình, phần mềm có các tùy chọn hiển thị dữ liệu, lưu trữ dữ liệu hoặc mở một dữ liệu đã được lưu trước đó.

Thử nghiệm nút IoT theo dõi bước chân

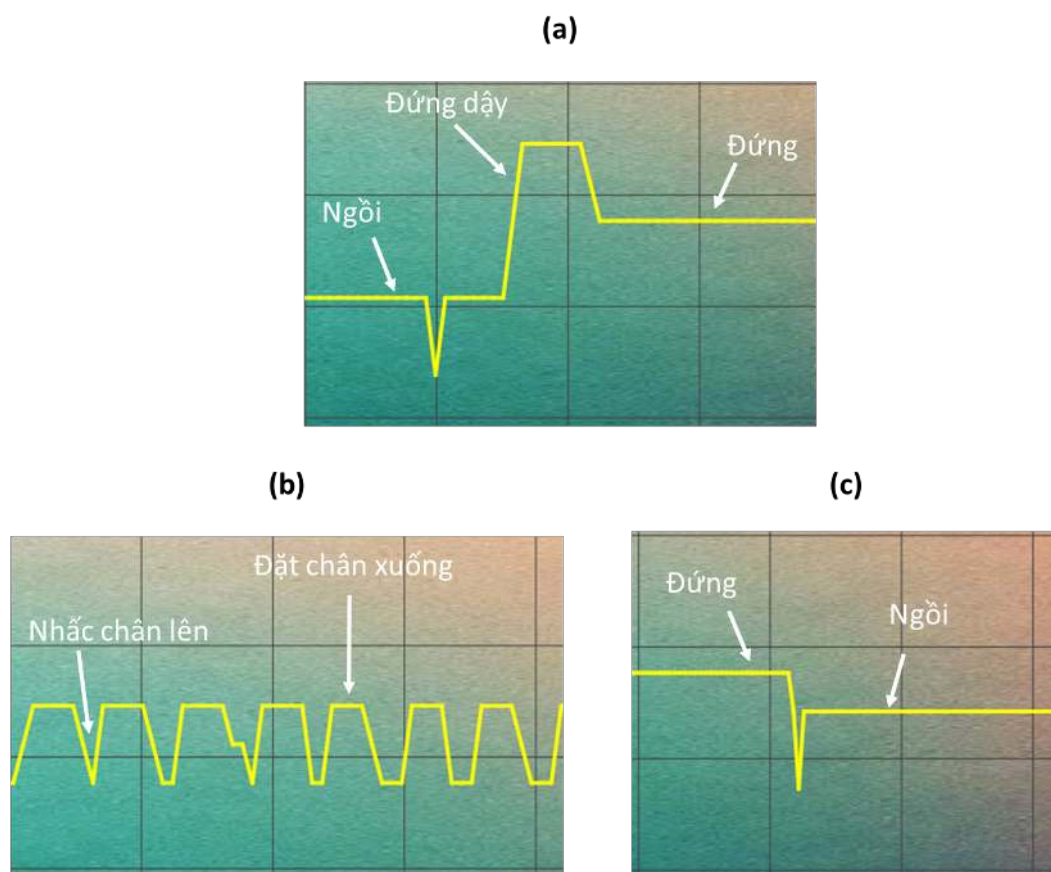
Các bước chuẩn bị và quá trình thử nghiệm nút IoT theo dõi bước chân được thể hiện trên Hình 4.9(a) và Hình 4.9(b). Mạch giao tiếp có kích thước nhỏ gọn có thể được gắn lên giày bằng cách tận dụng dây buộc giày hoặc có thể được cố định bằng các loại băng dính và keo dán thông thường. Cảm biến áp lực hữu cơ được dán dưới đế giày bằng băng dính hoặc keo dán thông thường.



Hình 4.9: (a) Hệ thống với cảm biến được gắn dưới đế giày; (b) hình ảnh quá trình thử nghiệm.

Các thông tin di chuyển của người mang cảm biến, bao gồm các tư thế

chuyển trạng thái từ đang ngồi ghế sang đứng dậy, từ đang đứng chuyển sang ngồi ghế và tín hiệu khi đi bộ bình thường sẽ được theo dõi bởi nút IoT sử dụng cảm biến.



Hình 4.10: Hình ảnh tín hiệu trên màn hình máy tính bảng; (a) quá trình chuyển trạng thái từ ngồi → đứng lên → đứng; (b) tín hiệu bước chân và (c) trạng thái từ đứng → ngồi xuống.

Kết quả thử nghiệm cho thấy rằng, khi sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ đề xuất, hệ thống có thể hiển thị rõ ràng tín hiệu bước chân của người với vận tốc bình thường như được thể hiện trên Hình 4.10.

Khi bàn chân của người thử nghiệm chạm đất, điện dung của cảm biến tăng lên, tương ứng với các sườn lên của xung tín hiệu được thể hiện trên màn hình điện thoại thông minh, máy tính bảng. Ngược lại, khi bàn chân

của người thử nghiệm nhắc lên, điện dung của cảm biến giảm, tương ứng với các sườn xuống của xung tín hiệu.

Nhận xét

Hệ thống giám sát chuyển động bước chân sử dụng nút IoT thu thập dữ liệu cảm biến áp lực hữu cơ có thể hiện thị chính xác tín hiệu bước chân người ở tốc độ đi bình thường trên điện thoại thông minh/máy tính bảng. Mạch giao tiếp cảm biến cũng có thể được sử dụng để phát triển các ứng dụng khác dưới dạng đeo hoặc gắn trên cơ thể người với mục đích giám sát chuyển động hoặc theo dõi sức khỏe.

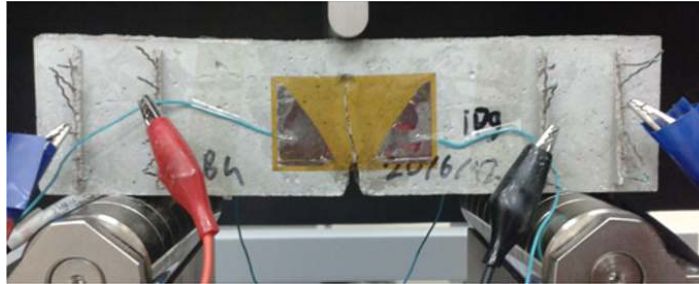
Tuy nhiên, để hoàn thiện hệ thống theo dõi bước chân nhằm mục đích nhất định (ví dụ như phân tích dáng đi, hoặc theo dõi sự hồi phục của bệnh nhân tổn thương vận động), cần phát triển những thuật toán nhằm phân tích dữ liệu nhận được từ cảm biến. Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án bao gồm bổ sung các thuật toán xử lý tín hiệu, tăng thêm số lượng cảm biến để thu thập được đầy đủ các thông tin tín hiệu bước chân người cũng như phát triển các ứng dụng IoT khác dưới dạng đeo hoặc gắn trên cơ thể.

4.4. Nút IoT trong hệ thống giám sát công trình xây dựng

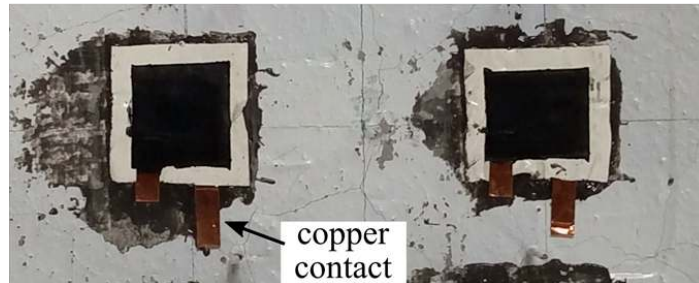
Giới thiệu

Trong những năm gần đây, nghiên cứu sử dụng các cảm biến áp lực dựa trên polyme nhạy áp vào theo dõi sức khỏe các công trình xây dựng (SHM: structural health monitoring) một cách tự động đã và đang được triển khai trên thế giới. Cảm biến có thể chế tạo ở diện tích lớn hơn các cảm biến tenzomet truyền thống và dễ dàng tích hợp trên bề mặt vật liệu như da người, cánh tay robot, dầm bê tông, v.v.. [112].

(a)



(b)



Hình 4.11: (a) Cảm biến được tạo thành từ cốt liệu bê tông hữu cơ và (b) cảm biến được gắn trên bề mặt công trình cần giám sát.

Trong những ứng dụng sử dụng cảm biến để theo dõi tình trạng công trình xây dựng, cảm biến có thể được chia thành hai loại: (1) cảm biến được tạo ra từ bê tông hữu cơ trong quá trình xây dựng công trình, và (2) cảm biến được gắn trên bề mặt công trình cần giám sát như được thể hiện trên Hình 4.11. Đối với bê tông hữu cơ, E. Teomete cùng các cộng sự đã khẳng định khả năng phát hiện những biến dạng của dầm bê tông khi sử dụng xi măng hữu cơ được pha lẫn sợi cacbon [113]. Ở một nghiên cứu khác, với mục đích phát hiện các vết nứt biến dạng của dầm bê tông, L. Lim cùng các cộng sự đã sử dụng bê tông hữu cơ pha trộn với sợi nano cacbon đơn vách (MW CNT) [114].

Phương pháp sử dụng cảm biến gắn lên bề mặt công trình đã thu hút được

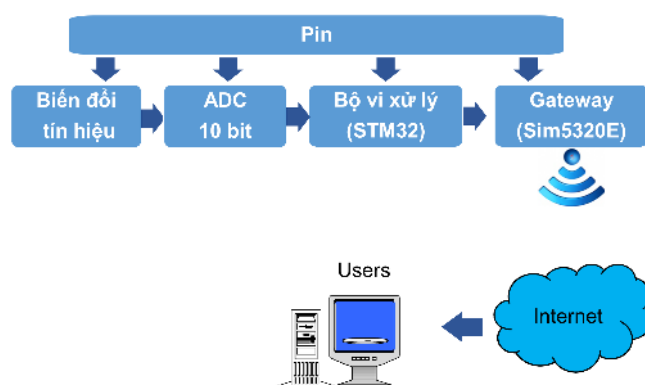
nhiều nhóm nghiên cứu phát triển các loại cảm biến. Trong đó, có thể kể tới cảm biến áp lực điện trở dạng biến dạng [14, 115, 116], các cảm biến sử dụng vật liệu gốm có tính chất áp điện [117, 118], cảm biến áp lực điện dung [119], sợi nano cacbon [120] v.v.. Các công trình nghiên cứu trên đây sử dụng cảm biến hữu cơ nhằm phát hiện các biến dạng, các rung chấn của bề mặt công trình đã được phát triển.

