

**BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**



**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG CẢM BIẾN ĐIỆN DUNG
ỨNG DỤNG PHÁT HIỆN ĐỘ NGHIÊNG VÀ VI HẠT**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử

Hà Nội - 2020

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan dưới đây là luận án tốt nghiệp của riêng tôi, dưới sự hướng dẫn của **GS.TS. Nguyễn Bình** – Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Tất cả những kết quả và số liệu trong luận án này là trung thực và có được từ những nghiên cứu mà tôi và nhóm nghiên cứu của tôi đã thực hiện trong quá trình làm luận án.

Hà Nội, ngày tháng 08 năm 2020
Nghiên cứu sinh

Trần Thị Thúy Hà

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình thực hiện luận án : "**Nghiên cứu phát triển hệ thống cảm biến điện dung ứng dụng phát hiện độ nghiêng và vi hạt**", Tôi đã nhận được rất nhiều sự giúp đỡ, tạo điều kiện của Ban lãnh đạo Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Khoa Đào tạo sau Đại học - Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông, Giảng viên, Bộ môn MEMS, Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội. Tôi xin bày tỏ lòng cảm ơn chân thành về sự giúp đỡ này.

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới Giáo sư, Tiến sĩ Nguyễn Bình, Phó Giáo sư, Tiến Sĩ Bùi Thanh Tùng - những người đã tận tình hướng dẫn để tôi có thể hoàn thành luận án này. Đồng thời, tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành tới nhóm nghiên cứu của tôi đã đồng hành và hỗ trợ tôi trong quá trình nghiên cứu.

Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành tới các đồng nghiệp trong khoa Kỹ thuật Điện tử 1, Học viện Công Nghệ Bưu chính Viễn thông, cũng như các đồng nghiệp ở khoa Điện tử-Viễn thông, Đại học Công Nghệ, Đại Học Quốc Gia Hà Nội đã hỗ trợ tôi trong suốt quá trình làm luận án.

Nhân dịp này, Tôi cũng xin được gửi lời cảm ơn chân thành tới gia đình, bạn bè đã luôn bên cạnh, cổ vũ, động viên, giúp đỡ Tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án tiến sĩ.

Hà Nội, ngày tháng 08 năm 2020

Nghiên cứu sinh

LỜI MỞ ĐẦU

Lý do nghiên cứu

Ngày nay, hệ thống vi cơ điện tử được biết đến là một công cụ hữu ích trong nhiều lĩnh vực: công nghiệp, y học, sinh học... So với các kỹ thuật cảm biến khác, cảm biến dùng trong hệ thống vi cơ có độ nhạy cao, giám sát tại chỗ và chi phí thấp.

Công nghệ vi cơ điện tử là sự kết hợp, giao thoa của nhiều lĩnh vực, từ vật lý cổ điển, cơ hóa-lỏng (chemistry—fluid mechanics), tĩnh điện, nhiệt động học, cơ học thống kê (statistical mechanics), sự đàn hồi đến vật lý polyme ... Ngoài ra hệ thống vi cơ điện tử có kích thước rất nhỏ nên có thể loại bỏ được độ phi tuyến trong các hiện tượng vật lý.

Cảm biến điện dung đang trở thành một công nghệ phổ biến để thay thế các phương pháp phát hiện quang học và thiết kế cơ khí cho các ứng dụng như phát hiện cử chỉ, phát hiện đối tượng, phân tích vật liệu và cảm nhận mức chất lỏng. Những ưu điểm vượt trội của cảm biến điện dung so với các phương pháp phát hiện khác là nó có thể cảm nhận được nhiều loại vật liệu khác nhau (như: da, nhựa, kim loại, chất lỏng), nó có thể cảm nhận được đối tượng mà không cần tiếp xúc và không bị giới hạn kích thước, đồng thời nó có khả năng cảm nhận với một khoảng cách lớn, kích thước cảm biến nhỏ.

Trong những thập kỷ qua đã ghi nhận được sự phát triển của hệ thống cảm biến: nhiều nguyên mẫu của hệ thống được phát minh, sự phức tạp của thiết bị, kỹ thuật chế tạo và cảm biến đã được phát triển hoặc cải thiện. Tuy nhiên, cảm biến điện dung sử dụng công nghệ vi cơ điện tử vẫn còn trong giai đoạn hình thành và phát triển, do vậy, vẫn còn nhiều cơ hội để áp dụng cho nhiều lĩnh vực ví dụ như phát hiện độ nghiêng hay phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng...

Mục đích nghiên cứu

Luận án nghiên cứu, thiết kế và xây dựng hệ thống cảm biến điện dung với những mục đích:

- Phát hiện độ nghiêng
- Phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Luận án nghiên cứu, xây dựng và thiết kế cảm biến điện dung vi sai không tiếp xúc cho ứng dụng đo độ nghiêng và phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

Ý nghĩa khoa học của luận án mà nghiên cứu sinh hướng tới là xây dựng, thiết kế và chế tạo cảm biến điện dung vi sai dùng để phát hiện độ nghiêng cũng

như cảm nhận được sự thay đổi môi trường trong kênh vi lỏng để từ đó phát hiện ra các đối tượng xuất hiện trong vi kênh. Từ các mô hình, chương trình tính toán và chương trình mô phỏng, NCS và nhóm nghiên cứu đã xây dựng thành công hệ thống, đánh giá độ tin cậy, phạm vi hoạt động để đưa ra cấu trúc tối ưu.

Ý nghĩa thực tiễn của luận án mà nghiên cứu sinh hy vọng đạt được là các cấu trúc cảm biến điện dung vi sai không tiếp xúc mà luận án đưa ra có thể cải thiện được độ chính xác, tăng phạm vi hoạt động, giảm thiểu kích thước, chi phí và có khả năng ứng dụng cấu trúc trong nhiều lĩnh vực khoa học cũng như đời sống.

Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp thiết kế và mô phỏng: Các cấu trúc MEMS được thiết kế dựa trên phần mềm LEdit và được mô phỏng dựa trên phần mềm mô phỏng phần tử hữu hạn. Các mạch điện được thiết kế dựa trên các phần mềm Orcad và Altium.
- Phương pháp và kỹ thuật chế tạo: Sử dụng công nghệ vi chế tạo MEMS trên nền silicon, thủy tinh, vật liệu polymer, ITO và kim loại. Sử dụng các kỹ thuật vi chế tạo khối và vi chế tạo mặt trong các quy trình chế tạo các kênh dẫn, các bộ chấp hành, các bộ cảm biến.

Cấu trúc của luận án

Ứng dụng của hệ thống cảm biến điện dung trải rộng trong nhiều lĩnh vực như y tế, sinh học, môi trường, công nghiệp.... Trước những yêu cầu thực tế đó, nghiên cứu sinh đã thực hiện nghiên cứu, xây dựng và thiết kế hệ thống cảm biến điện dung dùng để phát hiện độ nghiêng và vi hạt trong kênh vi lỏng.

Nội dung luận án bao gồm phần mở đầu, 3 chương và kết luận được bố cục như sau:

- Chương 1 trình bày tổng quan về các vấn đề nghiên cứu, lý thuyết cơ bản về cảm biến điện dung.
- Chương 2 luận án trình bày phương pháp thiết kế, mô phỏng và chế tạo cảm biến điện dung dùng để phát hiện độ nghiêng.
- Chương 3 luận án trình bày phương pháp thiết kế, mô phỏng và chế tạo cảm biến điện dung dùng để phát hiện vi hạt.
- Phần kết luận đưa ra đóng góp của nghiên cứu sinh trong luận án và đưa ra những vấn đề mở trong tương lai.

Mục lục

Mục lục	vi
Chương 1. Tổng quan về vấn đề nghiên cứu	3
1.1 Mở đầu	3
1.2 Nguyên tắc hoạt động cơ bản của cảm biến điện dung	4
1.3 Cảm biến điện dung đơn	6
1.4 Cảm biến điện dung vi sai	7
1.4.1 Phương pháp đo điện dung	8
1.4.2 Phương pháp giải điều chế	11
1.5 Một số đặc điểm của cảm biến điện dung	13
1.6 Các nghiên cứu liên quan đến đề tài luận án	14
1.6.1 Đề xuất thứ nhất của luận án	14
1.6.2 Đề xuất thứ hai của luận án	20
1.7 Hướng nghiên cứu được đề xuất trong luận án	24
1.8 Kết luận chương	25
Chương 2. Cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng	27
2.1 Mở đầu	27
2.2 Cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục	28
2.2.1 Giới thiệu	28
2.2.2 Thiết kế và nguyên lý làm việc của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng dựa trên cấu trúc hai pha lỏng/khí	31
2.2.3 Mô phỏng sự hoạt động của cấu trúc	35
2.2.4 Mô phỏng mối quan hệ giữa điện dung và góc nghiêng theo trục x và trục y	37
2.2.5 Khảo sát các điện cực của cảm biến nghiêng khi quay theo trục x	38

2.2.6	Khảo sát các điện cực của cảm biến nghiêng khi quay theo trục y	40
2.2.7	Thực nghiệm	43
2.2.8	Độ nhạy của cấu trúc cảm biến	50
2.2.9	Nhận xét	52
2.3	Cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục in 3D	52
2.3.1	Cấu trúc và mô phỏng cảm biến nghiêng	52
2.3.2	Thực nghiệm	56
2.4	Kết luận chương	61
Chương 3. Cảm biến điện dung phát hiện vi hạt		64
3.1	Mở đầu	64
3.2	Thiết bị vi sai phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc để phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng	67
3.2.1	Giới thiệu	67
3.2.2	Nguyên tắc làm việc của bộ phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc - DC^4D	70
3.2.3	Chế tạo và thiết lập phép đo	72
3.2.4	Phát hiện đối tượng	76
3.2.5	Nhận xét	80
3.3	Thao tác tế bào trong chất lỏng dựa trên nguyên lý DEP	80
3.3.1	Mở đầu	80
3.3.2	Thao tác DEP	82
3.4	Phương pháp thực hiện phát hiện và bắt giữ tế bào Hela	85
3.4.1	Mở đầu	85
3.4.2	Phương pháp thực hiện	85
3.4.3	Thiết kế và mô phỏng	87
3.4.4	Kết quả và thảo luận	89
3.4.5	Nhận xét	92
3.5	Kết luận chương	93
Kết luận		98
Các công trình khoa học		100
Tài liệu tham khảo		112

Danh sách hình vẽ

1.1	Tụ điện song song	4
1.2	Trường điện từ của tụ điện với bản cực song song.	5
1.3	Mạch điện điển hình của tụ điện vi sai.	8
1.4	Mạch điện sử dụng bộ khuếch đại chuyển trở kháng để phát hiện dòng qua tụ điện.	9
1.5	Mạch điện sử dụng bộ khuếch đại chuyển trở kháng có thêm tụ hồi tiếp để phát hiện dòng qua tụ điện.	10
1.6	Mạch điện sử dụng tụ điện vi sai để đo điện áp đầu ra.	10
1.7	Mạch điện sử dụng phương pháp phát hiện đỉnh để giải điều chế tín hiệu điện dung.	12
1.8	Sơ đồ khối hệ thống thực hiện phép đo điện dung.	13
1.9	Sơ đồ cấu trúc và mạch tương đương của cấu trúc C^4D thông thường.	22
2.1	Thiết kế cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hình trụ	32
2.2	Nguyên lý làm việc của cảm biến nghiêng.	34
2.3	Sự phân bố điện trường của cảm biến.	36
2.4	Mối quan hệ giữa điện dung vi sai ΔC_1 , ΔC_2 và góc nghiêng khi cảm biến nghiêng theo trục x và trục y	38
2.5	a) Mối quan hệ giữa dải làm việc của cảm biến và kích thước W_1 ; b) Mối quan hệ giữa kích thước L_2 và độ nhạy của cảm biến.	39
2.6	Điện dung thay đổi khi cấu trúc quay theo trục x	40
2.7	Đồ thị khảo sát dải làm việc khi thay đổi kích thước W_2	41
2.8	Đồ thị khảo sát độ nhạy cảm biến khi thay đổi kích thước W_2	41
2.9	Đồ thị khảo sát độ nhạy cảm biến khi thay đổi kích thước L_3	42
2.10	Đồ thị khảo sát sự thay đổi giá trị điện dung khi cảm biến nghiêng theo trục y	43

2.11	Thiết lập phép đo. a) Cảm biến được gắn trên hệ quay; b) Cảm biến và mạch xử lý được đóng gói trong hộp kín; c) Bảng mạch xử lý tín hiệu.	44
2.12	Sơ đồ khối của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng.	45
2.13	Sơ đồ mạch điện xử lý tín hiệu của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng.	46
2.14	Sự thay đổi của điện áp ra tương ứng với góc nghiêng theo trục x, y	47
2.15	Sự thay đổi của điện áp ra tương ứng với góc nghiêng trên trục x (từ -70^0 đến $+70^0$).	47
2.16	Sự thay đổi của điện áp ra tương ứng với góc nghiêng trên trục y (từ -30^0 đến $+30^0$).	48
2.17	Sự thay đổi của điện áp ra và nhiễu xuyên kênh khi cảm biến nghiêng trong dải 0^0 đến 90^0	49
2.18	Đáp ứng thời gian của cảm biến.	49
2.19	Cấu trúc của cảm biến nghiêng: a) Dạng hình học, (a1) Nhìn từ dưới lên, (a2) Nhìn toàn cảnh; (b) Các cặp tụ điện cảm biến trên trục x (C_1, C_2) và trục y (C_3, C_4).	53
2.20	Dải làm việc của cảm biến tương ứng với thể tích nước chứa trong hình cầu.	54
2.21	Sự phân bố điện trường của cảm biến tại góc 0^0 (bên trái) và góc 20^0 (bên phải)	54
2.22	Khảo sát hoạt động của cảm biến trong dải đo -180^0 đến $+180^0$	55
2.23	Khảo sát giá trị vi sai của cặp tụ C_1, C_2 trên trục x và cặp tụ C_3, C_4 trên trục y	55
2.24	Sự thay đổi của điện dung vi sai theo góc nghiêng trong phạm vi hoạt động của cảm biến từ -70^0 đến $+70^0$	56
2.25	Cấu trúc của cảm biến điện dung	57
2.26	Nguyên mẫu của cảm biến: a) Nhìn từ dưới lên; b) Nhìn từ trên xuống	58
2.27	Thiết lập thực hiện phép đo góc nghiêng	59
2.28	Sơ đồ khối của mạch đo góc nghiêng	59
2.29	Mối quan hệ giữa điện áp ra và góc nghiêng theo trục x và trục y	60
2.30	Mối quan hệ giữa điện áp ra và góc nghiêng theo trục x và trục y trong dải -70^0 đến $+70^0$	60
3.1	Cấu trúc cảm biến phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc đồng phẳng ($D - C^4D$).	69
3.2	Sơ đồ cấu trúc của C^4D	70
3.3	Sơ đồ cấu trúc và mạch tương đương của cấu trúc DC^4D	71

3.4	Cấu trúc đề xuất chip vi lỏng: a) Mặt trên; b) Mặt cắt ngang; c) Kích thước của các điện cực và kênh dẫn.	73
3.5	Quy trình chế tạo chip DC^4D : a) Tạo khuôn; b) Ủ nhiệt; c) Dỡ khuôn; d) Làm lắng đọng; e) Loại bỏ phần thừa; f) Lắng đọng lớp cách ly; g) Kích hoạt bề mặt; h) Hàn gắn chip.	73
3.6	Thiết lập hệ thống đo thực nghiệm.	75
3.7	Thiết lập hệ đo thực tế.	75
3.8	Hình ảnh nguyên mẫu chip vi lỏng sau khi được chế tạo.	76
3.9	Chip vi lỏng được tích hợp bởi cấu trúc DC^4D	77
3.10	Điện dung thay đổi theo vị trí của vi hạt trong kênh dẫn.	77
3.11	Điện dung thay đổi theo bán kính của vi hạt trong kênh dẫn.	78
3.12	Mối quan hệ giữa điện dung và chiều dài của bong bóng khí.	79
3.13	Mối quan hệ giữa điện dung và độ dày lớp bảo vệ.	79
3.14	Hình ảnh thu được của tế bào sống khi đi qua chip vi lỏng	80
3.15	Phác họa của thiết bị vi lỏng cho các thao tác tế bào mục tiêu và phát hiện mục tiêu.	86
3.16	Sơ đồ vi mạch của cấu trúc.	88
3.17	Kết quả mô phỏng của bình phương điện trường (E^2).	90
3.18	Kết quả mô phỏng về sự dịch chuyển của các tế bào HeLa trong mẫu máu dưới sự tác động của điện trường bước ($16V$ đỉnh-đỉnh; $1MHz$).	91
3.19	Phân phối của cường độ điện trường giữa điện cực cảm biến trái và điện cực trung tâm khi một tế bào HeLa được đặt tại các điện cực chụp.	92
3.20	Mối quan hệ giữa điện dung vi sai và số lượng tế bào nhận biết được. Trục x là số lượng tế bào, trục y là giá trị điện dung vi sai. . .	93

Danh sách bảng

1.1	Tóm tắt đặc điểm của một số cảm biến nghiêng	16
2.1	Thông số của cấu trúc cảm biến	33
2.2	Thông số của cảm biến được sử dụng trong mô phỏng cấu trúc	36
2.3	Các thông số của cảm biến nghiêng hai trục	57
3.1	Thông số của cấu trúc	74
3.2	Thông số của cảm biến được sử dụng trong mô phỏng cấu trúc	88
3.3	Các đặc tính của tế bào hồng cầu và tế bào HeLa	89

Danh mục viết tắt

Từ viết tắt	Nghĩa tiếng Anh	Nghĩa tiếng Việt
2D	2 Dimensional	2 chiều
3D	3 Dimensional	3 chiều
C^4D	Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection	Phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc
DC^4D	Differential Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection	Phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ vi sai không tiếp xúc
FEM	Finite Element Method	Phương pháp phần tử hữu hạn
FRET	Fluorescent Resonance Energy Transfer	Truyền năng lượng cộng hưởng huỳnh quang
GFP	Green Fluorescent Protein	Protein huỳnh quang màu xanh lá
GS	Glass Substrate	Đế thủy tinh
ITO	Indium Tin Oxide	Vật liệu oxit bán dẫn
LOC	Lab on chip	Phòng thí nghiệm trên chip
MEMS	Microelectromechanical Systems	Hệ thống vi cơ điện tử
NMR	Nuclear Magnetic Resonance	Cộng hưởng từ hạt nhân
PCB	Printed Circuit Board	Bản mạch in
SPR	Surface Plasmon Resonance	Cộng hưởng Plasmon bề mặt
YFP	Yellow Fluorescent Protein	Protein huỳnh quang màu vàng

Tổng quan về vấn đề nghiên cứu

1.1 Mở đầu

Hiện nay, cảm biến điện dung được sử dụng rộng rãi với nhiều ứng dụng khác nhau trong các lĩnh vực xây dựng, chế tạo máy, robot, an ninh quốc phòng... Nhiều cấu trúc của cảm biến điện dung dựa trên nhiều nguyên lý khác nhau với nhiều ứng dụng khác nhau đã được thiết kế, chế tạo và thương mại hóa. Cùng với sự phát triển của công nghệ vi cơ điện tử (MEMs), cảm biến điện dung dựa trên công nghệ này cũng được phát triển và có nhiều ứng dụng trong khoa học công nghệ cũng như trong đời sống. Các loại cảm biến điện dung dựa trên công nghệ MEMs có cấu trúc tinh tế, nhỏ gọn...