Nút IoT trong hệ thống giám sát công trình xây dựng

Cảm biến áp lực hữu cơ mới phát triển có đặc tính cơ học mềm dẻo, có khả năng uốn cong và có diện tích lớn nên rất phù hợp cho việc theo dõi tình trạng của các công trình xây dựng. Ý tưởng là gắn các cảm biến vào đối tượng cần theo dõi, ví dụ như dầm, xà bê tông của các công trình như cầu, cống, nhà cao tầng. Khi có sự biến dạng cơ học của các đối tượng này như uốn cong, nứt gãy thì tín hiệu sẽ được cảm nhận bởi cảm biến. Để hiện thực hóa nhận định này, nút IoT thu thập dữ liệu cảm biến kết nối với máy tính được thiết kế với sơ đồ trên Hình 4.12.

Theo Hình 4.12, thông tin từ cảm biến sau khi được chuyển đổi thành dạng tín hiệu phù hợp sẽ được số hóa tại khối ADC và chuyển tới bộ vi xử lý STM32. Bộ vi xử lý STM32 có cấu hình phần cứng và năng lực xử lý mạnh mẽ hơn dòng Atmega328, phù hợp hơn để kết nối với mô-đun Sim5320E nhằm truyền dữ liệu lên trang web.

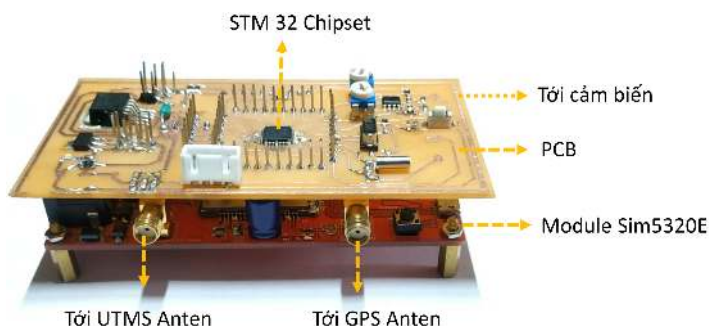
Thông tin từ cảm biến sau khi được xử lý tại vi xử lý SMT32 sẽ được gửi tới UTM/4G để truyền qua mạng Internet. Nút IoT không dây sử dụng chip vi xử lý STM32 (AMR Cortex-M3) tích hợp sẵn bộ ADC và có thể hỗ trợ kết nối 9 cảm biến/1 nút. Mô-đun UTM/4G đóng vai trò như một gateway để nút kết nối Internet. Trong hệ thống này sử dụng mô-đun Sim5320E đóng



Hình 4.12: Nút IoT không dây, kết nối internet sử dụng chipset STM32 theo dõi tình trạng công trình xây dựng.

vai trò làm gateway vì khả năng kết nối linh hoạt với các mạng viễn thông trong nước, đồng thời hỗ trợ GPS để xác định vị trí triển khai của nút IoT.

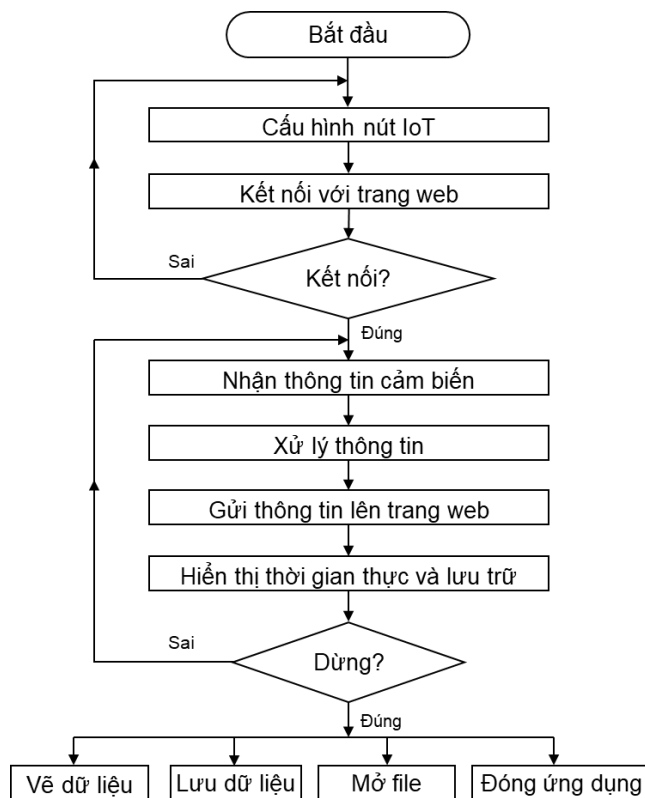
Hình 4.13 mô tả chi tiết hơn về nút IoT không dây sau thiết kế. Trong đó mô-đun mạch in vi xử lý SMT32 và Sim5320E được ghép chồng lên nhau và đặt trong hộp bảo vệ. Nút IoT không dây có kích thước nhỏ gọn ($6 \times 10 \times 4$) cm.



Hình 4.13: Hình ảnh nút IoT không dây với kích thước ($6 \times 10 \times 4$) cm.

Bên cạnh đó, một trang web hệ thống được thiết kế với mục đích hiển thị theo thời gian thực, lưu trữ thông tin cảm biến và thực hiện các chức năng quản trị hệ thống khác. Lưu đồ thuật toán làm việc của nút IoT không dây được thể hiện trên Hình 4.14. Sau khi khởi động, hệ thống sẽ tự cấu hình nút IoT, thiết lập kết nối tới trang web hệ thống. Tín hiệu nhận được từ cảm biến được tính toán, xử lý tại bộ vi xử lý STM32 và gửi tới trang web qua

mô-đun Sim5320E. Tín hiệu từ cảm biến sẽ được hiển thị theo thời gian thực và lưu trữ tại trang web hệ thống.

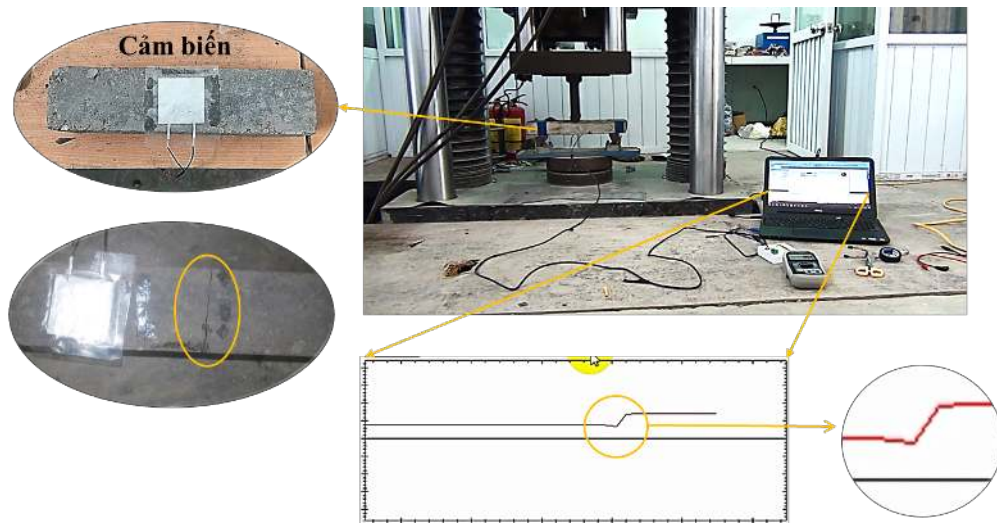


Hình 4.14: Lưu đồ thuật toán làm việc của nút IoT không dây giám sát công trình dân dụng.

Thử nghiệm nút IoT giám sát công trình xây dựng

Quá trình thử nghiệm khả năng phát hiện sự biến dạng của dầm bê tông sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ được thể hiện trên Hình 4.15. Trong đó, cảm biến được gắn lên dầm bê tông cần theo dõi bằng loại keo dán thông thường, và được kết nối tới mạch thu thập dữ liệu để thu nhận tín hiệu về sự biến dạng của dầm bê tông. Dầm bê tông được nén với thiết bị nén thủy lực cho tới khi xuất hiện sự biến dạng.

Kết quả thử nghiệm cho thấy, tín hiệu nhận được từ cảm biến có sự thay đổi lớn về giá trị khi dầm bê tông bắt đầu có hiện tượng rạn, nứt. Kết quả



Hình 4.15: Hình ảnh thử nghiệm khả năng phát hiện sự biến dạng của dầm bê tông của cảm biến và kết quả hiển thị trên phần mềm.

này là cơ sở cho các phân tích sâu hơn các tiêu chuẩn an toàn trong xây dựng công trình, qua đó có thể giúp cho việc quan trắc, cảnh báo công trình xây dựng như nhà xưởng, cầu cống, v.v..

Thêm vào đó, một thử nghiệm khác sử dụng cảm biến để theo dõi sự rung động của dầm cầu vượt Aeon (Long Biên-Hà Nội) đã được thực hiện. Theo đó, cảm biến được gắn lên bề mặt của dầm cầu; tín hiệu từ cảm biến được thu thập bằng nút IoT không dây và truyền về máy chủ. Kết quả thử nghiệm cho thấy, các rung động của dầm cầu được thu thập bởi cảm biến được hiển thị theo thời gian thực trên máy chủ riêng ảo (VPS: virtual private server) như được thể hiện trên Hình 4.16. Với việc tín hiệu nút IoT được truyền qua mạng internet, người dùng có thể truy vấn thông tin về cảm biến ở bất kỳ vị trí nào khi có kết nối internet.

Hơn nữa, hệ thống có thể được dễ dàng bổ sung, phát triển các tính năng quản trị thông minh như: tạo và phân quyền truy cập cho người dùng, tự động đưa ra các cảnh báo (gửi thư điện tử, tin nhắn) dựa trên mức tín hiệu



Hình 4.16: Tín hiệu cảm biến hiển thị trên trang web hệ thống.

thu thập từ cảm biến, hoặc các ứng dụng thông minh khác. Khi được triển khai nhiều nút cảm biến, hệ thống có thể được nâng cấp khi sử dụng tín hiệu GPS để định vị các vị trí đang giám sát.

Nhận xét

Kết quả thử nghiệm cho thấy, cảm biến có tiềm năng ứng dụng cao trong phát triển hệ thống tự động theo dõi tình trạng công trình xây dựng. Bên cạnh đó, hệ thống có thể dễ dàng được bổ sung và phát triển thêm các tiện ích quản trị hệ thống theo hướng thông minh. Tuy nhiên, để phát triển hệ thống tự động theo dõi tình trạng công trình xây dựng hoàn chỉnh cần phải có những thuật toán để phân tích dữ liệu thu được từ cảm biến, từ đó đưa ra các phân tích đánh giá về tình trạng công trình xây dựng. Đây cũng là hướng nghiên cứu phát triển của luận án.

4.5. Kết luận chương

Việc xây dựng và triển khai nút IoT thu thập dữ liệu và thử nghiệm các ứng dụng là rất cần thiết để chứng minh khả năng áp dụng của cảm biến đề xuất. Cảm biến áp lực hữu cơ màng mỏng PU có tính chất mềm dẻo, dễ dàng được gắn lên bề mặt các đối tượng cần theo dõi. Kết quả thử nghiệm cho thấy, cảm biến có tiềm năng ứng dụng lớn trong hệ thống theo dõi, giám

sát chuyển động của ô tô; hệ thống theo dõi chuyển động bước chân và hệ thống theo dõi tình trạng các công trình xây dựng.