Cảm biến điện dung có thể phát hiện và đo liên tiếp những vật dẫn điện hoặc những vật có chất điện môi khác với không khí. Ví dụ như ta có thể nhận biết được sự thay đổi mức chất lỏng giữa hai cảm biến bằng cách theo dõi sự thay đổi vật liệu chất điện môi. Sự thay đổi chất điện môi sẽ gây ra sự thay đổi giá trị điện dung của cảm biến.

1.2 Nguyên tắc hoạt động cơ bản của cảm biến điện dung

Tụ điện là linh kiện dùng để lưu trữ điện tích. Một tụ điện lý tưởng có điện tích ở bản cực song song (hình 1.1) tỉ lệ thuận với điện áp đặt trên nó theo công thức:

$$Q = C \times V[C] \quad (1.1)$$

Trong đó, C là điện dung của tụ điện có giá trị bằng:

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times A}{d} \quad (1.2)$$

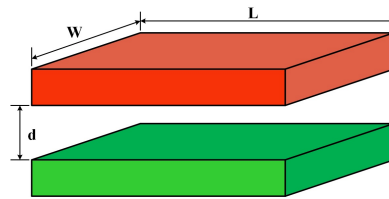
Trong đó:

ϵ_r là hằng số điện môi tương đối của chất điện môi.

ϵ_0 là hằng số điện môi tuyệt đối của không khí hay chân không (8.85×10^{-12}).

A là diện tích hữu dụng của bản cực ($W \times L$) [m^2].

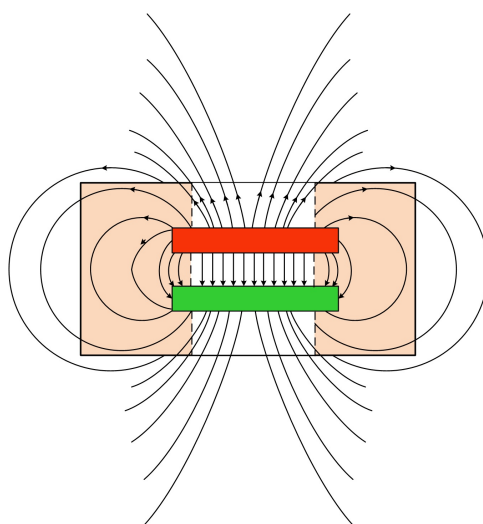
d là khoảng cách giữa 2 bản cực song song [m].



Hình 1.1: Tụ điện song song

Hai bản cực song song của một tụ điện có điện tích bằng nhau nhưng ngược hướng và các điện tích trải đều trên bề mặt của các bản cực. Các đường sức từ xuất phát từ bản cực có điện áp cao hơn và kết thúc ở bản cực có điện áp thấp hơn. Phương trình (1.2) đã bỏ qua hiệu ứng 'rìa' do sự phức tạp của mô hình hóa sao cho điện trường trong tụ điện trên hầu hết tiết diện là đồng nhất. Hiệu ứng viền xảy ra gần các cạnh của các tấm, và tùy thuộc vào ứng dụng, có

thể ảnh hưởng đến độ chính xác của các phép đo từ hệ thống. Mật độ của các đường sức từ trong vùng rìa nhỏ hơn phần diện tích trực tiếp bên dưới các bản cực vì cường độ trường tỷ lệ thuận với mật độ của các đường đẳng thế. Điều này dẫn đến cường độ điện trường yếu hơn ở vùng rìa và có đóng góp nhỏ hơn so với tổng điện dung đo được. Hình 1.2 hiển thị đường sức từ của một tụ điện có hai bản cực song song.



Hình 1.2: Trường điện từ của tụ điện với bản cực song song.

Nguyên lý hoạt động cơ bản của cảm biến điện dung là nó chuyển đổi sự thay đổi vị trí hoặc tính chất của vật liệu điện môi thành tín hiệu điện.

Cảm biến điện dung được nhận ra bằng cách thay đổi bất kỳ một trong ba tham số của tụ điện: khoảng cách giữa các bản cực (d), diện tích của các tấm điện dung (A) và hằng số điện môi (ϵ_r). Theo nguyên tắc này, các loại cảm biến khác nhau đã được phát triển.

Các loại cảm biến điện dung có giá trị điện dung thay đổi theo sự thay đổi khoảng cách thường hiệu quả đối với các phép đo khoảng cách ngắn. Khi khoảng cách tăng thì độ nhạy giảm một cách đáng kể.

Cảm biến điện dung có giá trị điện dung thay đổi theo sự thay đổi của diện tích bề mặt tác động thì có thể được hoạt động trong phạm vi đo rộng.

Cảm biến điện dung có giá trị điện dung thay đổi theo sự thay đổi hằng số

điện môi thì có độ chính xác bị hạn chế vì hằng số điện môi có thể phụ thuộc vào nhiệt độ, phụ thuộc vào tính không đồng nhất hoặc dị hướng đối với một số vật liệu nhất định. Cảm biến kiểu này có thể được sử dụng để xem xét đặc trưng của chất điện môi hoặc vị trí mặt phân cách giữa chất lỏng-chất lỏng (nước-dầu, nước-xăng...), chất lỏng-chất khí (nước-không khí, xăng-không khí, ...).

1.3 Cảm biến điện dung đơn

Các cảm biến điện dung đơn là một tụ điện phẳng hoặc hình trụ có một bản cực cố định và một bản cực di chuyển liên kết với vật cần đo. Dưới tác động của đại lượng đo, bản cực động di chuyển thẳng dọc trục, diện tích giữa các bản cực thay đổi kéo theo sự thay đổi điện dung của tụ điện.

Xét trường hợp tụ điện phẳng, từ công thức 1.2, ta có:

$$C = \frac{\epsilon \times A}{d} \quad (1.3)$$

$$dC = \frac{\partial C}{\partial \epsilon} \cdot d\epsilon + \frac{\partial C}{\partial A} \cdot dA + \frac{\partial C}{\partial d} \cdot dd \quad (1.4)$$

Đưa về dạng sai phân:

$$\Delta C = \frac{A}{d} \cdot \Delta \epsilon + \frac{\epsilon}{d} \cdot \Delta A - \frac{\epsilon A}{(d + \Delta d)^2} \cdot \Delta d \quad (1.5)$$

Khi khoảng cách giữa hai bản cực thay đổi ($\epsilon = const$ và $A = const$), độ nhạy của cảm biến được tính [36]:

$$S_d = \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{\epsilon A}{(d + \Delta d)^2} \quad (1.6)$$

Khi diện tích bản cực thay đổi ($\epsilon = const$ và $d = const$), độ nhạy của cảm biến được tính:

$$S_A = \frac{\Delta C}{\Delta A} = \frac{\epsilon}{d} \quad (1.7)$$

Khi hằng số điện môi thay đổi ($A = \text{const}$ và $d = \text{const}$), độ nhạy của cảm biến được tính:

$$S_\epsilon = \frac{\Delta C}{\Delta \epsilon} = \frac{A}{d} \quad (1.8)$$

Như vậy, biến thiên điện dung của cảm biến điện dung đơn là hàm tuyến tính khi diện tích bản cực và hằng số điện môi thay đổi nhưng là phi tuyến khi khoảng cách giữa hai bản cực thay đổi.

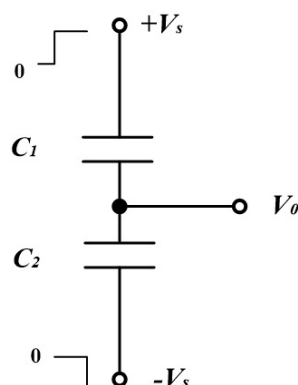
Để tăng độ nhạy và đặc tính tuyến tính của cảm biến, người ta sử dụng cảm biến điện dung vi sai.

1.4 Cảm biến điện dung vi sai

Ngoài cảm biến tụ điện đơn, người ta còn sử dụng các tụ điện vi sai để có thể nhận biết được vị trí của vật thể. Các cấu trúc cảm biến tụ điện vi sai thường sử dụng ba điện cực [70]. Cảm biến vi sai ở trạng thái cân bằng khi điện cực dịch chuyển được nằm chính giữa hai điện cực cố định. Khi đó điện dung của cặp tụ điện vi sai bằng nhau. Hoặc có một biến thể của cấu trúc này là điện cực giữa và điện cực dưới cùng cố định và điện cực ở trên cùng thì di chuyển. Dựa vào khoảng cách giữa điện cực di chuyển và điện cực cố định, ta xác định được giá trị điện dung.

Cặp tụ điện vi sai có ưu điểm là loại bỏ các loại nhiễu đồng pha, nó cung cấp tín hiệu lỗi ra bằng 0 khi cảm biến ở vị trí cân bằng và chỉ thị độ lớn và hướng của đại lượng vật lý tác động lên cảm biến.

Đối với cấu trúc trong hình 1.3, tụ điện vi sai có đáp ứng tuyến tính tại thời điểm cân bằng. Điện áp đặt vào điện cực trên cùng và dưới cùng lần lượt là $+V_s$ và $-V_s$. Điện áp lỗi ra có giá trị là:



Hình 1.3: Mạch điện điển hình của tụ điện vi sai.

$$V_0 = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2}(2V_s) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}V_s \quad (1.9)$$

1.4.1 Phương pháp đo điện dung

Có rất nhiều cấu trúc mạch được sử dụng để đo điện dung, nhưng đều xuất phát từ mối quan hệ giữa điện áp và điện tích trên tụ. Giả sử mối quan hệ này là tuyến tính (bỏ qua phi tuyến của chất điện môi), nhưng giá trị điện dung của tụ điện vẫn phụ thuộc vào khoảng cách. Viết lại công thức 1.1 ta được:

$$Q = C(x)V \quad (1.10)$$

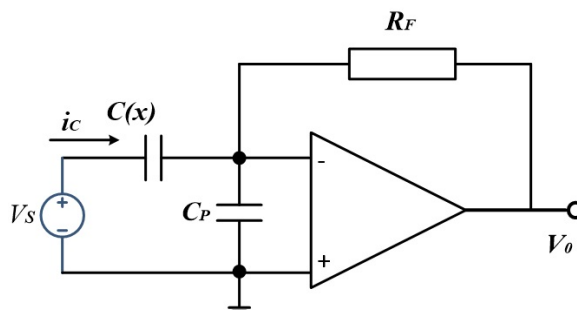
trong đó, Q là điện tích của tụ điện, V điện áp đặt trên tụ, $C(x)$ là điện dung, giá trị điện dung này phụ thuộc vào một hay nhiều tọa độ dịch chuyển. Do vậy, dòng điện trong tụ là đạo hàm của điện tích theo thời gian:

$$i_C = C(x)\frac{dV}{dt} + V\frac{\partial C}{\partial x}\frac{dx}{dt} \quad (1.11)$$

trong đó đạo hàm riêng theo biến x được lấy trong trường hợp giá trị điện dung phụ thuộc nhiều hơn một tọa độ dịch chuyển.

Hình 1.4 là một mạch điện đơn giản được dùng để đo điện dung. Trong đó

$C(x)$ là điện dung cảm biến, C_P là điện dung ký sinh (do có sự kết nối giữa cảm biến và bộ khuếch đại nên luôn tồn tại điện dung ký sinh).



Hình 1.4: Mạch điện sử dụng bộ khuếch đại chuyển trở kháng để phát hiện dòng qua tụ điện.

Bộ khuếch đại chuyển trở kháng (transimpedance amplifier) được sử dụng để phát hiện dòng đi qua tụ $C(x)$. Ưu điểm của cấu hình này là do có điểm đất ảo ở đầu vào bộ khuếch đại nên xuất hiện một lượng điện tích không đáng kể trên điện dung ký sinh, điều này không làm ảnh hưởng đến kết quả phép đo. Do vậy, điện áp đầu ra được tính là:

$$V_0 = -R_F i_C \quad (1.12)$$

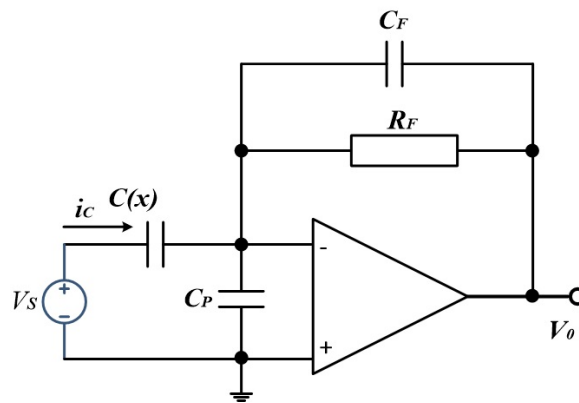
Nếu V_s là nguồn một chiều, thì V_0 tỉ lệ với vận tốc dx/dt . Phép đo vận tốc không tương đương với phép đo vị trí nên để xác định được vị trí ta phải dùng phép tích phân vận tốc.

Nếu điện áp nguồn V_s có dạng hình sin thì ta có thể xác định điện dung một cách trực tiếp. Nếu vị trí (giá trị điện dung) không thay đổi và $V_s = V_{s0} \cos \omega t$, thì điện áp đầu ra bộ khuếch đại là $-\omega V_{s0} C(x) \sin \omega t$. Giá trị điện dung $C(x)$ được xác định từ biên độ của đầu ra sóng sin. Tuy nhiên, do biến x thay đổi theo thời gian nên điện áp đầu ra tỉ lệ với dx/dt . Như vậy đầu ra sẽ chứa hai thông tin: vị trí (thông qua $C(x)$) và vận tốc (thông qua dx/dt).

Nhiều phụ thuộc vào cấu trúc của mạch, do vậy, để nhiều có giá trị không đáng kể thì ta phải sử dụng điện áp đủ nhỏ đặt lên cấu trúc. Thông thường, có

thể sử dụng các xung ngắn để phép đo hoàn thành trước khi các phần tử có khả năng di chuyển thay đổi vị trí hoặc có thể đưa ra một số phương pháp sửa lỗi như là một phần hiệu chỉnh của cảm biến.

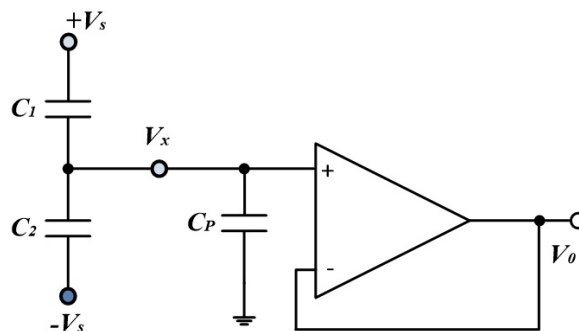
Nếu sử dụng nguồn xoay chiều có tần số cao thì thành phần phụ thuộc vào vận tốc của dòng điện có thể bỏ qua, trong trường hợp này ta sử dụng mạch điện hình 1.5.