Đối với ứng dụng cảm biến trong hệ thống giám sát, phát hiện chuyển động của xe ô tô, cảm biến có thể phát hiện vận tốc của xe ô tô với vận tốc tới 30 km/h, và trọng tải từ 1000 kg tới 1400 kg. Sai số của quá trình ước lượng vận tốc và trọng tải xe ô tô của cảm biến phát triển bởi luận án có thể so sánh ở mức tương đương đối với các công trình công bố [105] và [106]. Bên cạnh đó, so sánh với các loại cảm biến xâm lấn được triển khai trên mặt đường, cảm biến có ưu điểm là phương pháp chế tạo đơn giản; chi phí thấp và thuận tiện trong quá trình triển khai lắp đặt cũng như bảo trì hệ thống.

Đối với hệ thống theo dõi chuyển động bước chân và hệ thống theo dõi tình trạng công trình xây dựng, thành công bước đầu của luận án là khẳng định tiềm năng ứng dụng của cảm biến trong lĩnh vực này. Tuy nhiên, để phát triển hệ thống hoàn chỉnh, cần có những thuật toán xử lý tín hiệu cảm biến để đưa ra các thông tin cụ thể và chính xác.

KẾT LUẬN

Luận án trình bày kết quả nghiên cứu về cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng màng polyurethane định hướng ứng dụng cho IoT. Theo đó, nghiên cứu sinh đã đề xuất phương pháp chế tạo cảm biến với điều kiện kỹ thuật và công nghệ trong nước. Sau khi chế tạo thử nghiệm, các cảm biến được khảo sát đặc tính bằng các thiết bị đo hiện đại để xác định thông số cấu tạo tối ưu. Kết quả đo chỉ ra rằng cảm biến đề xuất hoàn toàn có thể ứng dụng được cho nhiều nút IoT.

Bên cạnh đó, luận án trình bày đề xuất giải pháp kết hợp cảm biến áp lực hữu cơ với OTFT thường đóng để tạo ra cảm biến tích cực. Kết quả đo kiểm cho thấy cảm biến mới đã cải thiện độ nhạy từ $1,18 \times 10^{-4}$ lên $6,5 \times 10^{-4}$ kPa^{-1} , giảm hiện tượng trễ từ 7,7 % xuống còn 1,8 % trong cùng điều kiện với cảm biến cũ và tiêu thụ công suất khá thấp so với một số nghiên cứu cùng loại.

Căn cứ vào đặc tính của cảm biến đã chế tạo thành công, nghiên cứu sinh đã đề xuất ứng dụng cảm biến vào một số nút IoT. Đó là ứng dụng trong hệ thống theo dõi, phát hiện chuyển động của xe ô tô, theo dõi chuyển động bước chân và trong hệ thống tự động theo dõi tình trạng các công trình xây dựng. Kết quả thử nghiệm cho thấy các nút IoT đều hoạt động tốt, cho phép thực hiện các thao tác gửi dữ liệu, hiển thị lên màn hình điện thoại và lưu trên hệ thống điện toán đám mây.

*** Một số kết quả đạt được của luận án**

1. Phát triển thành công cảm biến áp lực hữu cơ mềm dẻo, diện tích lớn, dải áp lực làm việc rộng, phương pháp chế tạo đơn giản bằng các trang

thiết bị sẵn có trong nước. Cảm biến có độ nhạy có thể so sánh với các cảm biến tương đương, phù hợp với ứng dụng IoT kiểu mới.

Triển khai thử nghiệm thành công ứng dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong: Nhận dạng xe ô tô, theo dõi tín hiệu bước chân và tự động theo dõi tình trạng công trình xây dựng.

2. Đề xuất cảm biến tích cực dựa trên OTFT thường đóng làm việc ở điện áp thấp và không cần thiên áp cực cửa để nâng cao độ nhạy và giảm độ trễ của cảm biến.

*** Hướng phát triển tiếp theo**

Để hoàn thiện hơn các kết quả nghiên cứu đã đạt được, tác giả định hướng nghiên cứu trong thời gian tới như sau:

1. Nghiên cứu, mô hình hóa, khảo sát mô phỏng cảm biến để tiếp tục nâng cao các tham số cảm biến.
2. Nghiên cứu cải thiện chất lượng của cảm biến và nút IoT; Phát triển ứng dụng nút IoT với cảm biến tích cực.
3. Nghiên cứu thử nghiệm ứng dụng của cảm biến trong các lĩnh vực mới.

PHỤ LỤC 1

TỔNG HỢP MỘT SỐ CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU VỀ CẢM BIẾN ÁP LỰC HỮU CƠ

1. Cảm biến thụ động

STT	Vật liệu	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo/ năm
Cảm biến điện trở					
1	Lớp tích cực: PPy Điện cực: ITO coated PET.	1 cm ²	(0-10) kPa	(56,0-133,1) kPa ⁻¹	[32] 2014
2	Lớp tích cực: PDMS/Carbon Điện cực: Au coated PI.	(3×3) mm ²	100 kPa	10,74 kPa ⁻¹	[49] 2018
3	Lớp tích cực: PAAm/Ag NWs Điện cực: Cu.	(10×15) mm ²	100 Pa~ 6 MPa	0,35 kPa ⁻¹ @ <1 kPa 0,05 kPa ⁻¹ @ (1-10) kPa 10 ⁻⁵ kPa ⁻¹ @ >500 kPa	[46] 2016
4	Lớp tích cực: MW CNTs/PDMS Điện cực: ITO/Cu	1,5 cm ²	26 kPa	47,062 kPa ⁻¹ @<1 kPa 90,657 kPa ⁻¹ @(1-10) kPa, 30,214 kPa ⁻¹ @ (10-26) kPa	[3] 2018
5	Lớp tích cực: Carbonized Silk nanofiber Membranes (CSilkNM) Đế: PDMS	(1,3×1,3) cm ²	(0,8-5000) Pa	34,47 kPa ⁻¹ @(0,8-400) Pa 1,16 kPa ⁻¹ @(400-5000) Pa	[4] 2017

STT	Vật liệu	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo/ năm
6	rGO-Ag NW	(1,0×1,0) cm ²	20 kPa	4,23 kPa ⁻¹	[121] 2017
7	Lớp tích cực: CB-Graphene Đế: PU foam Điện cực: Silver	(1,2×1,2) cm ²	11 kPa	0,38 kPa ⁻¹	[73] 2017
8	Lớp tích cực: Graphene Đế: PET Contact: Cr/Au PMMA Encapsulation	NA	60 kPa	NA	[70] 2016
9	Lớp tích cực: Paper/Au NWs Đế: PDMS	(8×8) mm ²	5 kPa	1,14 kPa ⁻¹	[122] 2014
10	Lớp tích cực: rGO/PANI NWs Điện cực: Silver	(3×3) cm ²	27 kPa	(0,042-0,152) kPa ⁻¹	[47] 2018
11	Lớp tích cực: PPy Đế: PDMS	(1,5×1,5) cm ²	2 kPa	19,32 kPa ⁻¹	[68] 2018
12	Lớp tích cực: Graphene/PI. Đế: PDMS; Điện cực: Silver	NA	80 kPa	2,34 kPa ⁻¹	[123] 2018
13	Lớp tích cực: Graphene Đế: PDMS	~ 1 cm ²	3 MPa	0,09 kPa ⁻¹	[74] 2016
14	Lớp tích cực: Ag NPs+PU Đế: PET/ITO	(1,13-6,0) cm ²	10 kPa	2,46 kPa ⁻¹	[124] 2016
15	Đế: PI Điện cực Au Lớp tích cực: Graphene-PDMS Encapsulate: PEN film	(3×3) mm ²	60 kPa	15,9 kPa ⁻¹	[52] 2017
16	Lớp tích cực: CNT+PDMS; Điện cực: Pt; Encapsulate: PDMS;	(1×1,5) cm ²	60,5 kPa	15,1 kPa ⁻¹	[48] 2014
17	Đế: IOT/PET; Lớp tích cực: rGO/PDMS	2 cm ²	1,4 kPa	5,5 kPa ⁻¹	[6] 2014

STT	Vật liệu	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo/ năm
18	Lớp tích cực: rGO Đế: PDMS	NA	2,6 kPa	25,1 kPa ⁻¹	[7] 2018
19	Lớp tích cực: CNTs/Graphene; Đế: PDMS Điện cực: Silver;	(1,5×1,5) cm ²	5,8 kPa	19,8 kPa ⁻¹	[125] 2017
20	Lớp tích cực: PDMS/Graphene; Đế: PDMS Điện cực: Au;	2 cm ²	25 kPa	1,2 kPa ⁻¹	[126] 2018
21	Đế: PDMS Lớp tích cực: Ti/Au coated PDMS	(4×1) cm ²	(0-70) Pa	50,17 kPa ⁻¹	[54] 2014
22	Đế: PDMS Lớp tích cực: Wrinkled Graphene	(10×10) mm ²	4 kPa	6,92 kPa ⁻¹	[127] 2017
23	Lớp tích cực: PDMS/Graphene Đế: PET	NA	12 kPa	8,5 kPa ⁻¹	[53] 2016
24	Lớp tích cực: PEDOT:PSS-PUD Đế: PDMS Điện cực: ITO;	(5×5) mm ²	20 kPa	851 kPa ⁻¹	[128] 2016
25	Top layer: Au-deposited PDMS Bottom layer: Polyaniline nano fibers on a PETsubstrate .	(9×9) mm ²	9 kPa	2,0 kPa ⁻¹	[50] 2015
26	Điện cực: PI; Lớp tích cực: wrinkled graphene; Điện môi: PVA NWs	~ 1 cm ²	14 kPa	28,34 kPa ⁻¹	[8] 2018
27	Đế: PET/ITO; Lớp tích cực: PPy NWs; Điện môi: PVA NWs	(1×1) cm ²	10 kPa	109,9 kPa ⁻¹	[9] 2017
28	Lớp tích cực: Zn ₂ GeO ₄ /PPy NW Điện cực: Cu	0,25 cm ²	5 kPa	0,38 kPa ⁻¹	[75] 2017
29	Lớp tích cực: Cu NWs Điện cực: Ni/Al	NA	200 pa	(0,2-0,7) kPa ⁻¹	[129] 2017

STT	Vật liệu	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo/ năm
30	Đế: ITO coated PET; Lớp tích cực: Graphite/PMDS	(1×1) cm ²	10 kPa	64,3 kPa ⁻¹	[51] 2018
Cảm biến điện dung					
31	Top layer: PDMS coated ITO; Lower layer: Al coated PET;	NA	NA	0,55 kPa ⁻¹	[130] 2010
32	Điện môi: Porous Ecoflex Điện cực: CNT-Ecoflex Film	(1×1) cm ²	130 kPa	0,601 kPa ⁻¹	[39] 2016
33	Điện môi: PDMS Điện cực: Pencial coated paper	(4×2) cm ²	10 kPa	0,62 kPa ⁻¹	[41] 2017
34	Lớp tích cực: Microsprous PDMS Điện cực: AgNPs/SBS	(1,6×1,6) cm ²	50 kPa	0,278 kPa ⁻¹	[37] 2017
35	Lớp tích cực: Ecoflex Điện cực: SW CNT/PDMS	4 mm ²	800 kPa	0,23×10 ⁻³ kPa ⁻¹	[130] 2011
36	Lớp tích cực: PU/AgNW. Điện cực: AgNW/PET	(3×3) mm ²	70 Pa	<30 Pa: 5,54 kPa ⁻¹ >30 Pa: 0,88 kPa ⁻¹	[71] 2015
37	Điện môi: Pyramid PDMS Điện cực: Au	64 mm ²	5 kPa	(0,55–0,58) kPa ⁻¹	[35] 2015
38	Điện cực: Silver NWs/PDMS. Điện môi: Ecoflex Substrate: Si	NA	1,2 MPa	<500 kPa: 1,62 MPa ⁻¹ >500 kPa: 0,57 MPa ⁻¹	[76] 2014
39	Điện cực trên: AgNW/PDMS. Điện cực dưới: Ag/Plastic. Dielectric: PMMA/PVP	16 mm ²	5 kPa	3,8 kPa ⁻¹	[131] 2015
40	Điện môi: PGS Điện cực: Fe/Mg	(2,4 ×2,42) mm ²	10 kPa	0,76 kPa ⁻¹	[43] 2015
41	Điện cực: GO/PET; - Điện môi: Porous GO	(1×1) cm ²	4 kPa	0,8 kPa ⁻¹	[36] 2018

STT	Vật liệu	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo/ năm
42	Điện cực: SWNT-film Điện môi: PDMS+air gap	(1×1) cm ²	~ kPa	0,7 kPa ⁻¹	[38] 2014
43	Điện cực: PEDOT:PSS Điện môi: PDMS+Silica	(2,4×2,4) cm ²	10 kPa	1,0 kPa ⁻¹	[42] 2018
44	Microstructured Ecoflex film	NA	(0-10) kPa	130×10 ⁻⁴ kPa ⁻¹	[44] 2017
45	Điện cực: AgNW/PDMS. Điện môi: : PDMS	(1,6×1,6) cm ²	(0-2) kPa	1,1 kPa ⁻¹	[132] 2017
46	Điện cực: SEBS/CB Điện môi: : SEBS/TiO2	NA	NA	NA	[61] 2015
47	Điện môi: (P(VDF-TrFE)); Điện cực: Al/PVA	(30×30) mm ²	0,8 kPa	2,81 kPa ⁻¹	[64] 2015
Cảm biến điện tích					
48	Điện cực: PEDOT:PSS Lớp tích cực: P(VDF-TrFE) Đế: PEN	4 mm ²	1,5 MPa	0,025 Mpa ⁻¹	[60] 2018
49	Điện cực: Pt Lớp tích cực: AlN Đế: PET	2,5 cm ²	8,5 MPa	~ 0,9 kPa ⁻¹	[77] 2006
50	Điện cực: Cr/Au; Lớp tích cực: Graphene Đế: PI	~mm ²	5 N	9,3×10 ⁻³ kPa ⁻¹	[78] 2017
51	Điện cực: CNT-Ag NWs/Au; Lớp tích cực: ZnO NWs/BaTiO3 Đế: PET	NA	NA	NA	[133] 2015
52	Điện cực: graphene; Lớp tích cực: PVDF/ZnO NW Đế: PET	(0,5×0,5) cm ²	140 Pa	NA	[134] 2015
53	Điện cực: Cu film; Lớp tích cực: P(VDF-TrFe) Đế: PI	(2×1) cm ²	12 Pa	0,79 mV Pa ⁻¹	[55] 2013

STT	Vật liệu	Diện tích	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Tham khảo/ năm
54	Điện cực: Au coated PDMS; Lớp tích cực: PVDF-TrFE Đế: PDMS	(1,5×1,5) cm ²	76 kPa	120 mV/μm	[56] 2016
55	Điện cực: Au, ; Lớp tích cực: n+; Đế: Silic	1 cm ²	10 Pa	NA	[135] 2014

2. Cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng OTFT

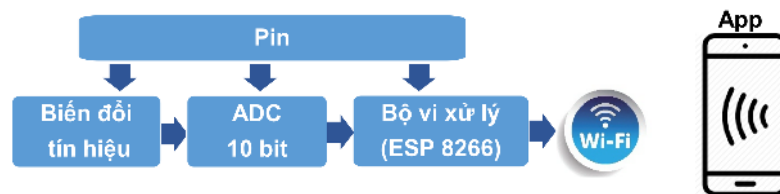
STT	Vật liệu bán dẫn/ Diện tích cảm biến	Độ linh động (cm ² /Vs)	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Điện áp làm việc	Tham khảo, năm
1	Rubrene 5 mm ²	N/A	(0,4-4,4) kPa	0,4 kPa ⁻¹	V _{GS} : -20 V V _{DS} : -20 V	[87] 2015
2	Heptazole	N/A	N/A	N/A	V _{GS} : -20 V V _{DS} : -10 V	[88] 2014
3	Pentacene; F16CuPc	0,5	(200-10000) Pa	N/A	V _{GS} : -3 V V _{DS} : -2 V	[81] 2013
4	PiI2T-Si 1 cm ²	2,45	(0-60) kPa	8,4 kPa ⁻¹	V _{GS} : -200 V V _{DS} : -200 V	[81] 2013
5	Rubrene 64 mm ²	1	(0-20) kPa	0,55 kPa ⁻¹	V _{GS} : -80 V V _{DS} : -20 V	[34] 2010
6	Pentacene (0,5×1) mm ²	NA	(100-500) kPa	NA	V _{GS} : 5 V V _{DS} : -80 V	[84] 2014
7	PDPP3T (1×2) mm ²	0,34	(0-20) kPa	192 kPa ⁻¹	V _{GS} : -60 V V _{DS} : -60 V	[82] 2015

STT	Vật liệu bán dẫn/ Diện tích cảm biến	Độ linh động (cm^2/Vs)	Khoảng đo/ Giá trị đo max	Độ nhạy	Điện áp làm việc	Tham khảo, năm
8	Pentacene 64 mm^2	N/A	(0-5) N	N/A	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[90] 2013
9	Pentacene 1 cm^2	0,028	(0-300) Pa	20 mN	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[91] 2016
10	DNTT	1,7	NA	NA	V_{GS} : 1 V V_{DS} : -2 V	[92] 2012
11	P3HT	NA	50 kPa	NA	V_{GS} : -4 V V_{DS} : -0,8 V	[93] 2016
12	PIDT-BT:TCNQ 49 mm^2	NA	10 kPa	17,95 kPa^{-1}	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[83] 2019
13	DNTT (5×5) mm^2	0,56	360 kPa	$2,2 \times 10^{-4}$ kPa^{-1}	V_{GS} : -2 V V_{DS} : -2 V	[97] 2018
14	Graphene (0,6×0,6) mm^2	212	3 MPa	0,205 kPa^{-1}	V_{GS} : 25 V V_{DS} : 0,1 V	[97] 2018
15	n+ 1 cm^2	NA	NA	NA	V_{GS} : 5 V V_{DS} : 5 V	[135] 2014
16	PIDT-BT/P3HT 1,5 cm^2	NA	35 kPa	452,7 kPa^{-1}	V_{GS} : -0,7 V V_{DS} : -0,7 V	[89] 2019

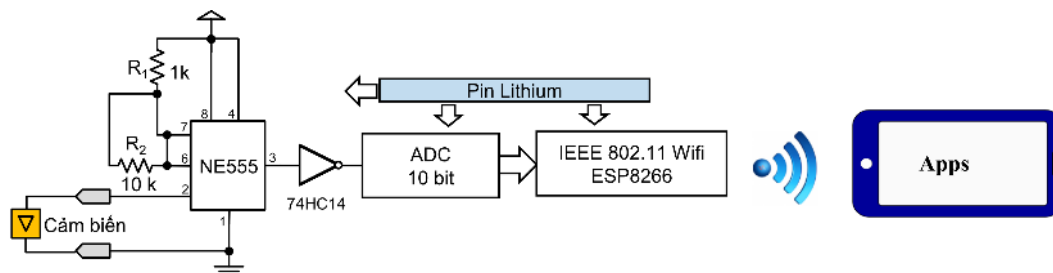
PHỤ LỤC 2

TỔNG HỢP CÁC HÌNH VẼ, SƠ ĐỒ KHỐI, SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ CỦA NÚT IoT

1. Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động của ô tô



Hình P1: Sơ đồ khối cấu trúc nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong giám sát chuyển động của ô tô.

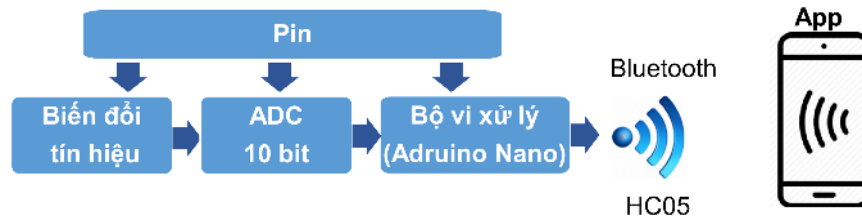


Hình P2: Sơ đồ nguyên lý nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong giám sát chuyển động của ô tô.

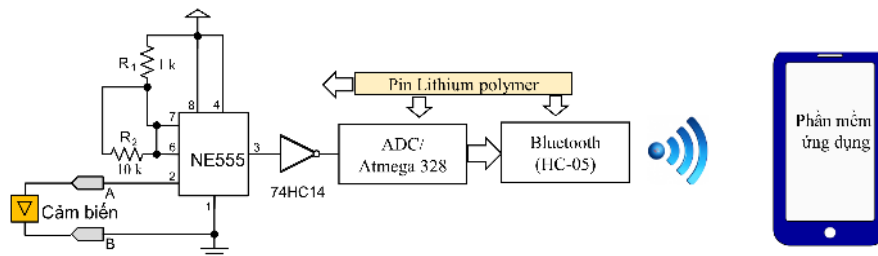


Hình P3: Hình ảnh nút IoT cùng phần mềm ứng dụng.

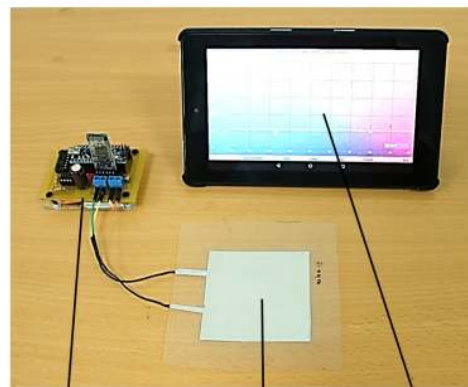
2. Nút IoT trong hệ thống giám sát chuyển động bước chân



Hình P4: Sơ đồ khối cấu trúc nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong giám sát chuyển động của bước chân.