Hình 1.5: Mạch điện sử dụng bộ khuếch đại chuyển trở kháng có thêm tụ hồi tiếp để phát hiện dòng qua tụ điện.

Giả sử chọn giá trị R_F sao cho $\omega R_F C_F > 1$. Lúc này điện áp đầu ra được tính là:

$$V_0 \approx \frac{i_C}{C_F} V_s \approx -\frac{C(x)}{C_F} V_s \quad (1.13)$$



Hình 1.6: Mạch điện sử dụng tụ điện vi sai để đo điện áp đầu ra.

Khi sử dụng tụ điện vi sai, điện áp giữa hai tụ C_1 và C_2 là V_x . Hình 1.6 sử dụng bộ khuếch đại đệm để cảm nhận điện áp đầu ra. Tuy nhiên, trong trường hợp này, thành phần đầu ra có chứa điện dung ký sinh. Giả sử dạng tín hiệu đặt vào các cực bên ngoài là dạng hình sin hoặc xung có tính đối xứng ($\pm V_s$) thì điện áp $V(x)$ được tính theo công thức:

$$V_x = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2 + C_P} V_s \quad (1.14)$$

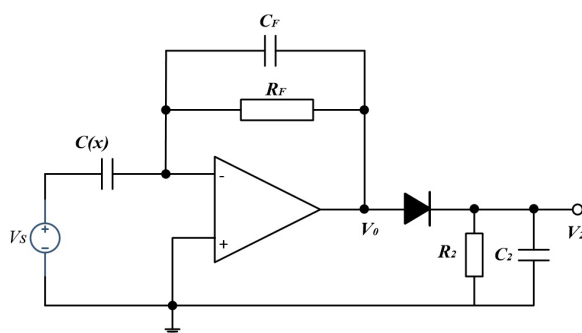
Như vậy, điện dung ký sinh làm giảm tín hiệu, và cũng ảnh hưởng đến hiệu chuẩn của phép đo. Một cách để giảm thiểu vấn đề này trong các thiết kế tích hợp đầy đủ là chế tạo một điện cực bảo vệ bên dưới kết nối, điện cực này được điều khiển bởi đầu ra V_0 . Do đó, V_0 gần như chính xác bằng V_x , và điện áp rơi trên điện dung ký sinh rất nhỏ. Tuy nhiên, điều này làm tăng thêm độ phức tạp trong quá trình chế tạo và rất khó để loại bỏ tất cả các điện dung ký sinh theo cách này. Một phương pháp thay thế là sử dụng nguồn có dạng hình sin thay cho nguồn $+V_s$ và $-V_s$ và thay thế $C(x)$ của hình 1.4 hay hình 1.5 bằng tụ điện vi sai. Lúc này điện áp đầu ra được tính là:

$$V_0 = -\frac{C_1 - C_2}{C_F} V_s \quad (1.15)$$

1.4.2 Phương pháp giải điều chế

Khi sử dụng các nguồn hình sin để đo điện dung, đầu ra của mạch đo sơ cấp có dạng hình sin, biên độ tỷ lệ thuận với giá trị điện dung cần đo. Để trích xuất biên độ này người ta có thể sử dụng bộ phát hiện đỉnh hoặc bộ giải điều chế đồng bộ.

Bộ phát hiện đỉnh được minh họa trên hình 1.7. Điện áp ra của bộ khuếch đại thuật toán V_0 là dạng sóng sin tần số cao tỷ lệ thuận với $C(x)$. Nếu hằng số thời gian R_2C_2 lớn hơn chu kỳ sóng sin và nhỏ hơn thời gian C_2 nạp điện thì tín hiệu ra V_2 là tín hiệu biến đổi chậm theo biên độ hình sin, mặc dù vẫn còn tồn



Hình 1.7: Mạch điện sử dụng phương pháp phát hiện đỉnh để giải điều chế tín hiệu điện dung.

tại một vài giá trị tần số cao.

Bộ giải điều chế đồng bộ là một mạch giải điều chế dạng sóng tuần hoàn, cho dù dạng sóng vào là hình sin hay xung. Một cách để tiếp cận giải điều chế đồng bộ là với bộ nhân tương tự, với một đầu vào là sóng mang được điều chế và đầu kia là sóng hình sin hoặc xung vuông có cùng tần số với sóng mang.

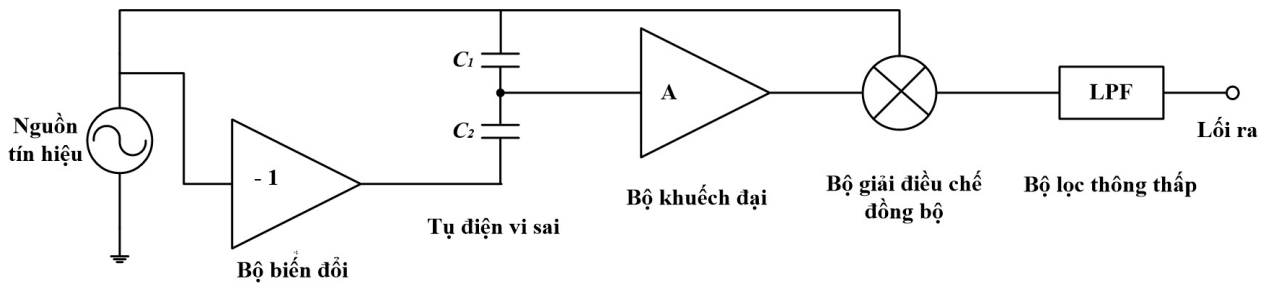
Giả sử tín hiệu cần điều chế có dạng $A(t)\cos\omega t$, trong đó $A(t)$ có biên độ biến đổi chậm theo $C(x)$. Nếu nhân thêm vào tín hiệu này một tín hiệu tham chiếu hình sin với cùng một tần số là $B\cos(\omega t + \theta)$, θ là góc dịch pha, thì ta được:

$$[A(t)\cos\omega t][B\cos(\omega t + \theta)] = \frac{A(t)B}{2}[\cos\theta + \cos(2\omega t + \theta)] \quad (1.16)$$

Nếu dạng tín hiệu trong biểu thức 1.16 được đưa qua bộ lọc thông thấp có tần số góc thì sẽ loại bỏ được thành phần 2ω nhưng không lọc các giá trị biến đổi chậm trong $A(t)$. Do vậy, sẽ thu được kết quả là $[A(t)B\cos\theta]$. Ta thấy rằng dạng tín hiệu ra là bản sao của tín hiệu vào nhưng được nhân thêm với độ lệch pha giữa sóng mang và tín hiệu tham chiếu. Bởi thế nên mạch phát hiện kiểu này được gọi là mạch phát hiện độ nhạy pha. Để thu được kết quả chính xác thì tín hiệu tham chiếu phải có pha chính xác. Nếu sử dụng bộ khuếch đại chuyển trở kháng trong hình 1.4 thì tín hiệu tham chiếu phải dịch pha $\pi/2$ so với pha của tín hiệu V_s . Còn nếu sử dụng cấu trúc trong hình 1.5 thì tín hiệu tham chiếu

phải cùng pha với V_s .

Ghép tất cả các thành phần trên với nhau, ta có trong hình 1.8 một hệ thống đo điện dung hoàn chỉnh. Hệ thống này bao gồm một nguồn tín hiệu, một bộ khuếch đại đệm để tạo ra tín hiệu đối pha (antiphase) cần thiết cho phép đo vi sai, tụ điện vi sai, bộ khuếch đại, bộ giải điều chế đồng bộ và bộ lọc thông thấp. Mặc dù hệ thống có vẻ phức tạp, nhưng nếu tụ điện vi sai được xây dựng theo quy trình tương thích với CMOS, thì toàn bộ hệ thống có thể được xây dựng trên một con chip.



Hình 1.8: Sơ đồ khối hệ thống thực hiện phép đo điện dung.

1.5 Một số đặc điểm của cảm biến điện dung

Dựa vào nguyên tắc hoạt động của cảm biến điện dung ta có thể liệt kê được một số ưu điểm của cảm biến điện dung như sau:

- Có thể được sử dụng để phát hiện các đối tượng phi kim loại.
- Có thể phát hiện đối tượng qua một số vật chứa nhất định.
- Thiết kế và điều chỉnh đơn giản.
- Có thể phát hiện được đối tượng dạng đặc và dạng lỏng.
- Chi phí thấp.
- Độ nhạy cao và có thể hoạt động ngay cả khi tác động một lực nhỏ.

- Có thể được sử dụng để đo lực, áp suất và độ ẩm...
- Có độ phân giải và đáp ứng tần số cao. ...

Một số nhược điểm của cảm biến điện dung:

- Nhạy với sự thay đổi của môi trường (nhiệt độ, độ ẩm...) nên ảnh hưởng đến kết quả của phép đo.
- Các phép đo điện dung thường phức tạp hơn so với phép đo điện trở.
- Cảm biến tiệm cận kiểu điện dung có độ chính xác chưa bằng cảm biến từ.
...

Từ những cơ sở lý thuyết trên, nghiên cứu sinh đã lựa chọn được hướng nghiên cứu của mình là tập trung nghiên cứu cảm biến điện dung vi sai để phát hiện độ nghiêng và phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng.

1.6 Các nghiên cứu liên quan đến đề tài luận án

1.6.1 Đề xuất thứ nhất của luận án

Đề xuất thứ nhất của Luận án là thiết kế cấu trúc cảm biến điện dung ứng dụng phát hiện độ nghiêng.

Các nghiên cứu trong nước

Hiện nay, ở Việt nam theo như tìm hiểu của nghiên cứu sinh, số lượng các kết quả nghiên cứu về các vấn đề liên quan đến cảm biến điện dung dùng để phát hiện góc nghiêng tương đối hạn chế.

TS. Đặng Đình Tiệp đã nghiên cứu đề tài: "Nghiên cứu xây dựng hệ cảm biến chất lỏng dựa trên cấu trúc kiểu tụ điện". Các kết quả đạt được trong đề tài này là:

- Thực hiện mô phỏng, tính toán trên máy tính về thiết kế, chế tạo hệ thống cảm biến vi chất lỏng dựa trên cấu trúc kiểu tụ.
- Thiết kế, chế tạo hệ thống cảm biến vi chất lỏng dựa trên cấu trúc kiểu tụ dùng để xác định độ cân bằng 2D.
- Ứng dụng hệ thống cảm biến trong xác định độ cân bằng của thiết bị quân sự (xe tăng, UAV).

Trong nghiên cứu này, phạm vi hoạt động của cảm biến cũng mới dừng lại ở một trục nghiêng do cấu trúc của cảm biến chỉ có 3 điện cực.

Các nghiên cứu trên thế giới

Hiện nay trên thế giới đã/đang nghiên cứu và chế tạo một số loại cảm biến để phát hiện góc nghiêng theo nhiều kiểu khác nhau như chỉ ra trên bảng 1.1. Các cảm biến phát hiện góc nghiêng thường có thể được chia làm ba loại con lắc rắn, con lắc khí và con lắc chất lỏng.

Con lắc rắn

Nghiêng là một tham số quan trọng trong nhiều ứng dụng phát hiện chuyển động. Các cảm biến nghiêng có thể là cảm biến điện dung [48], cảm biến nghiêng áp điện [59] hay cảm biến phát hiện độ nghiêng dựa trên cách tử sợi quang Bragg (FBG) [55]... Nguyên tắc chung của các loại cảm biến này là khối lượng vật rắn sẽ bị nén khi các cảm biến dịch chuyển.

Zhao và cộng sự [48] thiết kế cảm biến nghiêng điều khiển trọng lực bao gồm một khối lượng di chuyển, tụ điện dạng lược, và giá treo. Giá treo được thiết kế sao cho có sự linh hoạt tối đa trong một hướng và cố định trong hướng khác. Khi nghiêng cấu trúc, trọng lực làm bộ phận trung tâm của cấu trúc di chuyển theo hai phía của các điện cực dạng lược cố định. Điều này làm cho điện dung tăng bên này và giảm bên kia. Sự khác biệt điện dung ($|C_{phai} - C_{trai}|$) sẽ cho ra tham số liên quan đến độ nghiêng. Trong thiết kế ban đầu này, giá trị điện dung không thay đổi tuyến tính với góc nghiêng. Điều này sẽ gặp khó khăn trong việc thiết kế mạch và gây ra độ phân giải thấp khi góc nghiêng lớn.

Bảng 1.1: Tóm tắt đặc điểm của một số cảm biến nghiên

Nguyên tắc	Tham chiếu	Phương pháp phát hiện	Bậc tự do	Độ nhạy	Phạm vi đo	Ghi chú
Dựa vào chất rắn	Zhao-2007 [48] Moubarack- 2012[59] Paulo-2012[55] Yang-2015 [64]	Điện dung Áp điện Quang Quang	Đôi Đơn Đôi Đôi	2,25 $pF/^{\circ}$ 1,9 $mV/90^{\circ}$ 1,38 ÷ 1,43 $pm/^{\circ}$ 0,074 $nm/^{\circ}$	$\pm 90^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ 0 – 40 $^{\circ}$	MEMs Mô phỏng Máy phân tích Máy phân tích
Dựa vào chất khí	Han -2017 [53] Billat-2002 [66] Dau-2006 [74]	Điện trở Điện trở Điện trở	Đơn Đơn Đôi	$\Delta R/R/^{\circ} =$ 875ppm/ $^{\circ}$ 6,6 $mV/^{\circ}$ 0,12 $mV/^{\circ}$	$\pm 90^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$	50 μW (nhiệt) MEMs MEMs
Dựa vào chất lỏng	Subir-2014 [67] Lin-2008 [10] Zou-2013 [80] Welch – 2013 [38] Jung 2007 [31] Chiu 2015 [81] Choi-2012 [40] Gou-2016 [41]	Quang Trở kháng Siêu âm Quang Điện dung Điện dung Điện dung Điện dung	Đơn Đơn Đơn Đôi Đơn Đơn Đôi Đơn	0,8 $^{\circ}$ (0,09 $^{\circ}$) 19 $mV/^{\circ}$ (0,3 $^{\circ}$) 50,06 $Hz/^{\circ}$ 0,075 $/^{\circ}$ 50 $mV/^{\circ}$ 0,48 $mV/^{\circ}$ 50 $mV/^{\circ}$ 0,129 $pF/^{\circ}$	$\pm 90^{\circ}$ $\pm 160^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ $\pm 45^{\circ}$ $\pm 60^{\circ}$ $\pm 90^{\circ}$ $\pm 70^{\circ}$ $\pm 40^{\circ}$	Đơn giản Phân tích Z MEMs MEMs MEMs MEMs, CMOS MEMs

Moubarak và cộng sự [59] giới thiệu cảm biến nghiêng áp điện tương quan với sự thay đổi ứng suất tĩnh của dầm treo tới mặt phẳng nghiêng. Trong thiết kế này, một lớp mỏng chì zirconat titanate (PZT) lắng đọng trên bề mặt của dầm treo-nơi lực đạt giá trị cực đại. Dựa vào sự thay đổi của lực sẽ cho ra tham số liên quan đến độ nghiêng. Thiết kế này cho phép đo độ nghiêng hai chiều áp điện nhưng mới dừng lại ở mức độ mô phỏng.

Paulo và cộng sự [55] nghiên cứu cảm biến phát hiện độ nghiêng dựa trên cách tử sợi quang Bragg (FBG-Fiber Bragg gratings). Cách tử sợi quang Bragg là thiết bị thụ động dựa trên điều chế chỉ số khúc xạ dọc theo lõi sợi quang. Cảm biến gia tốc sợi quang được đề xuất dựa trên 4 FBG được đặt ở các vị trí đối diện nhau. Hệ thống đề xuất bao gồm hai khối nhôm gắn trên đáy của đế cứng bằng bu lông và bốn sợi quang. Khối lượng quán tính (inertial mass) cách giá đỡ một khe rộng 1 mm, các sợi quang được đặt trên các khe. Các cách tử Bragg đặt ở trên cùng. Khối lượng quán tính của cảm biến có thể di chuyển dưới sự hiện diện của gia tốc ngoài. Điều này sẽ làm co hoặc giãn sợi quang dẫn đến sự thay đổi bước sóng Bragg của FBGs. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng gia tốc kế này như một máy đo độ nghiêng hai trục. Cả hai hướng nhạy đo được bằng cách đặt gia tốc kế tại các vị trí khác nhau trên mặt phẳng của đế cảm biến. Sự thay đổi bước sóng được theo dõi bằng cách sử dụng một hệ thống phân tích quang Micron Optics (phiên bản sm125). Khi thực hiện giám sát y tế, cảm biến này cần phải gắn cố định vào cấu trúc cần phân tích.

Nhược điểm chính của cấu trúc khối lượng di chuyển là gặp phải các vấn đề như dễ vỡ, khả năng chống sốc kém...

Con lắc khí

Bên cạnh các cảm biến đo góc nghiêng sử dụng cơ chế truyền tải (transduction mechanisms) như điện dung, áp trở (piezoresistivity), áp điện (piezoelectricity)...., còn có cảm biến nghiêng sử dụng bong bóng khí nóng thay cho khối lượng di chuyển (proof mass).

Han và cộng sự [53] đã nghiên cứu về sự tích hợp ống nano các bon (CNT-

carbon nanotube) vào nền tảng cảm biến như một chức năng cung cấp nhiệt. Nguyên tắc chính của cảm biến nghiêng dựa vào đối lưu nhiệt là sự truyền nhiệt do đối lưu. Bằng cách sử dụng dòng điện không đổi, khí bên trong buồng kín được làm nóng. Khi cảm biến nghiêng đứng yên, hai cảm biến nhiệt độ được đặt đối xứng ở hai bên bộ sưởi trung tâm sẽ có nhiệt độ giống nhau. Ở trạng thái nghiêng, giá trị nhiệt độ sẽ thay đổi theo hướng áp dụng độ nghiêng. Sự chênh lệch nhiệt độ đo được bởi hai cảm biến nhiệt độ sẽ tương ứng với góc nghiêng. Độ nhạy của cảm biến phụ thuộc vào nhiệt độ của môi trường xung quanh và nhiệt độ của lò sưởi.

Billat và cộng sự [66] đề xuất cấu trúc đo độ nghiêng dựa trên dòng đối lưu tự do. Cấu trúc cảm biến bao gồm mạch cầu silicon được sử dụng làm bộ gia nhiệt treo lơ lửng giữa một cái hốc. Hai mạch cầu khác đặt ở hai bên cạnh của lò sưởi hoạt động như nhiệt kế điện trở. Khi cảm biến nằm ngang, hai nhiệt kế điện trở đo được nhiệt độ giống nhau. Dòng đối lưu được tạo ra xung quanh lò sưởi. Nếu cảm biến nghiêng thì dòng đối lưu vẫn thẳng hàng với từ trường trái đất, điều này làm cho nhiệt độ của nhiệt kế phía trên cao hơn nhiệt độ của nhiệt kế phía dưới.

Dau và cộng sự [74] đã đề xuất cấu trúc của con quay hồi chuyển khí hai trục làm việc dựa trên sự truyền nhiệt đối lưu và nhiệt kế điện trở. Cấu trúc gồm có máy bơm màng áp điện (piezoelectric diaphragm pump) để tạo khí, và nhiệt kế điện trở được làm từ silic loại p pha tạp nhẹ. Để phát hiện hai thành phần góc một cách đồng thời, bốn nhiệt điện trở được sắp xếp theo hình vuông trong cùng một mặt phẳng để tạo thành phần tử cảm nhận và đặt ở phía dưới miệng vòi phun. Dưới áp suất cao của máy bơm, dòng khí chảy qua bốn kênh để sang tới phía cuối của buồng. Dòng khí bị đảo ngược và được dẫn qua miệng vòi phun và đi đến các phần tử cảm nhận. Dòng khí này đi qua tâm đối xứng của bốn nhiệt điện trở và quay trở lại buồng bơm tạo thành vòng tuần hoàn. Khi nghiêng một góc, hướng dòng khí sẽ bị lệch làm cho điện trở của hai nhiệt điện trở thay đổi ngược chiều nhau, giá trị điện trở chuyển thành điện áp ở đầu

ra nhờ mạch cầu Wheatstone.

Con lắc chất lỏng

Subir và cộng sự [67] phát triển hệ thống đo độ nghiêng dựa theo nguyên tắc của phương pháp biến thiên cường độ ánh sáng quang do sự thay đổi của chiều dài ánh sáng đi qua môi trường lỏng theo định luật Beer-Lambert. Sự thay đổi của cường độ ánh sáng chuyển thành điện áp và chuyển thành góc.

Lin và cộng sự [10] đề xuất thiết bị đo nghiêng kiểu trở kháng, chế tạo theo cấu trúc 'sandwich': thủy tinh-SU8-thủy tinh. Đầu ra của thiết bị đo nghiêng đọc từ một con lắc kim loại chuyển động dựa trên phép đo điện áp. Con lắc kim loại được làm bằng hợp kim Ga-In-Sn và thủy ngân. Các ma sát giữa kim loại lỏng và bề mặt nền được giảm đáng kể nhờ sử dụng chất hoạt động bề mặt gốc hữu cơ SDS.

Zou và cộng sự [80] đề xuất cấu trúc cảm biến nghiêng dựa theo nguyên lý cảm biến cộng hưởng. Cảm biến nghiêng đo hướng bằng cách cảm nhận thành phần của gia tốc trọng trường dọc theo một trục đầu vào xác định. Khi cảm biến nghiêng về phía trục cảm biến, xuất hiện sự thay đổi của lực hấp dẫn làm dịch chuyển khối treo, gây ra lực trên hai cấu trúc cộng hưởng âm, độ lớn của chúng tỉ lệ với góc nghiêng.

Chiu và cộng sự [81] đề xuất máy đo độ nghiêng điện dung bằng cách cảm nhận chất lỏng điện môi trong bình chứa đặt trên đế CMOS. Khi cảm biến nghiêng/xoay sẽ làm thay đổi diện tích điện cực được bao phủ bởi chất lỏng và dẫn đến thay đổi điện dung. Các điện cực của cảm biến được bố trí theo kiểu bánh xe và được nhóm thành hai điện cực N^- và N^+ với điện cực chung N_{com} . Bể chứa được đặt trên các điện cực và được đổ một phần dầu silicon (chất lỏng của cảm biến). Cấu trúc này có phạm vi tuyến tính bị hạn chế vì mặt phân cách giữa không khí và chất lỏng trong bể chứa dạng cong bởi sức căng bề mặt trên các giao diện lỏng-khí-rắn. Đồng thời do sử dụng dầu silicon có năng lượng bề mặt thấp nên không khí bị kẹt lại trong bể chứa tạo thành bong bóng và gây ra sự phi tuyến của cảm biến.

Gou và cộng sự [41] đã xuất cấu trúc cảm biến điện dung sử dụng điện cực đồng phẳng hình khuyên. Cấu trúc bao gồm bốn tụ điện đồng phẳng hình khuyên được phân đoạn với một góc nhất định. Cấu trúc được phân bố đối xứng trên một chất điện môi. Bốn tụ điện này được ngâm một nửa trong chất lỏng không dẫn điện. Khi cảm biến thay đổi vị trí (trái/phải) thì điện dung của tụ điện trái/phải thay đổi theo chiều quay.

Trên đây là tóm tắt một số công trình của một số nhóm nghiên cứu trên thế giới. Cấu trúc nào cũng có những ưu/nhược riêng của mình. Chẳng hạn như đối với cấu trúc dựa trên con lắc rắn tuy đơn giản, dễ hiểu nhưng thiết kế công kênh và phức tạp... Các cấu trúc dựa trên con lắc khí thì chịu ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường và lò sưởi...

Con lắc chất lỏng kiểu điện dung là cấu trúc phổ biến vì có các ưu điểm về khả năng tiêu thụ điện, khả năng tái tạo, độ tin cậy cao... Tuy nhiên, các cấu trúc này đa số mới dừng ở phát hiện độ nghiêng theo một hướng trục, phạm vi hoạt động của cấu trúc chưa rộng, độ nhạy chưa thực sự cao, các điện cực chưa tách biệt với chất lỏng... Do vậy, để khắc phục được những nhược điểm đó, Luận án đã đề xuất cấu trúc cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục có phạm vi hoạt động rộng hơn, độ nhạy đủ đáp ứng cho một số ứng dụng cụ thể.

1.6.2 Đề xuất thứ hai của luận án

Đề xuất thứ hai của Luận án là thiết kế cấu trúc cảm biến điện dung ứng dụng phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng.

Các nghiên cứu trong nước

Với hướng nghiên cứu này, TS. Nguyễn Đắc Hải đã nghiên cứu đề tài: “Nghiên cứu cảm biến chất lỏng kiểu tụ điện cho ứng dụng cảm nhận thay đổi môi trường trong kênh dẫn”. Kết quả đạt được trong đề tài này là:

- Cảm biến kiểu tụ điện có cấu trúc dạng cung tròn gồm một kênh cảm biến và một kênh tham chiếu.

- Cảm biến kiểu tụ điện dạng thẳng sử dụng cấu trúc vi sai.
- Cảm biến dạng chữ U đồng thời đo được cho cả kênh chất lỏng dẫn điện và không dẫn điện.

Các cấu trúc cảm biến này mới chỉ dừng ở 3 điện cực nên mới chỉ phát hiện được sự thay đổi của môi trường kênh dẫn theo một hướng. Cấu trúc này có thể dễ chế tạo ở kích thước milimet nhưng trong nhiều ứng dụng y tế thì cần kích thước nhỏ hơn (cỡ micromet). Do vậy cần phải sửa đổi thiết kế để có thể dễ chế tạo, đồng thời có khả năng phát hiện đối tượng có kích thước nhỏ hơn với nhiều loại môi trường kênh dẫn khác nhau.

Cùng với sự phát triển của công nghệ chế tạo vi mô và công nghệ vi lỏng, các nghiên cứu đều hướng đến các chip toàn diện-LoC (Lab on Chip) được dùng để chuẩn đoán sớm. Sự kết hợp này làm giảm thiểu kích thước, chi phí phát triển hệ thống... Ngoài ra các loại chip sử dụng một lần cũng nhận được nhiều quan tâm vì sự tiện lợi như nhỏ gọn, tránh các nguy cơ lây nhiễm chéo, ...

Hiện nay, tại Việt nam có một số nhóm nghiên cứu về lĩnh vực cảm biến y sinh nhằm phát hiện một số yếu tố sinh học, các nghiên cứu về cảm biến phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng chưa có nhiều.

Các nghiên cứu trên thế giới

Việc phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng có vai trò rất quan trọng trong nhiều ứng dụng công nghiệp cũng như y sinh.

Có nhiều phương pháp phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng. Phương pháp phổ biến nhất đó là phương pháp phát hiện dựa trên huỳnh quang, phương pháp phát hiện điện hóa và phương pháp phát hiện khối phổ-MS.

Phương pháp phát hiện dựa trên huỳnh quang là phương pháp phổ biến nhất trong các thiết bị vi lỏng, nhưng có nhược điểm là chất phân tích phải được gắn huỳnh quang.

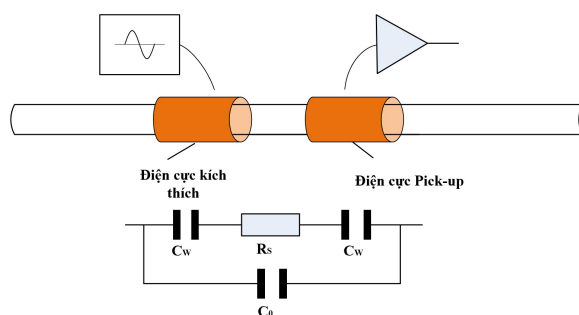
Phương pháp phát hiện điện hóa có các vi điện cực dễ dàng được tích hợp vào các thiết bị vi lỏng di động cho phép phân tích mẫu tại chỗ. Ưu điểm là có

độ nhạy cao và dễ thu nhỏ nên có thể phát hiện nồng độ chất phân tích trong mẫu thuộc lĩnh vực thực phẩm, sinh học, môi trường hoặc y học. . .

Phương pháp phát hiện MS (khối phổ): dễ dàng khi thực hiện các phân tích đồng thời. Nhược điểm là gặp khó khăn trong việc ghép MS với hệ vi lỏng.

Trong các phương pháp trên thì phương pháp phát hiện độ dẫn điện (điện hóa) là phương pháp phổ biến để phát hiện các ion vô cơ trong dung dịch. Phát hiện độ dẫn không tiếp xúc có ưu điểm là các thiết bị điện tử được cách ly với kênh dẫn nên ngăn ngừa sự hình thành bọt khí ở các điện cực.

Cấu trúc cảm biến phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc C^4D lần đầu tiên được công bố vào những năm đầu thập niên 1980 bởi Gas và cộng sự [4], và Kuban and Hauser [46], họ sử dụng cấu trúc C^4D đẳng hướng để phát hiện hạt anion (điện tích âm) [46]. Sau đó, Zemann và cộng sự [85] và Fracassi da Silva và do Lago [27] đã tiếp tục phát triển cấu trúc này bằng cách bố trí dọc trục của C^4D .



Hình 1.9: Sơ đồ cấu trúc và mạch tương đương của cấu trúc C^4D thông thường.

Sơ đồ cấu trúc và mạch tương đương của cấu trúc C^4D được chỉ trên hình 1.9). Mô hình bao gồm các thành phần chính: điện trở của dung dịch (R_s), điện dung của lớp cách điện giữa các điện cực và chất điện phân (C_w), điện dung ký sinh: C_0 là điện dung được tạo ra bởi cặp tụ điện giữa các điện cực. Hai tụ C_w được mắc nối tiếp với R_s , và song song với tụ C_0 . Hai tụ điện (C_w) đóng vai trò là điện cực cảm biến và điện cực kích thích [51].

Tuy nhiên, độ dẫn điện của C^4D phụ thuộc vào giá trị điện dung tại một số

tần số xác định. Mặc dù tần số hoạt động là một tham số cơ bản, biên độ của kích thích cũng rất quan trọng để xác định độ nhạy, độ tuyến tính và độ ồn. Tín hiệu kích thích biên độ cao có xu hướng làm giảm S/N, nhưng độ nhạy và độ tuyến tính có thể bị giảm tùy thuộc vào hiệu suất của các bộ phận điện tử được sử dụng trong mạch.

Thao tác các hạt sinh học như tế bào sinh học đóng vai trò quan trọng trong các nghiên cứu sinh học và các ứng dụng y học như phát hiện, tách hoặc làm giàu các tế bào hiếm. Có nhiều kỹ thuật dùng để thao tác tế bào trong hệ thống vi lỏng. Các phương pháp này có nguyên tắc chung là dựa trên lực tác động lên các hạt/tế bào như lực cơ học, lực điện, lực quang học, lực từ trường,...

Phương pháp cơ học với ưu điểm là có thông lượng cao, tỉ lệ tế bào bị hỏng trong quá trình thao tác thấp, khả năng làm giàu tế bào cao, thiết bị dễ chế tạo... Bên cạnh đó, nhược điểm của phương pháp này là tốc độ phản hồi chậm, độ tinh khiết thấp...

Phương pháp điện có ưu điểm là có khả năng bẫy tế bào, tỉ lệ tế bào bị hỏng trong quá trình thao tác thấp... Nhược điểm: kết quả phát hiện phụ thuộc vào đặc tính của tế bào, thông lượng thấp, việc chuẩn hóa phức tạp...

Phương pháp từ: thao tác hạt không cần tiếp xúc nhưng cần có thiết bị từ bên ngoài và bề mặt màng tế bào bị thay đổi...

Phương pháp quang: thao tác hạt không cần tiếp xúc, tốc độ di chuyển của hạt không phụ thuộc vào tốc độ dòng chảy, độ tinh khiết cao... nhưng có thông lượng thấp và hệ thống cồng kềnh...

Như vậy, mỗi phương pháp thao tác hạt/tế bào đều có những ưu nhược điểm riêng. Do đó, tùy thuộc vào mục tiêu nghiên cứu, ứng dụng cụ thể, cơ sở vật chất... mà các nhà nghiên cứu có thể lựa chọn phương pháp phù hợp để có thể tích hợp vào hệ thống vi lỏng.

Trong Luận án, nghiên cứu sinh đã lựa chọn phương pháp điện, cụ thể là phương pháp điện di điện môi để thao tác hạt/tế bào.

1.7 Hướng nghiên cứu được đề xuất trong luận án

Gần đây, có nhiều loại cảm biến phát hiện độ nghiêng đã được nghiên cứu trong các lĩnh vực công nghiệp như điện thoại di động, máy điều khiển trò chơi, vận tải và xây dựng... Đặc biệt, các cảm biến nghiêng thu nhỏ đã mở rộng ứng dụng của chúng ngay cả trong các thiết bị điện tử di động, đòi hỏi phải có sự bất giữ chuyển động. Sự phát triển của một cảm biến phát hiện độ nghiêng với mức tiêu thụ điện năng thấp và kích thước nhỏ sẽ giúp mở rộng phạm vi của các ứng dụng này.

Các cảm biến độ nghiêng dựa trên hệ thống vi cơ điện tử (MEMs) có tiềm năng lớn cho các ứng dụng công nghiệp do chi phí thấp, độ nhạy cao, kích thước nhỏ và có thể sản xuất hàng loạt. Do đó, các loại cảm biến độ nghiêng MEMs khác nhau dựa trên quang học, cơ học và nhiệt động lực đã được đưa ra trong nhiều nghiên cứu. Các cảm biến này đều có những ưu, nhược điểm khác nhau.