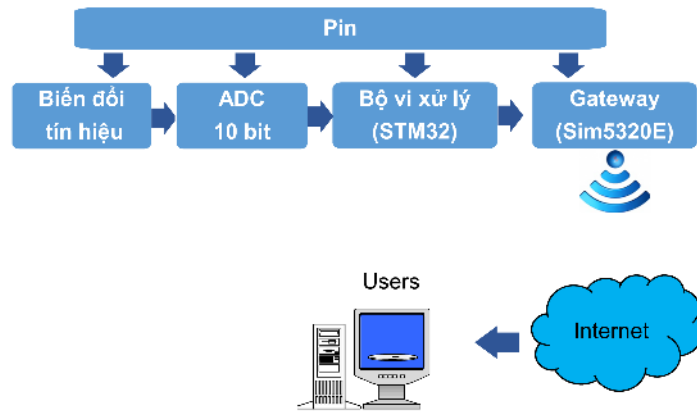
Hình P5: Sơ đồ nguyên lý nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong giám sát chuyển động bước chân.



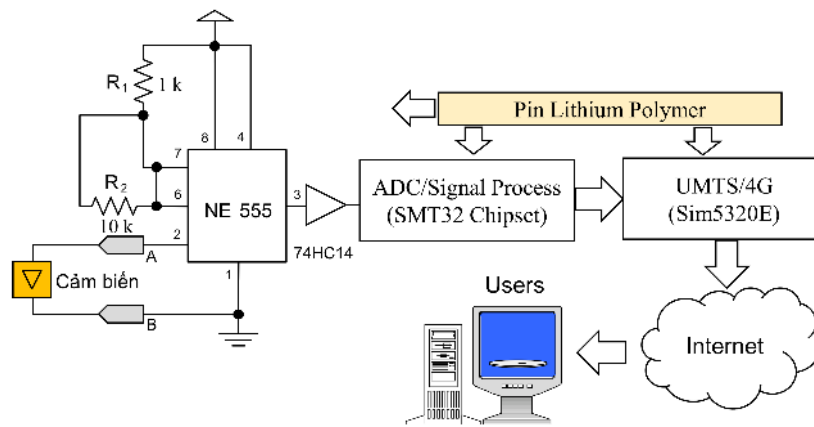
Module giao tiếp Cảm biến áp lực Phần mềm

Hình P6: Hình ảnh nút IoT cùng phần mềm ứng dụng.

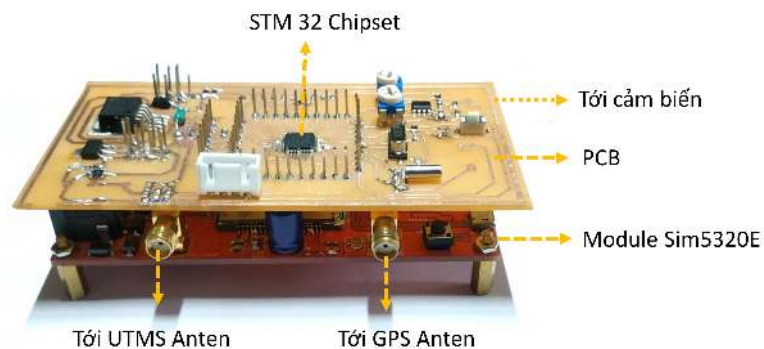
3. Nút IoT trong hệ thống giám sát công trình xây dựng



Hình P7: Sơ đồ khối cấu trúc nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong giám sát công trình xây dựng.



Hình P8: Sơ đồ nguyên lý nút IoT sử dụng cảm biến áp lực hữu cơ trong giám sát công trình xây dựng.



Hình P9: Hình ảnh mô-đun thu thập dữ liệu.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

* Bài báo khoa học

- J1. Chien Khong Duc**, Van-Phuc Hoang, Duy Tien Nguyen, and Toan Thanh Dao, “A Low-Cost, Flexible Pressure Capacitor Sensor using Polyurethane for Wireless Vehicle Detection,” *Polymers*, 2019, 11(8), 1247. (SCIE, Q1), <https://doi.org/10.3390/polym11081247>.
- J2. Khong Duc Chien**, Hoang Van Phuc, Dao Thanh Toan, “Fabrication of a Normally-On Organic Thin Film Transistor for Active Sensor Construction,” *Journal of Science and Technique/Le Quy Don Technical University*, ISBN: 1859-0209, vol 203 , 11/2019, pp 96-105.
- J3. Khổng Đức Chiến**, Hoàng Văn Phúc, Đào Thanh Toàn, “Chế tạo cảm biến áp lực sử dụng vật liệu Polyme, ứng dụng trong tự động theo dõi sức khỏe công trình xây dựng,” *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, ISSN 1859–1043, số 56, 8.2018, pp. 47-54.
- J4. Khổng Đức Chiến**, Lê Thị Trang, Hoàng Văn Phúc, Đào Thanh Toàn, “Khảo sát tác động của nhiệt độ tới cảm biến áp lực hữu cơ sử dụng vật liệu Polyme,” *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ Quân sự*, ISSN 1859–1043, số Đặc san, 8.2018, pp. 376-381.
- C1. Khổng Đức Chiến**, Phạm Văn Học, Lê Thị Trang, Heisuke Sakai, Hoàng Văn Phúc, Đào Thanh Toàn, “Thiết kế mạch giao tiếp với cảm biến áp lực hữu cơ, ứng dụng theo dõi bước chân trên điện thoại thông minh, máy tính bảng,” *Kỷ yếu Hội nghị Quốc gia lần thứ XXI về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ thông tin*, ISBN: 978-604-80-3579-2, 12.2018, pp. 203-206.
- C2. Chien Khong Duc**, Tam Hoang Thi, Toan Thanh Dao and Van-Phuc Hoang, “Fabrication of Low-Cost, Low-Power, Flexible Organic Pressure Sensors for Intelligent Systems,” In *Proceeding of The 1st ECTI – UEC Workshop on AI and Applications*, Bangkok, Thailand 9.2019, pp 41-42.

C3. Chien Khong Duc, Toan Thanh Dao, Anh Bui Tien, Van-Phuc Hoang, “An IoT Node with Organic Pressure Sensor for Structural Health Monitoring System,” In *Proceeding of The International Conference on Green and Human Information Technology 2020 (ICGHIT 2020)*, ISSN: 2466-121X, Hanoi, 02.2020, pp. 08-11.

* **Bằng sáng chế**

P1. Bằng sáng chế: *Cảm biến áp lực hữu cơ bằng vật liệu polyme để theo dõi sức khỏe công trình xây dựng và hệ thống tự động theo dõi sức khỏe công trình xây dựng sử dụng cảm biến này.*

Số bằng: **23872** được Cục Sở hữu Trí tuệ, Bộ Khoa học và Công nghệ cấp ngày: 24/4/2020.

Vai trò: Tác giả chính.

Tình trạng: Đã cấp bằng.

P2. Bằng sáng chế: *Tranzito màng mỏng hữu cơ thường đóng công suất thấp, phương pháp chế tạo và cảm biến áp lực hữu cơ tích cực sử dụng tranzito này.*

Số đơn: 1-2019-04969, Ngày nộp đơn: 11/9/2019.

Vai trò: Đồng tác giả.

Tình trạng: Đã công bố.

* **Giải thưởng khoa học**

Nghiên cứu trẻ tiêu biểu, Bài báo “Fabrication of Low-Cost, Low-Power, Flexible Organic Pressure Sensors for Intelligent Systems”, The 1st ECTI – UEC Workshop on AI and Applications, Bangkok 6/2019, Thailand.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Li, R. Bao, J. Tao, Y. Peng, and C. Pan, “Recent progress in flexible pressure sensor arrays: from design to applications,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 6, no. 44, pp. 11 878–11 892, 2018.
- [2] F. Xu, X. Li, Y. Shi, L. Li, W. Wang, L. He, and R. Liu, “Recent developments for flexible pressure sensors: A review,” *Micromachines*, vol. 9, no. 11, p. 580, 2018.
- [3] J. Park, J. Kim, J. Hong, H. Lee, Y. Lee, S. Cho, S.-W. Kim, J. J. Kim, S. Y. Kim, and H. Ko, “Tailoring force sensitivity and selectivity by microstructure engineering of multidirectional electronic skins,” *NPG Asia Materials*, vol. 10, no. 4, pp. 163–176, 2018.
- [4] Q. Wang, M. Jian, C. Wang, and Y. Zhang, “Carbonized silk nanofiber membrane for transparent and sensitive electronic skin,” *Advanced Functional Materials*, vol. 27, no. 9, p. 1605657, 2017.
- [5] Y. Shu, H. Tian, Y. Yang, C. Li, Y. Cui, W. Mi, Y. Li, Z. Wang, N. Deng, B. Peng *et al.*, “Surface-modified piezoresistive nanocomposite flexible pressure sensors with high sensitivity and wide linearity,” *Nanoscale*, vol. 7, no. 18, pp. 8636–8644, 2015.
- [6] B. Zhu, Z. Niu, H. Wang, W. R. Leow, H. Wang, Y. Li, L. Zheng, J. Wei, F. Huo, and X. Chen, “Microstructured graphene arrays for highly sensitive flexible tactile sensors,” *Small*, vol. 10, no. 18, pp. 3625–3631, 2014.
- [7] Y. Pang, K. Zhang, Z. Yang, S. Jiang, Z. Ju, Y. Li, X. Wang, D. Wang, M. Jian, Y. Zhang *et al.*, “Epidermis microstructure inspired graphene pressure sensor with random distributed spinosum for high sensitivity and large linearity,” *ACS nano*, vol. 12, no. 3, pp. 2346–2354, 2018.
- [8] W. Liu, N. Liu, Y. Yue, J. Rao, F. Cheng, J. Su, Z. Liu, and Y. Gao, “Piezoresistive pressure sensor based on synergistical innercon-