Cảm biến phát hiện độ nghiêng dựa trên quang học cần nguồn sáng bên ngoài, do đó, chúng có kích thước khá cồng kềnh nên khó di chuyển. Cảm biến phát hiện độ nghiêng dựa trên cơ học cho thấy những hạn chế về cấu trúc mỏng manh và khối lượng lớn. Cảm biến phát hiện độ nghiêng dựa trên nhiệt động lực có những nhược điểm của mức tiêu thụ năng lượng cao và nhiễu xuyên nhiệt. Các loại cảm biến phát hiện độ nghiêng điện phân đơn trục được thiết kế như một máy đo điện thế hoạt động trên một trục do cấu trúc của việc đặt điện cực chung. Điều này mang lại giới hạn cho các cảm biến nghiêng điện phân trục kép dựa trên MEMs [40].

Trên cơ sở phân tích các hạn chế của các kết quả liên quan, cảm biến độ nghiêng dựa trên điện dung có thiết kế nhỏ gọn, ít bị ảnh hưởng của môi trường nên Luận án tập trung vào hướng nghiên cứu này. Cụ thể là NCS ***đề xuất hướng nghiên cứu thứ nhất là phát triển cấu trúc cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng kiểu hình trụ và hình cầu.***

Bên cạnh đề xuất trên, NCS **đề xuất hướng nghiên cứu thứ hai là phát triển cấu trúc cảm biến điện dung phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng**. Do hệ thống vi lỏng ngày nay đóng góp rất nhiều lợi ích trong các lĩnh vực y học, sinh học. Hệ thống này thường dùng để làm giàu và làm sạch các tế bào trong các mẫu sinh học. Công nghệ vi lỏng cho phép khảo sát các hệ thống y sinh thông qua tế bào, các sinh phân đa bào có kích thước nhỏ. Đây là công cụ mạnh mẽ tạo điều kiện thuận lợi cho các thí nghiệm với hiệu suất cao trong các ứng dụng y sinh, hóa sinh, môi trường...

Cảm biến điện dung dùng trong hệ vi lỏng có nhiều ưu điểm như kích thước nhỏ, độ nhạy cao, có khả năng giám sát tại chỗ, tiêu thụ ít năng lượng... đã mở ra nhiều hướng nghiên cứu mới.

1.8 Kết luận chương

Tuy đã có một số công trình nghiên cứu liên quan đến cảm biến điện dung dùng để phát hiện độ nghiêng và phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng, nhưng các nghiên cứu cũng mới chỉ dừng lại ở một số phương diện như:

- Các phương pháp phát hiện độ nghiêng còn gặp phải một số trở ngại về sự ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường lên cấu trúc, độ chính xác, cảm nhận độ nghiêng đơn trục...
- Các phương pháp phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng còn gặp phải một số giới hạn như khả năng tích hợp, kích thước cấu trúc, độ nhạy, nhiễu, khả năng phát hiện và thao tác các đối tượng có kích thước nhỏ...

Trước thực trạng đó, nghiên cứu sinh xuất phát từ việc khảo sát, đánh giá các phương pháp, mô hình cấu trúc cảm biến điện dung vi sai trong ứng dụng phát hiện độ nghiêng cũng như phát hiện đối tượng trong kênh vi lỏng, đã thực hiện việc nghiên cứu phát triển hệ thống cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng kiểu hình trụ và hình cầu để giải quyết nhược điểm của các nghiên cứu trước

đó như có thể cảm nhận góc nghiêng nhiều trục, phạm vi hoạt động rộng hơn, cấu trúc đơn giản hơn, dễ chế tạo hơn. Đồng thời, nghiên cứu sinh cũng đề xuất cấu trúc cảm biến vi sai phát hiện độ dẫn bằng cặp tụ không tiếp xúc trong ứng dụng phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng.

Cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng

2.1 Mở đầu

Từ xưa đến nay một trong những mối quan tâm lớn của con người là sự định hướng của thiết bị đối với trọng trường. Năm 1692, Galileo Galilei đã khám phá và nghiên cứu chuyển động của con lắc. Con lắc đã được ứng dụng để đo thời gian và nó cũng là một trong những dụng cụ nhân tạo đầu tiên để xác định được độ nghiêng. Nghiêng là một thông số quan trọng trong nhiều ứng dụng phát hiện chuyển động, bao gồm: phương tiện vận chuyển, thiết bị công nghiệp, điện thoại thông minh, điều chỉnh góc quay của hệ mặt trời, điều chỉnh góc quay trong radar, hiệu chỉnh cân bằng trong máy bay... Do công nghệ chế tạo ngày càng phát triển nên kích thước cũng như năng lượng tiêu thụ của cảm biến ngày càng nhỏ, điều này dẫn đến các phép đo của cảm biến nghiêng trở nên chính xác hơn. Ngoài các ứng dụng kể trên, hiện nay cảm biến nghiêng còn được sử dụng nhiều trong lĩnh vực y tế: chăm sóc sức khỏe như theo dõi chuyển động của bệnh nhân và hỗ trợ cuộc sống.

Có nhiều loại cảm biến độ nghiêng hoặc máy đo độ nghiêng sử dụng các nguyên tắc thiết kế khác nhau bao gồm: dây dẫn điện phân, bọt khí trong chất lỏng, bóng thủy ngân điện trở, con lắc, độ tự cảm quang, điện dung... So với các

loại cảm biến khác, cảm biến điện dung không bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ, độ ẩm hoặc sai lệch cơ học; chúng cũng là các thiết bị không tiếp xúc nên phép đo cho kết quả có độ phân giải cao. Ngoài ra, việc che chắn chống lại điện trường đi lạc trong các cảm biến điện dung đơn giản hơn so với che chắn chống nhiễu từ tính, và vấn đề tiếp xúc để đo góc nghiêng cũng là một vấn đề quan trọng trong cảm biến nghiêng dùng điện trở [18].

Đối với cảm biến độ nghiêng điện phân, phạm vi đo góc nghiêng của chúng là 60^0 và điện áp đầu ra đo được đạt đến trạng thái bão hòa rất nhanh nên phạm vi đo trên thực tế nhỏ hơn 60^0 . Đồng thời, việc niêm phong chất lỏng điện phân là một quá trình phức tạp.

Cảm biến nghiêng điện dung xuất hiện như là một giải pháp mới. Góc đo của nó rộng hơn nhiều so với các loại máy đo khác, và cấu trúc đơn giản, không có điểm tiếp xúc từ các bộ phận chuyển động, giúp chế tạo dễ dàng hơn.

Có nhiều cấu trúc cảm biến nghiêng đã được thiết kế và chế tạo thành công. Hiện nay, các cảm biến nghiêng đều sử dụng công nghệ MEMs nên cấu trúc khá phức tạp và giá thành cao. Trước thực tại đó, luận án đề xuất cấu trúc cảm biến nghiêng có độ chính xác cao, chế tạo đơn giản và giá thành rẻ đó là cảm biến chất lỏng dựa trên nguyên lý điện dung.

2.2 Cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục

2.2.1 Giới thiệu

Cảm biến phát hiện độ nghiêng hay gọi tắt là cảm biến nghiêng chủ yếu được áp dụng để đo chiều ngang của hệ thống hay của đối tượng. Cảm biến kiểu này được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp Robot, phát hiện chuyển động cơ thể người, trong công nghiệp tự động hóa...[39-58] Hiện nay, một số loại cảm biến nghiêng đã được thương mại hóa. Các cảm biến này được chia làm hai loại chính

là dựa trên con lắc rắn và con lắc lỏng tùy thuộc vào cơ chế làm việc của chúng.

Con lắc rắn bao gồm một vật thể rắn được gắn lên giá đỡ, lò xo, thanh bản lề hay một quả bóng lăn [9-84]. Khi thân cảm biến quay quanh hướng tham chiếu thẳng đứng hoặc nằm ngang, dưới ảnh hưởng của lực hấp dẫn, cấu trúc rắn lơ lửng bị biến dạng và độ biến dạng này được đo bằng góc nghiêng. Với những tiến bộ trong kỹ thuật nên cảm biến nghiêng này đã được cải thiện độ chính xác, giảm giá thành, tăng tuổi thọ, nhưng nhược điểm lớn nhất của loại này đó là dễ bị ảnh hưởng bởi sự tác động của các lực bên ngoài như rung hoặc sốc cơ học [1-55].

Cảm biến nghiêng dựa trên chất lỏng sử dụng chuyển động của cấu trúc chất lỏng để cảm nhận gia tốc trọng trường. Để di chuyển được bằng trọng trường thì mật độ chất lỏng trong bình chứa không được phân bố đều. Điều này được thực hiện bằng cách làm nóng cục bộ chất lỏng đồng nhất hoặc bằng cách trộn hỗn hợp chất lỏng đồng nhất này với không khí hoặc với chất lỏng có mật độ khác [10-81]. Các chất lỏng được gia nhiệt cục bộ (cảm biến nghiêng đối lưu nhiệt) thường được thực hiện bằng cách sử dụng cảm biến khí (hoạt động của nó dựa trên sự truyền nhiệt do đối lưu).

Bằng cách sử dụng dòng điện không đổi, khí ở bên trong buồng kín được làm nóng, nhiệt độ sẽ thay đổi theo giá trị của góc nghiêng. Cảm biến loại này có cấu trúc đơn giản mà không nặng, nên nó có thể treo như một phần cảm biến và có khả năng chống sốc mạnh hơn cảm biến rắn. Nhược điểm của cảm biến này là dễ dàng bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ môi trường và độ chính xác thấp. Do yêu cầu tạo nhiệt độ cho các cảm biến nên phải sử dụng các máy tạo nhiệt có công suất cao.

Cấu trúc cảm biến sử dụng các chất lỏng đồng nhất hoặc chất lỏng có hai pha lỏng - khí có nhiều ưu điểm như: độ nhạy cao, độ ăn mòn và độ ẩm thấp, đồng thời có khả năng chống rung tốt [10,73,74]. Điện áp đầu ra của cảm biến nghiêng kiểu này thu được bằng cách chuyển đổi các giá trị vật lý sang tín hiệu điện nhờ trở kháng [40], điện dung, cảm kháng [10], áp điện [58], mạch cộng

hưởng hay là các thông số quang học [67-64]. Trong các thành phần trên thì điện dung có tính ưu việt hơn cả do tín hiệu ra là tương tự và tuyến tính nên được sử dụng một cách phổ biến [48,31,81,5,6].

Bên cạnh đó, cảm biến điện dung, so với các nguyên tắc phát hiện khác của cảm biến nghiêng, có nhiều ưu điểm như đơn giản, đo lường không tiếp xúc, dịch chuyển tuyến tính dài và quy trình thiết kế và chế tạo đơn giản hơn đáng kể so với các cấu trúc khác. Tuy nhiên, hầu hết các cảm biến này là cấu trúc cảm biến trục đơn [21-56]. Ví dụ, trong các cảm biến nghiêng điện dung có cấu trúc phẳng, tức là tất cả các cấu trúc cảm biến có thể được chế tạo trong cùng một mặt phẳng, do đó, quá trình chế tạo được đơn giản hóa và phù hợp cho việc thu nhỏ hệ thống [50]. Tuy nhiên, với cấu trúc phẳng, cảm biến được đề xuất không phù hợp với cảm nhận góc nghiêng nhiều trục.

Nhu cầu về cảm biến nghiêng có độ chính xác cao cho các ứng dụng ngày càng tăng, đặc biệt là các ứng dụng y tế và ô tô. Các ứng dụng của cảm biến nghiêng có thể được chia thành các ứng dụng phát hiện góc nghiêng nhỏ, đòi hỏi độ chính xác cao để cân bằng và các ứng dụng phát hiện góc nghiêng lớn, không yêu cầu độ chính xác quá cao để xác định tư thế của đối tượng. Trong chương này, Luận án giới thiệu cảm biến nghiêng hai trục, một trục để đo góc lăn (góc nghiêng theo hướng trục x) và một trục để đo góc chúc (góc nghiêng theo hướng trục y), dựa trên cấu hình điện dung có chất lỏng là chất điện môi cùng với kỹ thuật phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ vi sai không tiếp xúc (DC^4D). Sự sắp xếp bốn điện cực cảm nhận cùng với một điện cực kích thích cho phép chúng ta phát hiện được sự thay đổi của hai trục một cách đồng thời với nhiễu xuyên kênh (cross-talk) thấp, do đó khắc phục giới hạn trong các cấu trúc đơn trục [71-22].

Cấu hình này ổn định, chính xác và dễ xây dựng với các thiết bị điện tử có chi phí thấp và có thể thương mại hóa. Mặc dù gần đây công nghệ vi chế tạo đã có nhiều tiến bộ, nên đã giảm chi phí sản xuất và kích thước của cảm biến nghiêng, nhưng chi phí của việc lắp đặt ban đầu và tạo mẫu có thể làm ảnh

hưởng đến việc chuyển đổi ý tưởng lý thuyết thành sản xuất thực tế [84,32,16]. Trong phần này, luận án trình bày về cấu trúc của cảm biến điện dung hai pha lỏng-khí. Cảm biến này có thể tùy chỉnh để phù hợp với nhiều ứng dụng.

2.2.2 Thiết kế và nguyên lý làm việc của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng dựa trên cấu trúc hai pha lỏng/khí

Trong phần này, Luận án đề xuất một cấu trúc cảm biến đo góc nghiêng hai trục được thiết kế với một ống nhựa hình trụ có năm điện cực được gắn ở các vị trí cố định xung quanh ống, trong đó có một điện cực đóng vai trò điện cực kích thích và hai cặp điện cực còn lại được đặt một cách đối xứng đóng vai trò điện cực thu như hình 2.1.

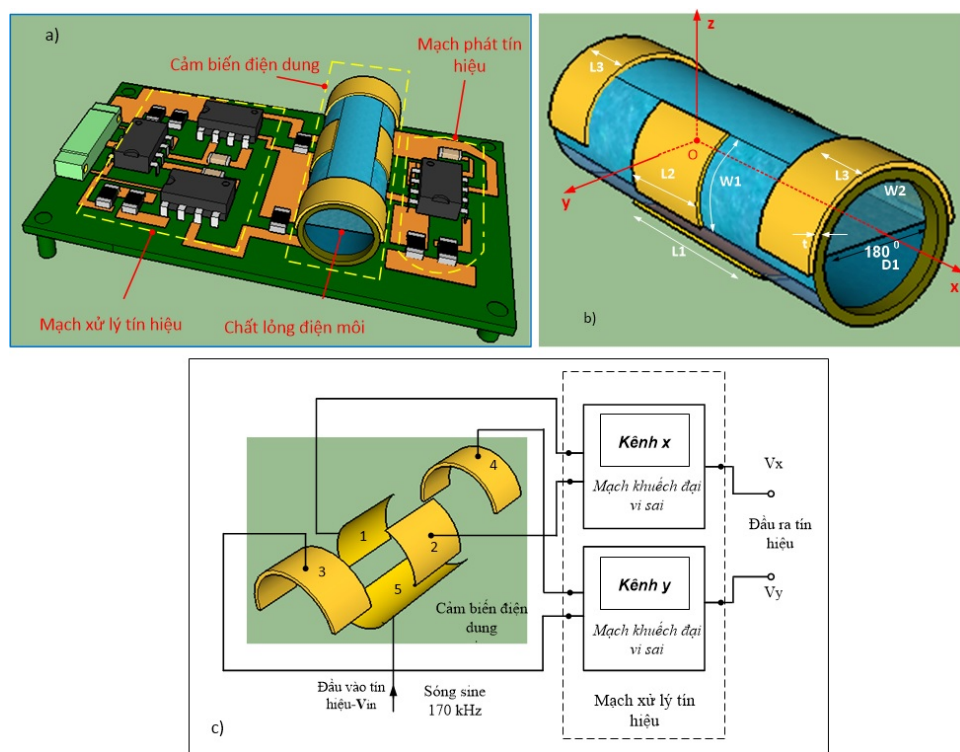
Cấu trúc cảm biến này được gắn trên bản mạch in (PCB) với một mạch điện tử để chuyển đổi góc nghiêng thành điện áp đầu ra. Ống nhựa hình trụ rỗng, được bịt kín có đường kính 10 mm, được bơm một phần dung dịch điện môi bên trong. Dung dịch điện môi được sử dụng là xăng (chiếm khoảng 75% thể tích ống) với hằng số điện môi bằng 2. Trong cấu trúc này, Luận án chọn xăng vì xăng có sức căng bề mặt thấp ($0,0198 N/m$) và độ nhớt thấp ($0,6 mPa.s$), điều này cho phép bong bóng khí di chuyển và nhanh chóng lắng xuống khi tiếp xúc với thành ống.

Trong nghiên cứu khác, các điện cực được đặt bên trong vi kênh và được bảo vệ bởi một lớp cách điện (lớp mỏng SiO₂ hoặc lớp dầu Polydimethylsiloxane-PDMS). Quá trình lắng đọng như vậy có chi phí tốn kém, tốn nhiều thời gian và việc lựa chọn vật liệu cũng bị giới hạn. Ngoài ra, tất cả các điện cực phải được đặt trong cùng một mặt phẳng [61-70].

Trong cấu trúc của Luận án, các điện cực được đặt bên ngoài, ống nhựa hình trụ đóng vai trò như lớp bảo vệ và giúp cô lập các điện cực với môi trường chất lỏng. Mặc dù độ dày ống nhựa ảnh hưởng đến độ nhạy của một cặp tụ điện,

làm hạn chế hiệu suất của cảm biến. Điều này có thể được cải thiện bằng cách sử dụng mạch phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc đo ở chế độ cảm biến vi sai và độ dày lớp nhựa có thể được bù bằng cách hiệu chỉnh trạng thái ban đầu của cảm biến.

Khi ống nhựa bị quay một góc bất kỳ, dung dịch điện môi bao phủ một phần các điện cực cảm ứng sẽ di chuyển, từ đó làm thay đổi giá trị điện dung vi sai của tụ điện tương ứng với góc nghiêng và từ đó, ta có thể xác định được góc bị nghiêng.



Hình 2.1: Thiết kế cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hình trụ

Các điện cực được của cấu trúc làm bằng đồng với kích thước được đặt trong bảng 2.1. Các điện cực này được uốn cong và ôm lấy ống nhựa hình trụ tại các vị trí xác định.

Trong năm điện cực của cảm biến, điện cực kích thích được đặt ở bên dưới ống (điện cực 5) và bị dung dịch bao phủ hoàn toàn. Điện cực 5 phát tín hiệu đến bốn điện cực thu được đánh số từ 1 đến 4. Hai cặp điện cực này có cùng

Bảng 2.1: Thông số của cấu trúc cảm biến

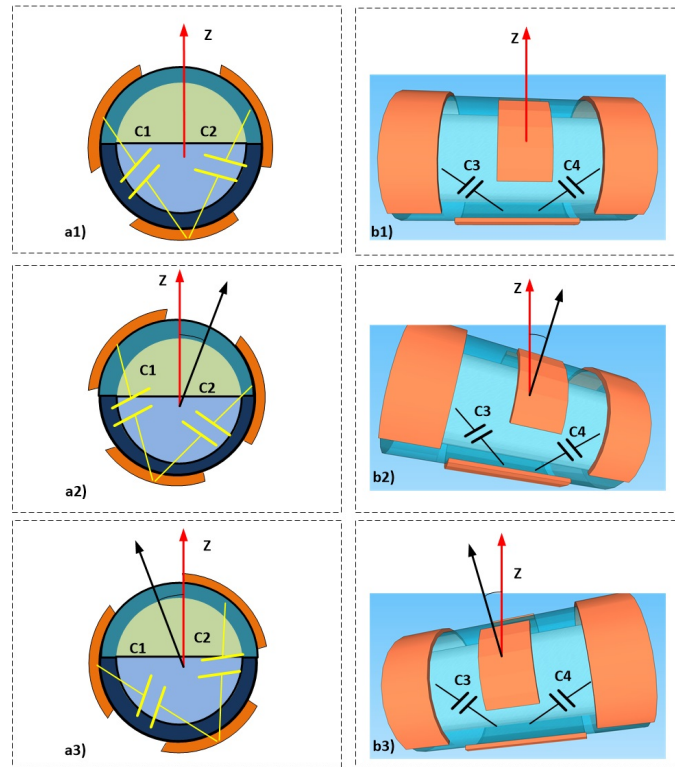
Thông số	Giá trị (mm)	Ghi chú
W_1	7,5	Chiều rộng của điện cực (1,2 và 5)
L_1	10,0	Chiều dài của điện cực kích thích (5)
L_2	5,0	Chiều dài của điện cực (1,2)
L_3	7,0	Chiều dài của điện cực (3,4)
$D1$	11,0	Đường kính của ống chứa dung dịch
$D2$	15,7	Đường kính của điện cực
t	0,2	Độ dày của điện cực

kích thước được đặt đối xứng nhau và bị dung dịch bao phủ một phần. Các cặp điện cực này cùng với điện cực dưới tạo nên hai cặp tụ điện (C_1, C_2) và (C_3, C_4) ứng với hai trục x và y , giá trị điện dung của các tụ điện phụ thuộc vào lượng chất lỏng trong ống, hình dạng, kích thước cũng như vị trí của các điện cực. Các góc nghiêng trên trục x và trục y có thể được đo bằng cách tính các điện áp vi sai ($V_{C1} - V_{C2}$) và ($V_{C3} - V_{C4}$).

Khi có tín hiệu sine tác động đến điện cực kích thích, điện dung của tụ điện được tạo ra bởi điện cực kích thích và điện cực thu xác định điện áp đầu ra, đó là điện áp vi sai giữa các điện cực. Như vậy, góc nghiêng theo trục x và góc nghiêng theo trục y của cảm biến có thể được theo dõi bằng cách đo điện áp vi sai ($V_{C1} - V_{C2}$) và ($V_{C3} - V_{C4}$) một cách tương ứng.

Hình 2.2 là nguyên lý làm việc của cảm biến nghiêng. Hình 2.2a) Tụ điện C_1 và C_2 nghiêng theo trục x . Giá trị điện dung vi sai ($C_1 - C_2$) thay đổi theo diện tích bề mặt chất lỏng bao phủ lên các điện cực. Hình 2.2 b) Tụ điện C_3 và C_4 nghiêng theo trục y .

Khi cảm biến ở vị trí cân bằng (góc nghiêng bằng 0^0) như hình 2.2 (a1 và b1) thì dung dịch điện môi bao phủ lên điện cực thu là bằng nhau, vì vậy giá trị điện dung của tụ $C_1 = C_2$, $C_3 = C_4$ và giá trị điện dung vi sai là bằng không:



Hình 2.2: Nguyên lý làm việc của cảm biến nghiêng.

$$\Delta C_1 = C_1 - C_2 = 0, \Delta C_2 = C_3 - C_4 = 0.$$

Khi cảm biến bị nghiêng theo phương trục x và theo chiều kim đồng hồ (hình 2.2-a2), dung dịch điện môi bao phủ lên điện cực (C_2) tăng lên, điện cực còn lại (C_1) giảm xuống, vì vậy điện dung vi sai $\Delta C_1 = C_1 - C_2$ sẽ giảm xuống.

Ngược lại, khi cảm biến nghiêng theo phương trục x và theo chiều ngược chiều kim đồng hồ (hình 2.2 -a3), lượng dung dịch bao quanh (C_2) giảm đi, còn (C_1) tăng lên dẫn đến ΔC_1 sẽ tăng lên.

Tương tự như vậy, theo phương trục y ta cũng có $\Delta C_2 = C_3 - C_4$ giảm khi quay theo chiều kim đồng hồ (hình 2.2-b2) và ΔC_2 tăng khi quay ngược chiều kim đồng hồ (hình 2.2-b3). Bằng cách so sánh lượng thay đổi của ΔC_1 và ΔC_2 ứng với các trục x và y , ta có thể tính được góc nghiêng của cảm biến.

Cấu trúc này sẽ không gặp khó khăn khi cần triển khai một thiết kế tương tự cho một mô hình đối xứng (như là dạng khối hoặc dạng hình cầu). Trong kỹ thuật chế tạo vi mô, nơi sự liên kết và sản xuất được tự động hóa ở quy mô

sản xuất hàng loạt (tích hợp ở mức wafer), thì sự đối xứng của cấu trúc thường xuyên được yêu cầu. Trong nghiên cứu này, vì cấu trúc liên quan đến cơ khí nên các thiết kế phải đơn giản và có thể thực hiện được trong phòng thí nghiệm. Do đó, cấu trúc ống nhựa hình trụ đã được lựa chọn. Việc lựa chọn kiểu ống hình trụ cho phép khảo sát hoạt động của cảm biến theo hai hướng trục x và trục y không đối xứng, đồng thời cũng gia tăng sự hiểu biết của chúng ta về vấn đề này. Ngoài ra, dạng ống hình trụ cũng phổ biến rộng rãi và tương thích với cơ học thông thường.

2.2.3 Mô phỏng sự hoạt động của cấu trúc

Trong thiết kế này, phương pháp phần tử hữu hạn (Finite element method - FEM) được sử dụng để khảo sát khả năng làm việc của cảm biến nghiêng hai trục, thiết kế này dựa trên cấu trúc cảm biến điện dung hai pha lỏng/ khí. Cảm biến nghiêng kiểu điện dung được mô hình hóa và mô phỏng bằng phần mềm COMSOL để phân tích tụ điện với điện cực cong và môi trường tương đối điện môi không đồng nhất (môi trường điện môi là hai pha lỏng-khí). Hằng số điện môi của chất lỏng được giả định là 2 (chất lỏng là xăng), bỏ qua hiệu ứng sức căng bề mặt giữa chất lỏng và thành vỏ của vật chứa.

Bảng 2.2 liệt kê các tham số của vật liệu sử dụng trong cảm biến.

Đưa tín hiệu dạng sin có tần số 170 kHz , biên độ 7 V vào điện cực kích thích (điện cực 5) và quan sát điện áp ra trên 4 điện cực còn lại.

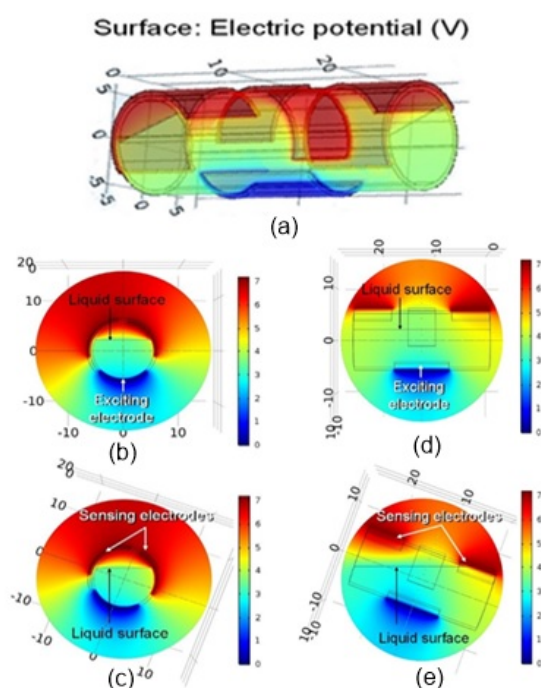
Hình 2.3 thể hiện sự phân bố điện trường bên trong cảm biến khi đặt điện áp 0 V vào điện cực kích thích và cảm biến quay theo trục x và trục y . Hình 2.3(a) Cấu trúc mô phỏng 3D; (b) Phân bố điện trường trong trường hợp cân bằng trong trục x ; (c) Phân phối điện trường khi cảm biến quay dọc theo trục x ; (d) Phân bố điện trường trong trường hợp cân bằng trục y ; (e) Phân bố điện trường khi cảm biến quay dọc theo trục y .

Hình 2.3 cũng thể hiện sự phân bố điện trường tập trung nhiều ở giữa các điện cực, các khu vực màu đỏ thể hiện cường độ điện trường cao và các vùng

Bảng 2.2: Thông số của cảm biến được sử dụng trong mô phỏng cấu trúc

Thành phần	Chất liệu	Hằng số điện môi	Độ dẫn điện S/m
Chất khí	Không khí	1	-
Dung dịch điện môi	Xăng	2	-
Ống chứa dung dịch	Nhựa	2,36	-
Điện cực	Đồng	-	$5,96.10^7$

màu xanh thể hiện cường độ điện trường thấp hơn. Khi cảm biến ở trạng thái cân bằng, sự phân bố điện trường khá là đối xứng, như được minh họa trong hình 2.3 b), d). Khi cảm biến nghiêng không ở vị trí cân bằng trên cả hai trục thì sự phân phối điện trường thay đổi một cách đáng kể như quan sát trên hình 2.3 c), e).



Hình 2.3: Sự phân bố điện trường của cảm biến.

Khi cảm biến bị xoay đi một góc đủ lớn thì mức dung dịch trong ống sẽ phủ kín một trong hai điện cực thu làm điện dung vi sai ΔC có thay đổi rất nhỏ.

Do đó, góc nghiêng của cảm biến càng lớn thì sự thay đổi điện áp lối ra sẽ càng giảm, điều này dẫn đến phạm vi làm việc của cảm biến bị thu hẹp lại.

Theo kết quả thu được, cảm biến độ nghiêng được đề xuất có thể được sử dụng cho nhiều ứng dụng khác nhau với hai phạm vi phát hiện thích ứng và độ nhạy khác nhau. Các cấu trúc khác nhau của cảm biến độ nghiêng, chẳng hạn như vị trí của các điện cực và kích thước của chúng, có thể ảnh hưởng đến các đặc tính của nó. Do đó, hiệu suất của cảm biến nghiêng được đề xuất có thể được cải thiện hơn nữa bằng cách tối ưu hóa thiết kế kết cấu như hình dạng của thùng chứa, kích thước và vị trí của các điện cực.

Để tìm ra cấu trúc tối ưu cho hệ cảm biến, Luận án đã thực hiện khảo sát các điện cực theo từng trục. Cấu trúc này sẽ cải thiện được phạm vi hoạt động cũng như độ nhạy của cảm biến.

Các tham số trong bảng 2.1 sẽ lần lượt được thay đổi trong một phạm vi cụ thể. Cụ thể, khi khảo sát cảm biến theo trục x , các tham số chiều dài của điện cực (3,4) L_3 , đường kính điện cực D_2 theo trục y sẽ được giữ nguyên, một trong hai tham số là chiều rộng của điện cực kích thích (điện cực 5) W_1 và chiều dài của điện cực thu (điện cực 1,2) L_2 sẽ được thay đổi.

Tương tự, khi khảo sát cảm biến theo trục y , các tham số W_1 , L_2 của trục x sẽ được giữ nguyên, một trong hai tham số chiều dài của điện cực thu (điện cực 3,4) L_3 và đường kính của điện cực D_2 sẽ được thay đổi.

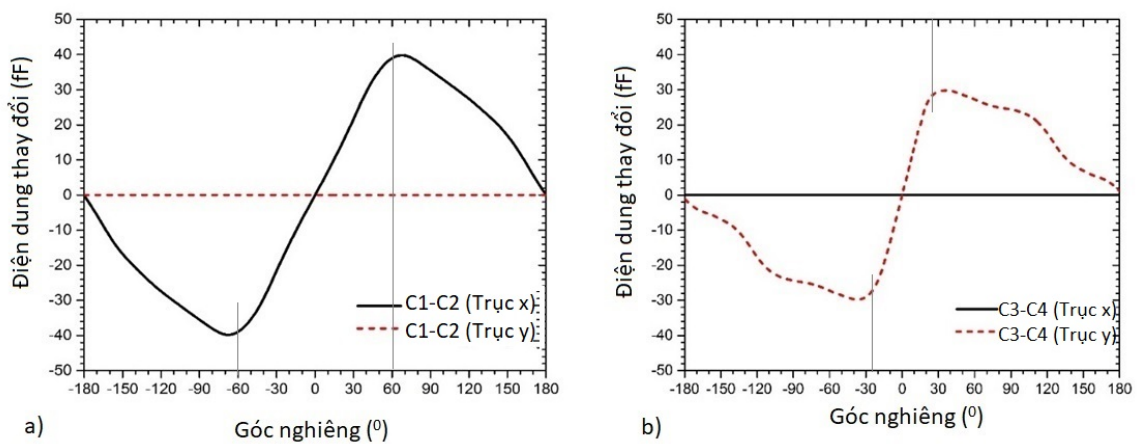
2.2.4 Mô phỏng mối quan hệ giữa điện dung và góc nghiêng theo trục x và trục y

Mô phỏng này thể hiện sự thay đổi điện dung vi sai ΔC_1 và ΔC_2 theo từng góc nghiêng tương ứng. Góc nghiêng được khảo sát trong phạm vi từ -180° đến $+180^\circ$. Đồ thị trong hình 2.4 thể hiện sự thay đổi của góc nghiêng theo trục x và theo trục y .

Qua đồ thị ta thấy, khi cảm biến nghiêng theo trục x thì giá trị điện dung

vi sai tuyến tính trong phạm vi từ -60^0 đến $+60^0$ với độ nhạy $0,64 fF/0$ và khi nghiêng theo trục y thì giá trị điện dung vi sai tuyến tính trong phạm vi từ -25^0 đến $+25^0$ với độ nhạy $1,16 fF/0$.

Một điều đáng lưu ý là khi cảm biến nghiêng một góc theo trục x thì điện dung vi sai của trục y xấp xỉ bằng không và ngược lại. Điều này chứng tỏ rằng nhiễu xuyên kênh của hai trục lên nhau là không đáng kể do sự sắp xếp đối xứng của các cực thu.



Hình 2.4: Mối quan hệ giữa điện dung vi sai ΔC_1 , ΔC_2 và góc nghiêng khi cảm biến nghiêng theo trục x và trục y .

Để cải thiện phạm vi tuyến tính của cảm biến cũng như độ nhạy, Luận án tiến hành tối ưu các tham số điện cực bằng phần mềm Comsol Multiphysics.