- nect polyvinyl alcohol nanowires/wrinkled graphene film,” *Small*, vol. 14, no. 15, p. 1704149, 2018.
- [9] C. Luo, N. Liu, H. Zhang, W. Liu, Y. Yue, S. Wang, J. Rao, C. Yang, J. Su, X. Jiang *et al.*, “A new approach for ultrahigh-performance piezoresistive sensor based on wrinkled ppy film with electrospun pva nanowires as spacer,” *Nano Energy*, vol. 41, pp. 527–534, 2017.
- [10] Y. Zang, F. Zhang, C.-a. Di, and D. Zhu, “Advances of flexible pressure sensors toward artificial intelligence and health care applications,” *Materials Horizons*, vol. 2, no. 2, pp. 140–156, 2015.
- [11] Y. Huang, X. Fan, S.-C. Chen, and N. Zhao, “Emerging technologies of flexible pressure sensors: materials, modeling, devices, and manufacturing,” *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 12, p. 1808509, 2019.
- [12] S. Laflamme, M. Kollosche, J. J. Connor, and G. Kofod, “Robust flexible capacitive surface sensor for structural health monitoring applications,” *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 139, no. 7, pp. 879–885, 2013.
- [13] M. Hallaji, A. Seppänen, and M. Pour-Ghaz, “Electrical impedance tomography-based sensing skin for quantitative imaging of damage in concrete,” *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 8, p. 085001, 2014.
- [14] K. J. Loh, T.-C. Hou, J. P. Lynch, and N. A. Kotov, “Carbon nanotube sensing skins for spatial strain and impact damage identification,” *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 28, no. 1, pp. 9–25, 2009.
- [15] A. Downey, A. D’Alessandro, F. Ubertini, and S. Laflamme, “Automated crack detection in conductive smart-concrete structures using a resistor mesh model,” *Measurement Science and Technology*, vol. 29, no. 3, p. 035107, 2018.
- [16] N. C. Cuong, T. X. Thang, T. D. Hoai, N. T. Phuong, V. L. T. Long, T. H. Ly, H. B. Cuong, and N. V. K. Thanh, “Simulation and analysis of a novel micro-beam type of mems strain sensors,” *Vietnam Journal of Science and Technology*, vol. 57, no. 6, 2019.
- [17] N. N. Dinh, L. H. Chi, T. T. Chung Thuy, T. Q. Trung, and V.-V. Truong, “Enhancement of current-voltage characteristics of multilayer organic light

- emitting diodes by using nanostructured composite films,” *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 9, p. 093518, 2009.
- [18] M. H. Hoang, Y. Kim, M. Kim, K. H. Kim, T. W. Lee, D. N. Nguyen, S.-J. Kim, K. Lee, S. J. Lee, and D. H. Choi, “Unusually high-performing organic field-effect transistors based on π -extended semiconducting porphyrins,” *Advanced Materials*, vol. 24, no. 39, pp. 5363–5367, 2012.
- [19] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future generation computer systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [20] M. Burhan, R. A. Rehman, B. Khan, and B.-S. Kim, “Iot elements, layered architectures and security issues: a comprehensive survey,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2796, 2018.
- [21] J. Guerrero-Ibáñez, S. Zeadally, and J. Contreras-Castillo, “Sensor technologies for intelligent transportation systems,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1212, 2018.
- [22] J. A. Guerrero-Ibanez, S. Zeadally, and J. Contreras-Castillo, “Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 122–128, 2015.
- [23] J. Contreras-Castillo, S. Zeadally, and J. A. Guerrero-Ibáñez, “Internet of vehicles: architecture, protocols, and security,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3701–3709, 2017.
- [24] J. Guerrero-Ibáñez, C. Flores-Cortés, and S. Zeadally, “Vehicular ad-hoc networks (vanets): architecture, protocols and applications,” in *Next-generation wireless technologies*. Springer, 2013, pp. 49–70.
- [25] N. Hegde, M. Bries, and E. Sazonov, “A comparative review of footwear-based wearable systems,” *Electronics*, vol. 5, no. 3, p. 48, 2016.
- [26] L. Wafai, A. Zayegh, J. Woulfe, S. M. Aziz, and R. Begg, “Identification of foot pathologies based on plantar pressure asymmetry,” *Sensors*, vol. 15, no. 8, pp. 20 392–20 408, 2015.

- [27] N. Hegde, E. Melanson, and E. Sazonov, “Development of a real time activity monitoring android application utilizing smartstep,” in *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. IEEE, 2016, pp. 1886–1889.
- [28] L. Yang, P. Dyer, R. Carson, J. Webster, K. B. Foreman, and S. Bamberg, “Utilization of a lower extremity ambulatory feedback system to reduce gait asymmetry in transtibial amputation gait,” *Gait & posture*, vol. 36, no. 3, pp. 631–634, 2012.
- [29] T. Holleczeck, A. Rüegg, H. Harms, and G. Tröster, “Textile pressure sensors for sports applications,” in *SENSORS, 2010 IEEE*. IEEE, 2010, pp. 732–737.
- [30] F. Lin, A. Wang, Y. Zhuang, M. R. Tomita, and W. Xu, “Smart insole: A wearable sensor device for unobtrusive gait monitoring in daily life,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 6, pp. 2281–2291, 2016.
- [31] A. Güemes, A. Fernandez-Lopez, A. R. Pozo, and J. Sierra-Pérez, “Structural health monitoring for advanced composite structures: A review,” *Journal of Composites Science*, vol. 4, no. 1, p. 13, 2020.
- [32] L. Pan, A. Chortos, G. Yu, Y. Wang, S. Isaacson, R. Allen, Y. Shi, R. Dauskardt, and Z. Bao, “An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film,” *Nature communications*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [33] Y. Xie and Q. Yang, “Tyre–pavement contact stress distribution considering tyre types,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 8, pp. 1899–1911, 2019.
- [34] S. C. Mannsfeld, B. C. Tee, R. M. Stoltenberg, C. V. H. Chen, S. Barman, B. V. Muir, A. N. Sokolov, C. Reese, and Z. Bao, “Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers,” *Nature materials*, vol. 9, no. 10, pp. 859–864, 2010.
- [35] C. Pang, J. H. Koo, A. Nguyen, J. M. Caves, M.-G. Kim, A. Chortos, K. Kim, P. J. Wang, J. B.-H. Tok, and Z. Bao, “Highly skin-conformal microhairy sensor for pulse signal amplification,” *Advanced materials*, vol. 27, no. 4, pp. 634–640, 2015.

- [36] S. Jang, E. Jee, D. Choi, W. Kim, J. S. Kim, V. Amoli, T. Sung, D. Choi, D. H. Kim, and J.-Y. Kwon, “Ultrasensitive, low-power oxide transistor-based mechanotransducer with microstructured, deformable ionic dielectrics,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 10, no. 37, pp. 31 472–31 479, 2018.
- [37] A. Chhetry, H. Yoon, and J. Y. Park, “A flexible and highly sensitive capacitive pressure sensor based on conductive fibers with a microporous dielectric for wearable electronics,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 5, no. 38, pp. 10 068–10 076, 2017.
- [38] S. Park, H. Kim, M. Vosgueritchian, S. Cheon, H. Kim, J. H. Koo, T. R. Kim, S. Lee, G. Schwartz, H. Chang *et al.*, “Stretchable energy-harvesting tactile electronic skin capable of differentiating multiple mechanical stimuli modes,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 43, pp. 7324–7332, 2014.
- [39] D. Kwon, T.-I. Lee, J. Shim, S. Ryu, M. S. Kim, S. Kim, T.-S. Kim, and I. Park, “Highly sensitive, flexible, and wearable pressure sensor based on a giant piezocapacitive effect of three-dimensional microporous elastomeric dielectric layer,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 8, no. 26, pp. 16 922–16 931, 2016.
- [40] S. Wan, H. Bi, Y. Zhou, X. Xie, S. Su, K. Yin, and L. Sun, “Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors,” *Carbon*, vol. 114, pp. 209–216, 2017.
- [41] K. Lee, J. Lee, G. Kim, Y. Kim, S. Kang, S. Cho, S. Kim, J.-K. Kim, W. Lee, D.-E. Kim *et al.*, “Rough-surface-enabled capacitive pressure sensors with 3d touch capability,” *Small*, vol. 13, no. 43, p. 1700368, 2017.
- [42] H. Kim, G. Kim, T. Kim, S. Lee, D. Kang, M.-S. Hwang, Y. Chae, S. Kang, H. Lee, H.-G. Park *et al.*, “Transparent, flexible, conformal capacitive pressure sensors with nanoparticles,” *Small*, vol. 14, no. 8, p. 1703432, 2018.
- [43] C. M. Boutry, A. Nguyen, Q. O. Lawal, A. Chortos, S. Rondeau-Gagné, and Z. Bao, “A sensitive and biodegradable pressure sensor array for cardiovascular monitoring,” *Advanced Materials*, vol. 27, no. 43, pp. 6954–6961, 2015.

- [44] S. Baek, H. Jang, S. Y. Kim, H. Jeong, S. Han, Y. Jang, D. H. Kim, and H. S. Lee, “Flexible piezocapacitive sensors based on wrinkled microstructures: toward low-cost fabrication of pressure sensors over large areas,” *RSC advances*, vol. 7, no. 63, pp. 39 420–39 426, 2017.
- [45] Y. Kim, S. Jang, B. J. Kang, and J. H. Oh, “Fabrication of highly sensitive capacitive pressure sensors with electrospun polymer nanofibers,” *Applied Physics Letters*, vol. 111, no. 7, p. 073502, 2017.
- [46] J. Duan, X. Liang, J. Guo, K. Zhu, and L. Zhang, “Ultra-stretchable and force-sensitive hydrogels reinforced with chitosan microspheres embedded in polymer networks,” *Advanced Materials*, vol. 28, no. 36, pp. 8037–8044, 2016.
- [47] G. Ge, Y. Cai, Q. Dong, Y. Zhang, J. Shao, W. Huang, and X. Dong, “A flexible pressure sensor based on rgo/polyaniline wrapped sponge with tunable sensitivity for human motion detection,” *Nanoscale*, vol. 10, no. 21, pp. 10 033–10 040, 2018.
- [48] J. Park, Y. Lee, J. Hong, M. Ha, Y.-D. Jung, H. Lim, S. Y. Kim, and H. Ko, “Giant tunneling piezoresistance of composite elastomers with interlocked microdome arrays for ultrasensitive and multimodal electronic skins,” *ACS nano*, vol. 8, no. 5, pp. 4689–4697, 2014.
- [49] Y. Huang, Y. Chen, X. Fan, N. Luo, S. Zhou, S.-C. Chen, N. Zhao, and C. P. Wong, “Wood derived composites for high sensitivity and wide linear-range pressure sensing,” *Small*, vol. 14, no. 31, p. 1801520, 2018.
- [50] H. Park, Y. R. Jeong, J. Yun, S. Y. Hong, S. Jin, S.-J. Lee, G. Zi, and J. S. Ha, “Stretchable array of highly sensitive pressure sensors consisting of polyaniline nanofibers and au-coated polydimethylsiloxane micropillars,” *ACS nano*, vol. 9, no. 10, pp. 9974–9985, 2015.
- [51] Q.-J. Sun, J. Zhuang, S. Venkatesh, Y. Zhou, S.-T. Han, W. Wu, K.-W. Kong, W.-J. Li, X. Chen, R. K. Li *et al.*, “Highly sensitive and ultrastable skin sensors for biopressure and bioforce measurements based on hierarchical microstructures,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 10, no. 4, pp. 4086–4094, 2018.

- [52] N. Luo, Y. Huang, J. Liu, S.-C. Chen, C. P. Wong, and N. Zhao, “Hollow-structured graphene–silicone-composite-based piezoresistive sensors: Decoupled property tuning and bending reliability,” *Advanced materials*, vol. 29, no. 40, p. 1702675, 2017.
- [53] G. Y. Bae, S. W. Pak, D. Kim, G. Lee, D. H. Kim, Y. Chung, and K. Cho, “Linearly and highly pressure-sensitive electronic skin based on a bioinspired hierarchical structural array,” *Advanced Materials*, vol. 28, no. 26, pp. 5300–5306, 2016.
- [54] B. Su, S. Gong, Z. Ma, L. W. Yap, and W. Cheng, “Mimosa-inspired design of a flexible pressure sensor with touch sensitivity,” *Small*, vol. 11, no. 16, pp. 1886–1891, 2015.
- [55] L. Persano, C. Dagdeviren, Y. Su, Y. Zhang, S. Girardo, D. Pisignano, Y. Huang, and J. A. Rogers, “High performance piezoelectric devices based on aligned arrays of nanofibers of poly (vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene),” *Nature communications*, vol. 4, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [56] S.-H. Park, H. B. Lee, S. M. Yeon, J. Park, and N. K. Lee, “Flexible and stretchable piezoelectric sensor with thickness-tunable configuration of electrospun nanofiber mat and elastomeric substrates,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 8, no. 37, pp. 24 773–24 781, 2016.
- [57] S. Ding, B. Han, X. Dong, X. Yu, Y. Ni, Q. Zheng, and J. Ou, “Pressure-sensitive behaviors, mechanisms and model of field assisted quantum tunneling composites,” *Polymer*, vol. 113, pp. 105–118, 2017.
- [58] B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, and J. Ou, “Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection,” *Measurement*, vol. 44, no. 9, pp. 1645–1650, 2011.
- [59] Y. Liu, H. Wang, W. Zhao, M. Zhang, H. Qin, and Y. Xie, “Flexible, stretchable sensors for wearable health monitoring: sensing mechanisms, materials, fabrication strategies and features,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 645, 2018.
- [60] T. Sekine, R. Sugano, T. Tashiro, J. Sato, Y. Takeda, H. Matsui, D. Kumaki, F. D. Dos Santos, A. Miyabo, and S. Tokito, “Fully printed wearable

- vital sensor for human pulse rate monitoring using ferroelectric polymer,” *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [61] S. Laflamme, F. Ubertini, H. Saleem, A. D’Alessandro, A. Downey, H. Ceylan, and A. L. Materazzi, “Dynamic characterization of a soft elastomeric capacitor for structural health monitoring,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 04014186, 2015.
- [62] S.-H. Shin, S. Ji, S. Choi, K.-H. Pyo, B. W. An, J. Park, J. Kim, J.-Y. Kim, K.-S. Lee, S.-Y. Kwon *et al.*, “Integrated arrays of air-dielectric graphene transistors as transparent active-matrix pressure sensors for wide pressure ranges,” *Nature communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [63] W. Choi, J. Lee, Y. Kyoung Yoo, S. Kang, J. Kim, and J. Hoon Lee, “Enhanced sensitivity of piezoelectric pressure sensor with microstructured polydimethylsiloxane layer,” *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 12, p. 123701, 2014.
- [64] H. Cao, S. K. Thakar, M. L. Oseng, C. M. Nguyen, C. Jebali, A. B. Kouki, and J.-C. Chiao, “Development and characterization of a novel interdigitated capacitive strain sensor for structural health monitoring,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 11, pp. 6542–6548, 2015.
- [65] A. Daubaras and M. Zilys, “Vehicle detection based on magneto-resistive magnetic field sensor,” *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 118, no. 2, pp. 27–32, 2012.
- [66] M. Mohiuddin and S. Van Hoa, “Electrical resistance of cnt-peek composites under compression at different temperatures,” *Nanoscale research letters*, vol. 6, no. 1, pp. 1–5, 2011.
- [67] B. Nie, R. Li, J. Cao, J. D. Brandt, and T. Pan, “Flexible transparent ionic film for interfacial capacitive pressure sensing,” *Advanced Materials*, vol. 27, no. 39, pp. 6055–6062, 2015.
- [68] C. Yang, L. Li, J. Zhao, J. Wang, J. Xie, Y. Cao, M. Xue, and C. Lu, “Highly sensitive wearable pressure sensors based on three-scale nested wrinkling microstructures of polypyrrole films,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 10, no. 30, pp. 25 811–25 818, 2018.

- [69] C.-W. Tsao, X.-C. Guo, and W.-W. Hu, “Highly stretchable conductive polypyrrole film on a three dimensional porous polydimethylsiloxane surface fabricated by a simple soft lithography process,” *RSC advances*, vol. 6, no. 114, pp. 113 344–113 351, 2016.
- [70] Z. Chen, T. Ming, M. M. Goulamaly, H. Yao, D. Nezich, M. Hempel, M. Hofmann, and J. Kong, “Enhancing the sensitivity of percolative graphene films for flexible and transparent pressure sensor arrays,” *Advanced Functional Materials*, vol. 26, no. 28, pp. 5061–5067, 2016.
- [71] J. Wang, J. Jiu, M. Nogi, T. Sugahara, S. Nagao, H. Koga, P. He, and K. Sugauma, “A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric interlayer containing silver nanowires,” *Nanoscale*, vol. 7, no. 7, pp. 2926–2932, 2015.
- [72] W. Hu, X. Niu, R. Zhao, and Q. Pei, “Elastomeric transparent capacitive sensors based on an interpenetrating composite of silver nanowires and polyurethane,” *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 8, p. 38, 2013.
- [73] Y. Huang, X. He, L. Gao, Y. Wang, C. Liu, and P. Liu, “Pressure-sensitive carbon black/graphene nanoplatelets-silicone rubber hybrid conductive composites based on a three-dimensional polydopamine-modified polyurethane sponge,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 28, no. 13, pp. 9495–9504, 2017.
- [74] Y. Pang, H. Tian, L. Tao, Y. Li, X. Wang, N. Deng, Y. Yang, and T.-L. Ren, “Flexible, highly sensitive, and wearable pressure and strain sensors with graphene porous network structure,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 8, no. 40, pp. 26 458–26 462, 2016.
- [75] J. Xue, J. Chen, J. Song, L. Xu, and H. Zeng, “Wearable and visual pressure sensors based on zn 2 geo 4@ polypyrrole nanowire aerogels,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 5, no. 42, pp. 11 018–11 024, 2017.
- [76] S. Yao and Y. Zhu, “Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires,” *Nanoscale*, vol. 6, no. 4, pp. 2345–2352, 2014.
- [77] M. Akiyama, Y. Morofuji, T. Kamohara, K. Nishikubo, M. Tsubai, O. Fukuda, and N. Ueno, “Flexible piezoelectric pressure sensors using ori-

- ented aluminum nitride thin films prepared on polyethylene terephthalate films,” *Journal of applied physics*, vol. 100, no. 11, p. 114318, 2006.
- [78] Z. Chen, Z. Wang, X. Li, Y. Lin, N. Luo, M. Long, N. Zhao, and J.-B. Xu, “Flexible piezoelectric-induced pressure sensors for static measurements based on nanowires/graphene heterostructures,” *Acs Nano*, vol. 11, no. 5, pp. 4507–4513, 2017.
- [79] A. V. Shirinov and W. K. Schomburg, “Pressure sensor from a pvdf film,” *Sensors and actuators A: Physical*, vol. 142, no. 1, pp. 48–55, 2008.
- [80] T. T. Dao, T. Matsushima, and H. Murata, “Organic nonvolatile memory transistors based on fullerene and an electron-trapping polymer,” *Organic Electronics*, vol. 13, no. 11, pp. 2709–2715, 2012.
- [81] G. Schwartz, B. C.-K. Tee, J. Mei, A. L. Appleton, D. H. Kim, H. Wang, and Z. Bao, “Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring,” *Nature communications*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- [82] Y. Zang, F. Zhang, D. Huang, X. Gao, C.-a. Di, and D. Zhu, “Flexible suspended gate organic thin-film transistors for ultra-sensitive pressure detection,” *Nature communications*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, 2015.
- [83] M.-J. Yin, Z. Yin, Y. Zhang, Q. Zheng, and A. P. Zhang, “Micropatterned elastic ionic polyacrylamide hydrogel for low-voltage capacitive and organic thin-film transistor pressure sensors,” *Nano Energy*, vol. 58, pp. 96–104, 2019.
- [84] N. T. Tien, S. Jeon, D.-I. Kim, T. Q. Trung, M. Jang, B.-U. Hwang, K.-E. Byun, J. Bae, E. Lee, J. B.-H. Tok *et al.*, “A flexible bimodal sensor array for simultaneous sensing of pressure and temperature,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 5, pp. 796–804, 2014.
- [85] T. Someya, T. Sekitani, S. Iba, Y. Kato, H. Kawaguchi, and T. Sakurai, “A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, no. 27, pp. 9966–9970, 2004.
- [86] T. Someya, Y. Kato, T. Sekitani, S. Iba, Y. Noguchi, Y. Murase, H. Kawaguchi, and T. Sakurai, “Conformable, flexible, large-area networks

- of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102, no. 35, pp. 12 321–12 325, 2005.
- [87] T. Hassinen, K. Eiroma, T. Mäkelä, and V. Ermolov, “Printed pressure sensor matrix with organic field-effect transistors,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 236, pp. 343–348, 2015.
- [88] S. H. Nam, P. J. Jeon, S. W. Min, Y. T. Lee, E. Y. Park, and S. Im, “Highly sensitive non-classical strain gauge using organic heptazole thin-film transistor circuit on a flexible substrate,” *Advanced Functional Materials*, vol. 24, no. 28, pp. 4413–4419, 2014.
- [89] Z. Liu, Z. Yin, J. Wang, and Q. Zheng, “Polyelectrolyte dielectrics for flexible low-voltage organic thin-film transistors in highly sensitive pressure sensing,” *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 1, p. 1806092, 2019.
- [90] S. Lai, P. Cosseddu, A. Bonfiglio, and M. Barbaro, “Ultralow voltage pressure sensors based on organic fets and compressible capacitors,” *IEEE electron device letters*, vol. 34, no. 6, pp. 801–803, 2013.
- [91] A. Spanu, L. Pinna, F. Viola, L. Seminara, M. Valle, A. Bonfiglio, and P. Cosseddu, “A high-sensitivity tactile sensor based on piezoelectric polymer pvdf coupled to an ultra-low voltage organic transistor,” *Organic Electronics*, vol. 36, pp. 57–60, 2016.
- [92] T. Yokota, T. Sekitani, T. Tokuhara, N. Take, U. Zschieschang, H. Klauk, K. Takimiya, T.-C. Huang, M. Takamiya, T. Sakurai *et al.*, “Sheet-type flexible organic active matrix amplifier system using pseudo-cmos circuits with floating-gate structure,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, no. 12, pp. 3434–3441, 2012.
- [93] S. P. White, K. D. Dorfman, and C. D. Frisbie, “Operating and sensing mechanism of electrolyte-gated transistors with floating gates: Building a platform for amplified biodetection,” *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 120, no. 1, pp. 108–117, 2016.
- [94] P. Cosseddu, S. Lai, M. Barbaro, and A. Bonfiglio, “Ultra-low voltage, organic thin film transistors fabricated on plastic substrates by a highly reproducible process,” *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 9, p. 61, 2012.