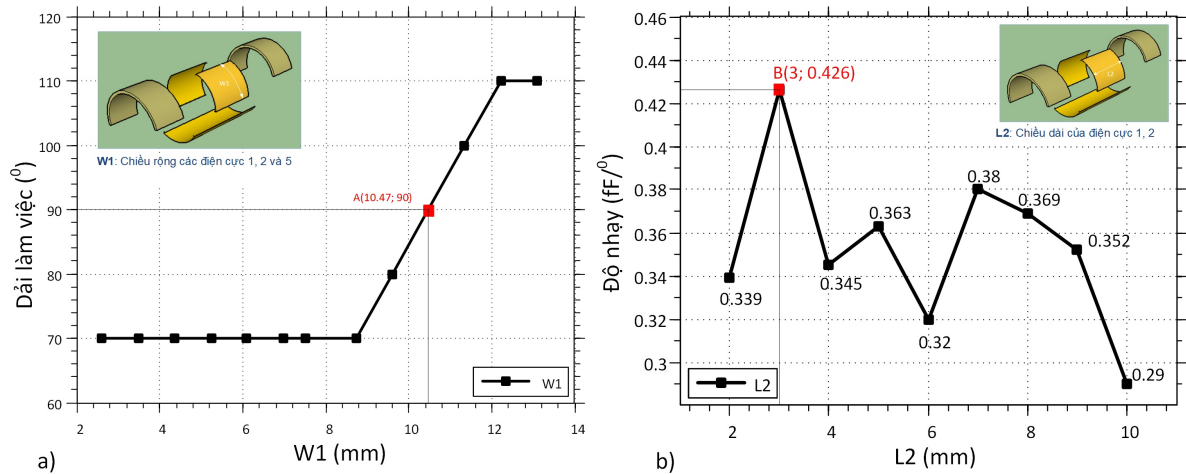
2.2.5 Khảo sát các điện cực của cảm biến nghiêng khi quay theo trục x

Khảo sát chiều rộng của điện cực- W_1

Trong mô phỏng này, thực hiện cố định chiều dài của điện cực cảm biến trục x (điện cực 1,2) $L_2 = 5 mm$ và lần lượt thay đổi kích thước W_1 của các điện cực (1, 2 và 5).

Nhìn vào đồ thị hình 2.5 a) ta chọn được kích thước các điện cực (1, 2 và 5)

có giá trị là $W_1 = 10,47 \text{ mm}$, đây là dải làm việc tối ưu của cảm biến theo trục x vì các điện cực của trục x được đặt đối xứng. Nhờ tính đối xứng nên góc nghiêng sẽ đồng biến trong phạm vi $0^\circ \div 90^\circ$ và nghịch biến trong phạm vi $90^\circ \div 180^\circ$ và đồ thị có dạng gần giống hình sin. Tương tự như vậy, đồ thị trong dải góc nghiêng từ $-180^\circ \div -90^\circ$ sẽ đảo ngược do cấu trúc đối xứng của cảm biến.

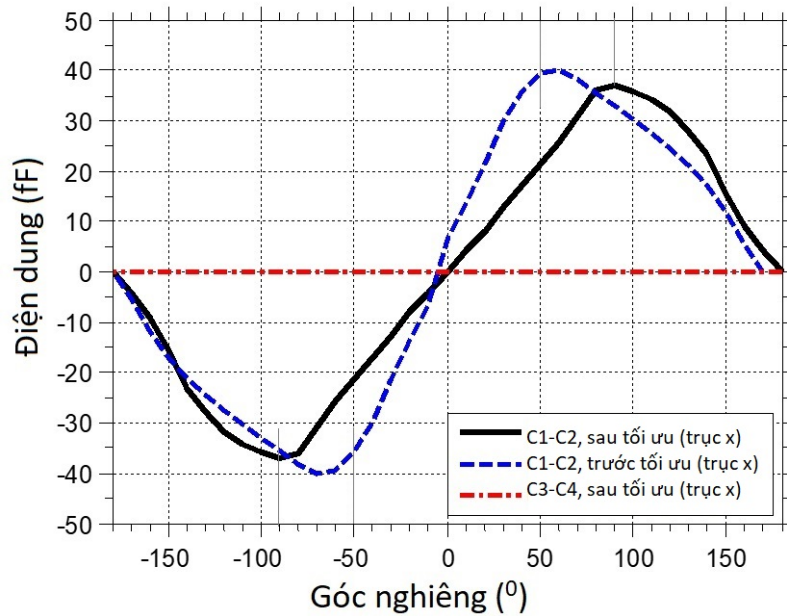


Hình 2.5: a) Mối quan hệ giữa dải làm việc của cảm biến và kích thước W_1 ; b) Mối quan hệ giữa kích thước L_2 và độ nhạy của cảm biến.

Khảo sát chiều dài L_2 của điện cực

Từ kết quả khảo sát $W_1 = 10,47 \text{ mm}$, ta lần lượt thay đổi kích thước L_2 của các điện cực (1, 2) để khảo sát độ nhạy của cảm biến. Đồ thị hình 2.5 b) thể hiện sự thay đổi kích thước của chiều dài L_2 và độ nhạy của cảm biến. Qua đồ thị 2.5 b) ta thấy khi $L_2 = 3 \text{ mm}$ thì độ nhạy của cảm biến đạt giá trị cao nhất là $0,426 fF/^\circ$. Như vậy, ở cấu trúc tối ưu thì phạm vi hoạt động lớn hơn, nhưng độ nhạy nhỏ hơn một chút. Sau khi tối ưu, diện tích điện cực 1 và 2 có giá trị là $(10,47 \times 3,00 \text{ mm})^2 (W_1 \times L_2)$.

Hình 2.6 cho thấy khả năng làm việc của cấu trúc được tối ưu hóa theo hướng quay trục x khi so sánh với thiết kế trong phần 2.2.2 (hình (2.4a)). Phạm vi làm việc của cấu trúc được tối ưu hóa lên tới $\pm 90^\circ$ trong khi cấu trúc trước khi tối ưu là khoảng $\pm 50^\circ$ (xem hình 2.6) [33]. Kết quả cũng cho thấy giá trị điện dung



Hình 2.6: Điện dung thay đổi khi cấu trúc quay theo trục x .

vi sai ($C_3 - C_4$) không thay đổi khi lăn dọc trục x . Trong thiết kế này, độ nhạy của cảm biến trên trục x khoảng $0,426 \text{ fF}/^\circ$. Đặc tính tuyến tính của cấu trúc tối ưu hóa được cải thiện hơn nhiều so với thiết kế trước khi được tối ưu trong phần 2.2.2.

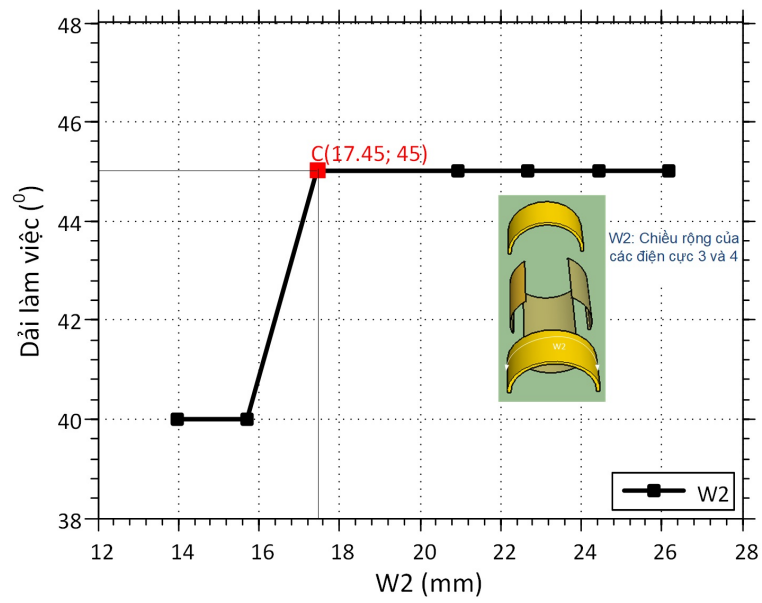
Theo một quy trình tương tự, kích thước W_2, L_3 được tối ưu hóa khi cảm biến quay theo trục y .

2.2.6 Khảo sát các điện cực của cảm biến nghiêng khi quay theo trục y

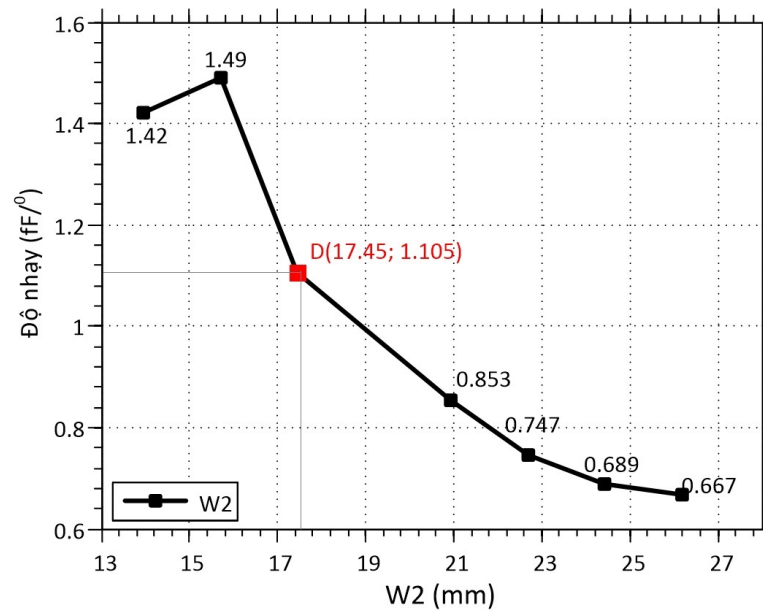
Khảo sát chiều rộng W_2 của điện cực (3, 4) theo hướng trục y

Để thực hiện khảo sát phạm vi làm việc của cảm biến, ta giữ cố định chiều dài của điện cực cảm biến trục y (3, 4) - $L_3 = 7 \text{ mm}$ và lần lượt thay đổi chiều rộng W_2 của điện cực (3, 4). (Đồ thị hình 2.7). Đồ thị khảo sát độ nhạy cảm biến khi thay đổi kích thước W_2 được chỉ ra trên hình 2.8.

Dựa vào hai đồ thị trên hình 2.7 và 2.8 ta thấy rằng với $W_2 = 17,45 \text{ mm}$ thì



Hình 2.7: Đồ thị khảo sát dải làm việc khi thay đổi kích thước W_2 .

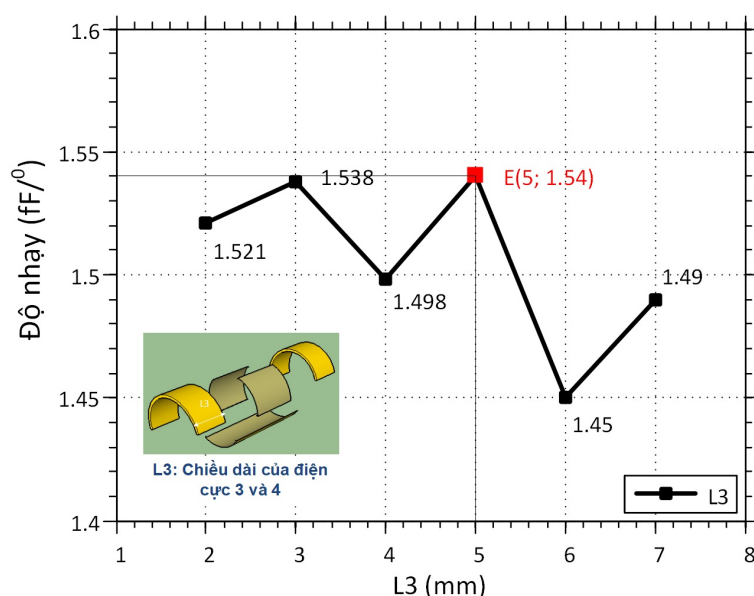


Hình 2.8: Đồ thị khảo sát độ nhạy cảm biến khi thay đổi kích thước W_2 .

cảm biến sẽ có độ nhạy và dải làm việc thích hợp.

Qua hai khảo sát hoạt động của cảm biến theo hai trục x và trục y , ta thấy phạm vi làm việc của cảm biến quay một góc theo trục y nhỏ hơn khi quay một góc theo trục x . Khi cảm biến quay một góc đủ lớn theo trục y thì dung dịch trong ống sẽ ngập kín toàn bộ một trong hai điện cực của trục y và điện cực còn lại sẽ không còn lượng dung dịch nào chạm tới, điều này dẫn đến điện dung vì sai bị giảm, nên phạm vi hoạt động của cảm biến cũng bị thu hẹp lại.

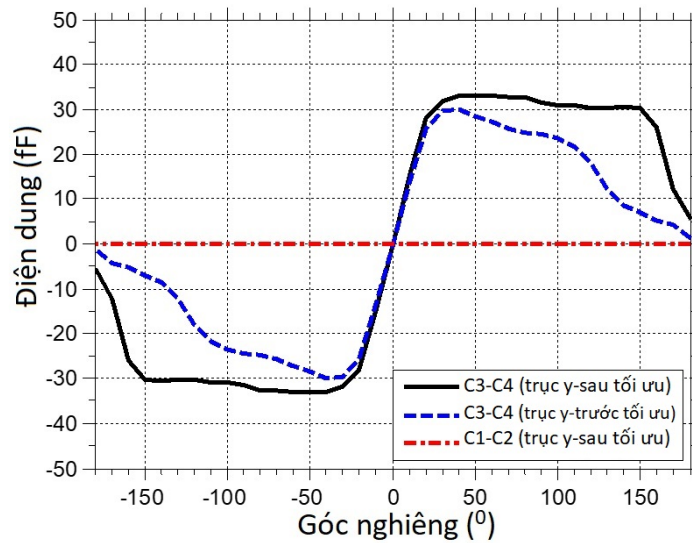
Khảo sát chiều dài điện cực cảm biến trục y (điện cực 3, 4)- L_3



Hình 2.9: Đồ thị khảo sát độ nhạy cảm biến khi thay đổi kích thước L_3 .

Sau khi đã chọn được kích thước của điện cực (3, 4) $W_2 = 17,45 \text{ mm}$, ta lần lượt thay đổi chiều dài điện cực cảm biến trục y để khảo sát phạm vi hoạt động và độ nhạy của cảm biến. Kết quả mô phỏng cho thấy, mặc dù thay đổi giá trị L_3 nhưng phạm vi hoạt động của cảm biến vẫn giống nhau, chỉ có độ nhạy của cảm biến khác nhau.

Đồ thị hình 2.9 là kết quả mô phỏng khi khảo sát độ nhạy của cảm biến khi thay đổi giá trị của L_3 . Qua đó, ta thấy cảm biến đạt được độ nhạy lớn nhất ($1,54 \text{ fF}/^\circ$) khi $L_3 = 5 \text{ mm}$.



Hình 2.10: Đồ thị khảo sát sự thay đổi giá trị điện dung khi cảm biến nghiêng theo trục y .

Vậy, kích thước tối ưu của điện cực trục y là $L_3 = 5 \text{ mm}$ và $W_2 = 17,45 \text{ mm}$. Phạm vi hoạt động lớn nhất của cảm biến từ -45° đến $+45^\circ$ với độ nhạy $1,54 \text{ fF}^\circ$.

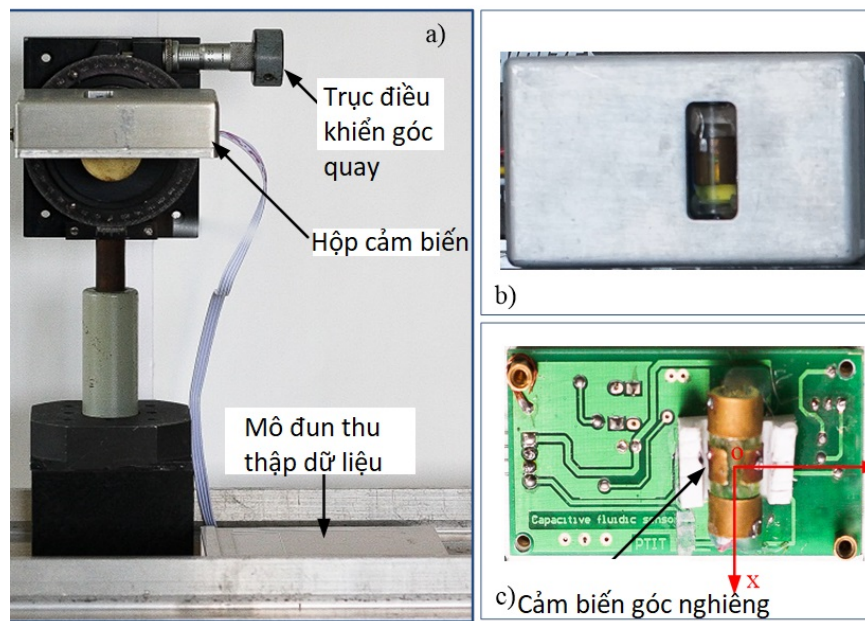
Đồ thị hình 2.10 chỉ ra khi cảm biến quay theo trục y thì hiệu điện dung của hai tụ C_1 và C_2 ($\Delta C_1 = C_1 - C_2$) xấp xỉ bằng không, điều này chứng tỏ khi cảm biến quay theo trục y thì tín hiệu của cặp tụ (C_1, C_2) tạo ra nhiễu xuyên kênh (crosstalk) là rất nhỏ.