- [95] C. H. Kim, A. Castro-Carranza, M. Estrada, A. Cerdeira, Y. Bonnassieux, G. Horowitz, and B. Iñiguez, “A compact model for organic field-effect transistors with improved output asymptotic behaviors,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 3, pp. 1136–1141, 2013.
- [96] J. Reeder, M. Kaltenbrunner, T. Ware, D. Arreaga-Salas, A. Avendano-Bolivar, T. Yokota, Y. Inoue, M. Sekino, W. Voit, T. Sekitani *et al.*, “Mechanically adaptive organic transistors for implantable electronics,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 29, pp. 4967–4973, 2014.
- [97] S. Hannah, A. Davidson, I. Glesk, D. Uttamchandani, R. Dahiya, and H. Gleskova, “Multifunctional sensor based on organic field-effect transistor and ferroelectric poly (vinylidene fluoride trifluoroethylene),” *Organic Electronics*, vol. 56, pp. 170–177, 2018.
- [98] A. Hills, E. Hennig, M. McDonald, and O. Bar-Or, “Plantar pressure differences between obese and non-obese adults: a biomechanical analysis,” *International journal of obesity*, vol. 25, no. 11, p. 1674, 2001.
- [99] X. Hu, L. Yang, and W. Xiong, “A novel wireless sensor network frame for urban transportation,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 2, no. 6, pp. 586–595, 2015.
- [100] N. K. Jain, R. Saini, and P. Mittal, “A review on traffic monitoring system techniques,” in *Soft Computing: Theories and Applications*. Springer, 2019, pp. 569–577.
- [101] V. Markevicius, D. Navikas, M. Zilyys, D. Andriukaitis, A. Valinevicius, and M. Cepenass, “Dynamic vehicle detection via the use of magnetic field sensors,” *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 78, 2016.
- [102] A. Daubaras, V. Markevicius, D. Navikas, and M. Zilyys, “Analysis of magnetic field disturbance curve for vehicle presence detection,” *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 20, no. 5, pp. 80–83, 2014.
- [103] T. M. Kwon, “Signal processing of piezoelectric weight-in-motion systems,” in *Proceedings of the Fifth IASTED International Conference on Circuits, Signals, and Systems (CSS 2007)*, 2007, pp. 233–238.

- [104] Y. Huang, L. Wang, Y. Hou, W. Zhang, and Y. Zhang, “A prototype iot based wireless sensor network for traffic information monitoring,” *International journal of pavement research and technology*, vol. 11, no. 2, pp. 146–152, 2018.
- [105] B. Han, S. Ding, Y. Yu, X. Yu, S. Dong, and J. Ou, “Design and implementation of a multiple traffic parameter detection sensor developed with quantum tunneling composites,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 9, pp. 4845–4852, 2015.
- [106] L. Cheng, Q. Li, and H. Zhang, “Capacitive flexible weighing sensor for wim system,” *J. Harbin Inst. Technol.*, vol. 41, pp. 149–153, 2009.
- [107] W. Crosbie and A. Nicol, “Reciprocal aided gait in paraplegia,” *Spinal Cord*, vol. 28, no. 6, p. 353, 1990.
- [108] F. Neaga, D. Moga, D. Petreus, M. Munteanu, and N. Stroia, “A wireless system for monitoring the progressive loading of lower limb in post-traumatic rehabilitation,” in *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology*. Springer, 2011, pp. 54–59.
- [109] C. Wada, Y. Sugimura, F. Wada, K. Hachisuka, T. Ienaga, Y. Kimuro, and T. Tsuji, “Development of a rehabilitation support system with a shoe-type measurement device for walking,” in *Proceedings of SICE Annual Conference 2010*. IEEE, 2010, pp. 2534–2537.
- [110] S. R. Edgar, T. Swyka, G. Fulk, and E. S. Sazonov, “Wearable shoe-based device for rehabilitation of stroke patients,” in *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*. IEEE, 2010, pp. 3772–3775.
- [111] T. Salpavaara, J. Verho, J. Lekkala, and J. Halttunen, “Wireless insole sensor system for plantar force measurements during sport events,” in *Proceedings of IMEKO XIX World Congress on Fundamental and Applied Metrology*, 2009, pp. 2118–2123.
- [112] A. Downey, A. D’Alessandro, F. Ubertini, and S. Laflamme, “Crack detection in rc structural components using a collaborative data fusion approach based on smart concrete and large-area sensors,” in *Sensors and*

Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018, vol. 10598. International Society for Optics and Photonics, 2018, p. 105983B.

- [113] E. Teomete, “Measurement of crack length sensitivity and strain gage factor of carbon fiber reinforced cement matrix composites,” *Measurement*, vol. 74, pp. 21–30, 2015.
- [114] M.-J. Lim, H. K. Lee, I.-W. Nam, and H.-K. Kim, “Carbon nanotube/cement composites for crack monitoring of concrete structures,” *Composite Structures*, vol. 180, pp. 741–750, 2017.
- [115] Y. Hu, L. Huang, W. S. Rieutort-Louis, J. Sanz-Robinson, J. C. Sturm, S. Wagner, and N. Verma, “A self-powered system for large-scale strain sensing by combining cmos ics with large-area electronics,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 49, no. 4, pp. 838–850, 2014.
- [116] S. Tung and B. Glisic, “Sensing sheet: the response of full-bridge strain sensors to thermal variations for detecting and characterizing cracks,” *Measurement Science and Technology*, vol. 27, no. 12, p. 124010, 2016.
- [117] M. Schulz and M. Sundaresan, “Smart sensor system for structural condition monitoring of wind turbines: 30 may 2002–30 april 2006,” National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), Tech. Rep., 2006.
- [118] V. Giurgiutiu, A. Zagrai, and J. Bao, “Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, no. 9-10, pp. 673–687, 2004.
- [119] N. Sharp, A. Kuntz, C. Brubaker, S. Amos, W. Gao, G. Gupta, A. Mohite, C. Farrar, and D. Mascareñas, “A bio-inspired asynchronous skin system for crack detection applications,” *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 5, p. 055020, 2014.
- [120] B. Zhang, Z. Zhou, K. Zhang, G. Yan, and Z. Xu, “Sensitive skin and the relative sensing system for real-time surface monitoring of crack in civil infrastructure,” *Journal of intelligent material systems and structures*, vol. 17, no. 10, pp. 907–917, 2006.

- [121] M. Cao, M. Wang, L. Li, H. Qiu, M. A. Padhiar, and Z. Yang, “Wearable rgo-ag nw@ cotton fiber piezoresistive sensor based on the fast charge transport channel provided by ag nanowire,” *Nano energy*, vol. 50, pp. 528–535, 2018.
- [122] S. Gong, W. Schwalb, Y. Wang, Y. Chen, Y. Tang, J. Si, B. Shirinzadeh, and W. Cheng, “A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires,” *Nature communications*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [123] F. Yin, J. Yang, H. Peng, and W. Yuan, “Flexible and highly sensitive artificial electronic skin based on graphene/polyamide interlocking fabric,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 6, no. 25, pp. 6840–6846, 2018.
- [124] D. Lee, H. Lee, Y. Jeong, Y. Ahn, G. Nam, and Y. Lee, “Highly sensitive, transparent, and durable pressure sensors based on sea-urchin shaped metal nanoparticles,” *Advanced Materials*, vol. 28, no. 42, pp. 9364–9369, 2016.
- [125] M. Jian, K. Xia, Q. Wang, Z. Yin, H. Wang, C. Wang, H. Xie, M. Zhang, and Y. Zhang, “Flexible and highly sensitive pressure sensors based on bionic hierarchical structures,” *Advanced Functional Materials*, vol. 27, no. 9, p. 1606066, 2017.
- [126] J. Shi, L. Wang, Z. Dai, L. Zhao, M. Du, H. Li, and Y. Fang, “Multiscale hierarchical design of a flexible piezoresistive pressure sensor with high sensitivity and wide linearity range,” *Small*, vol. 14, no. 27, p. 1800819, 2018.
- [127] W. Chen, X. Gui, B. Liang, R. Yang, Y. Zheng, C. Zhao, X. Li, H. Zhu, and Z. Tang, “Structural engineering for high sensitivity, ultrathin pressure sensors based on wrinkled graphene and anodic aluminum oxide membrane,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 28, pp. 24 111–24 117, 2017.
- [128] Z. Wang, S. Wang, J. Zeng, X. Ren, A. J. Chee, B. Y. Yiu, W. C. Chung, Y. Yang, A. C. Yu, R. C. Roberts *et al.*, “High sensitivity, wearable, piezoresistive pressure sensors based on irregular microhump structures and its applications in body motion sensing,” *Small*, vol. 12, no. 28, pp. 3827–3836, 2016.

- [129] X. Xu, R. Wang, P. Nie, Y. Cheng, X. Lu, L. Shi, and J. Sun, “Copper nanowire-based aerogel with tunable pore structure and its application as flexible pressure sensor,” *ACS applied materials & interfaces*, vol. 9, no. 16, pp. 14 273–14 280, 2017.
- [130] D. J. Lipomi, M. Vosgueritchian, B. C. Tee, S. L. Hellstrom, J. A. Lee, C. H. Fox, and Z. Bao, “Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes,” *Nature nanotechnology*, vol. 6, no. 12, p. 788, 2011.
- [131] Y. Joo, J. Byun, N. Seong, J. Ha, H. Kim, S. Kim, T. Kim, H. Im, D. Kim, and Y. Hong, “Silver nanowire-embedded pdms with a multiscale structure for a highly sensitive and robust flexible pressure sensor,” *Nanoscale*, vol. 7, no. 14, pp. 6208–6215, 2015.
- [132] Y. Quan, X. Wei, L. Xiao, T. Wu, H. Pang, T. Liu, W. Huang, S. Wu, S. Li, and Z. Chen, “Highly sensitive and stable flexible pressure sensors with micro-structured electrodes,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 699, pp. 824–831, 2017.
- [133] M. Kang, J. H. Park, K. I. Lee, J. W. Cho, J. Bae, B. K. Ju, and C. S. Lee, “Fully flexible and transparent piezoelectric touch sensors based on zno nanowires and batio3-added sio2 capping layers,” *physica status solidi (a)*, vol. 212, no. 9, pp. 2005–2011, 2015.
- [134] J. S. Lee, K.-Y. Shin, O. J. Cheong, J. H. Kim, and J. Jang, “Highly sensitive and multifunctional tactile sensor using free-standing zno/pvdf thin film with graphene electrodes for pressure and temperature monitoring,” *Scientific reports*, vol. 5, p. 7887, 2015.
- [135] C. Dagdeviren, Y. Su, P. Joe, R. Yona, Y. Liu, Y.-S. Kim, Y. Huang, A. R. Damadoran, J. Xia, L. W. Martin *et al.*, “Conformable amplified lead zirconate titanate sensors with enhanced piezoelectric response for cutaneous pressure monitoring,” *Nature communications*, vol. 5, no. 1, pp. 1–10, 2014.