Dựa vào kết quả mô phỏng, Luận án tìm được kích thước tối ưu của cảm biến nghiêng: $W_1 = 10,47 \text{ mm}$, $L_2 = 3 \text{ mm}$ và $L_3 = 5 \text{ mm}$, $W_2 = 17,45 \text{ mm}$.

2.2.7 Thực nghiệm

Sau khi thu được kích thước tối ưu, Luận án tiến hành chế tạo và khảo sát hoạt động của cấu trúc cảm biến.

Cấu trúc cảm biến bao gồm năm điện cực đồng và một ống hình trụ bằng nhựa. Ống hình trụ chứa 75% thể tích xăng (hằng số điện môi là 2) và 25% thể



Hình 2.11: Thiết lập phép đo. a) Cảm biến được gắn trên hệ quay; b) Cảm biến và mạch xử lý được đóng gói trong hộp kín; c) Bảng mạch xử lý tín hiệu.

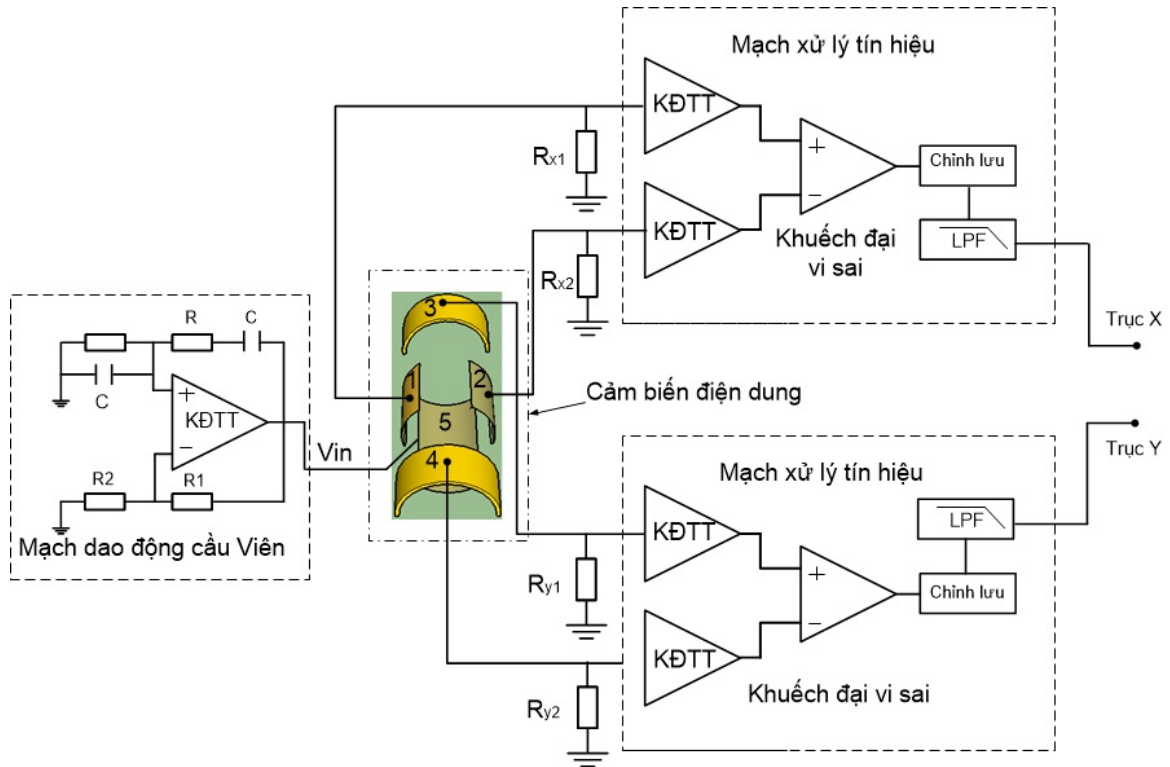
tích không khí (hằng số điện môi là 1). Sau đó, ống được niêm phong hoàn toàn bằng nhựa epoxy để tránh bay hơi hoặc rò rỉ. Các điện cực đồng chế tạo bằng máy CNC và được gắn bên ngoài ống hình trụ (hình 2.11).

Thiết lập hệ thống đo lường được hiển thị trong Hình 2.11. Cảm biến độ nghiêng được đề xuất được gắn trên bảng mạch in (PCB) với các mạch điện tử. Bản mạch PCB được đóng gói trong một hộp kín và sau đó được đặt trên một đĩa quay với độ phân giải là $0,1^0$.

Góc nghiêng của PCB được thay đổi dần dần trong khoảng $-180^0 \div +180^0$ bằng cách nghiêng đĩa và ghi lại các giá trị điện áp đầu ra tương ứng. Tín hiệu hình sin được đưa vào điện cực kích thích. Tín hiệu đầu vào của bộ khuếch đại vi sai được lấy từ điện cực kích thích. Điện áp đầu ra bộ khuếch đại vi sai được đưa đến máy tính (PC) để thu thập và xử lý bằng cách sử dụng phần mềm National Instruments Data Acquisition (DAQ) và LabVIEW.

Đầu tiên, bản mạch PCB được căn chỉnh để khảo sát hiệu suất phát hiện góc theo hướng trục x của cảm biến. Sau đó, nó được xoay 90 độ trong mặt phẳng

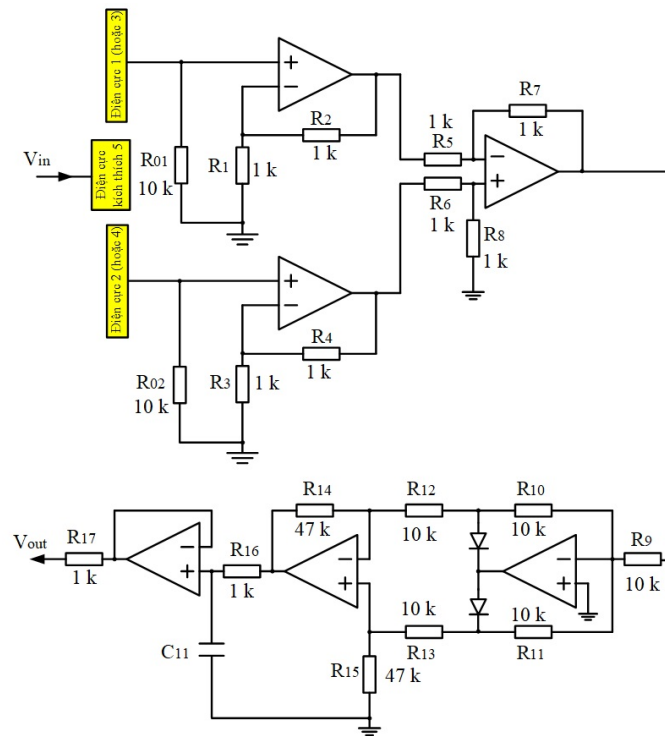
thẳng đứng để khảo sát hiệu suất của cảm biến ở góc theo hướng trục y . Bên cạnh đáp ứng biên độ trên cả hai trục, các tính chất tác động chéo lên các trục cũng được khảo sát.



Hình 2.12: Sơ đồ khối của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng.

Sơ đồ khối của mạch điện tử được đưa ra trong hình 2.12. Bằng cách sử dụng mạch cầu Wien cùng với bộ khuếch đại TL084 đã tạo ra được tín hiệu hình sin với tần số 170 kHz , tín hiệu này được nối với điện cực kích thích. Tần số của bộ dao động được điều khiển bởi điện trở R và tụ điện C ; biên độ đầu ra được điều chỉnh bởi các điện trở R_1 và R_2 . Do điện áp trên các điện cực cảm biến thay đổi theo giá trị điện dung tương ứng, nên các góc theo hướng trục x và trục y có thể được theo dõi bằng cách đo biên độ của cặp điện áp vi sai ($V_{C1} - V_{C2}$) và ($V_{C3} - V_{C4}$) tương ứng.

Mạch khuếch đại chuyển đổi tín hiệu dòng điện thành điện áp bằng cách sử dụng bốn điện trở R_{x1} , R_{x2} , R_{y1} và R_{y2} . Tín hiệu điện áp sau đó được đưa vào bộ tiền khuếch đại trước khi đi vào bộ khuếch đại vi sai. Mạch giải điều chế biên

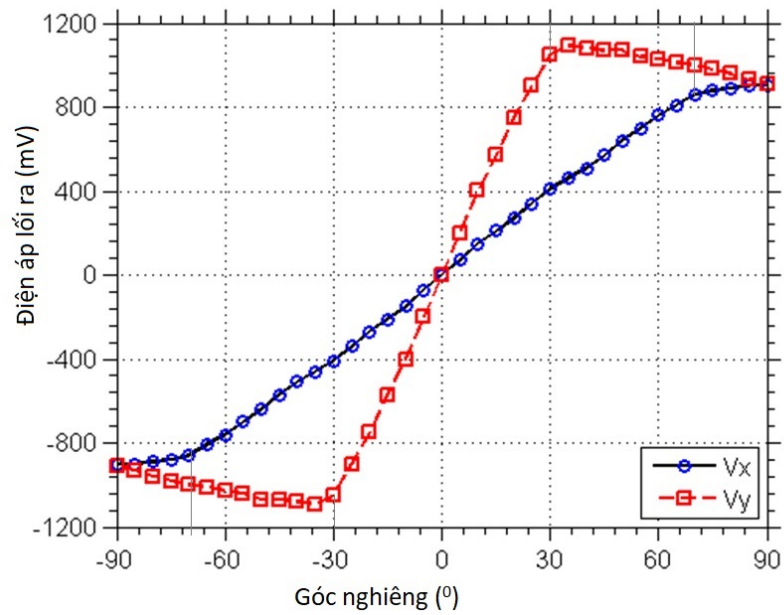


Hình 2.13: Sơ đồ mạch điện xử lý tín hiệu của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng.

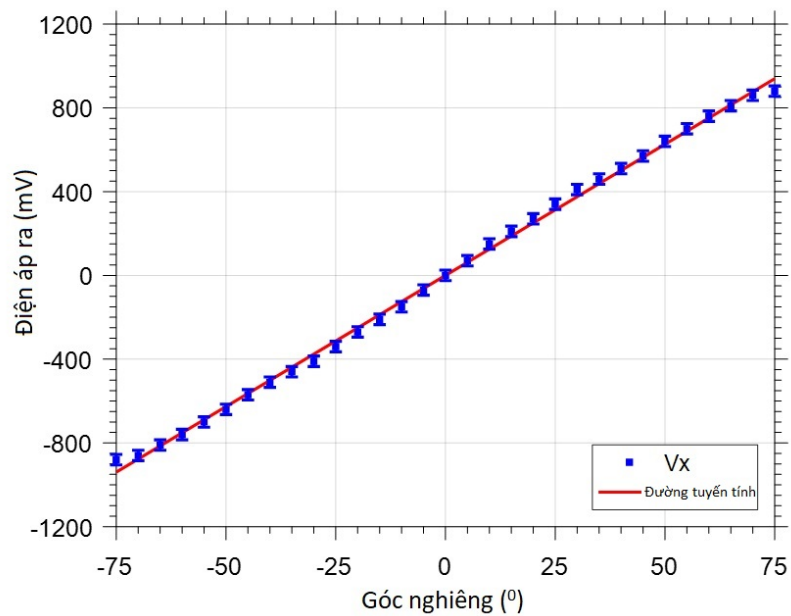
độ bao gồm bộ chỉnh lưu cả chu kỳ và bộ lọc thông thấp RC (LPF) với tần số cắt 16 Hz . Điện áp đầu ra của các mạch LPF là đầu ra của cảm biến nghiêng, trong đó V_x và V_y là điện áp phát hiện góc của trục x và trục y . Trong thiết kế này, bộ khuếch đại vi sai được sử dụng không chỉ để lấy điện áp vi sai giữa mỗi cặp điện áp mà còn loại bỏ nhiễu phổ biến như nhiễu công nghiệp ở tần số 50 Hz và các nguồn nhiễu khác. Sơ đồ mạch điện dùng để xử lý tín hiệu được chỉ ra trên hình 2.13.

Mối quan hệ giữa điện áp đầu ra đo được V_x và V_y với góc theo hướng trục x và trục y được thể hiện trong hình 2.14. Đồ thị cho thấy phạm vi đo của cảm biến theo hướng trục x lớn hơn trục y do nguyên tắc thiết kế của cảm biến.

Hình 2.15 cho thấy kết quả đo gần như tuyến tính khi cảm biến nghiêng theo trục x . Vùng tuyến tính của cảm biến trong khoảng từ -70° đến $+70^\circ$ với độ nhạy khoảng $12,4\text{ mV}/^\circ$. Đối với cấu trúc trước khi tối ưu, thì độ nhạy của cảm

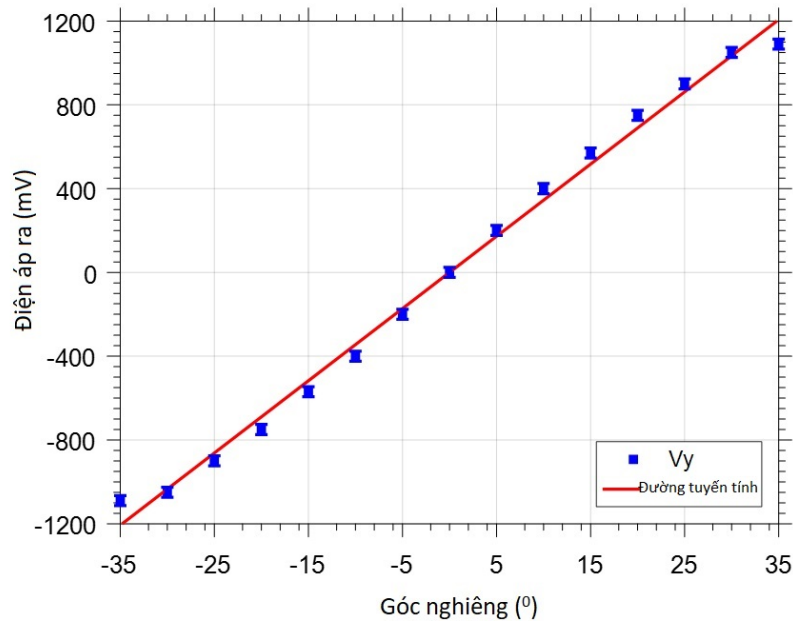


Hình 2.14: Sự thay đổi của điện áp ra tương ứng với góc nghiêng theo trục x , y .



Hình 2.15: Sự thay đổi của điện áp ra tương ứng với góc nghiêng trên trục x (từ -70° đến $+70^{\circ}$).

biến là $16 \text{ mV}/^\circ$ trong khoảng tuyến tính từ -60° đến $+60^\circ$.



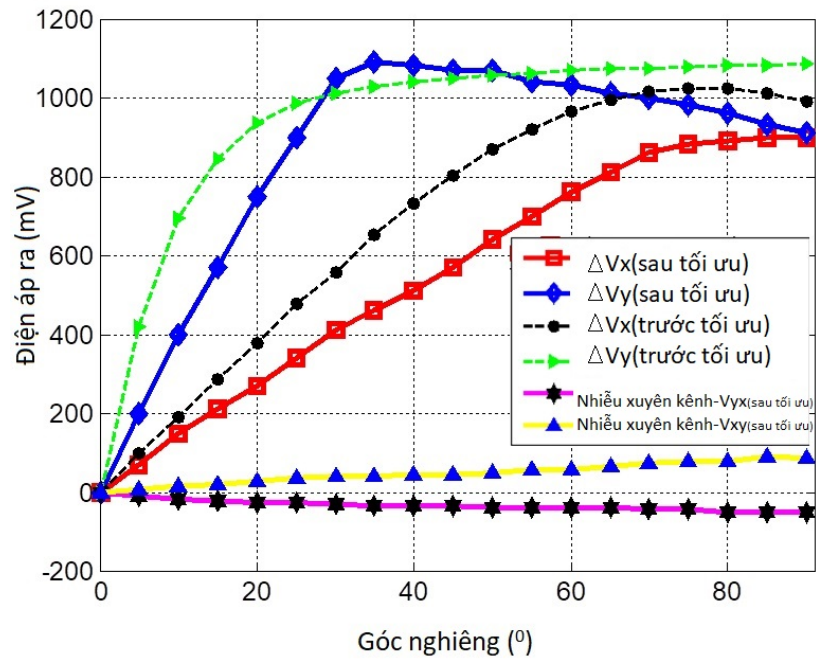
Hình 2.16: Sự thay đổi của điện áp ra tương ứng với góc nghiêng trên trục y (từ -30° đến $+30^\circ$).

Hình 2.16 cho thấy phạm vi tuyến tính của cấu trúc đồng nhất với đường tuyến tính. Vùng tuyến tính của cảm biến nằm trong khoảng -30° đến $+30^\circ$ với độ nhạy khoảng $34,8 \text{ mV}/^\circ$. Đối với cấu trúc trước khi tối ưu, thì độ nhạy của cảm biến là $39,6 \text{ mV}/^\circ$ trong khoảng tuyến tính từ -25° đến $+25^\circ$.

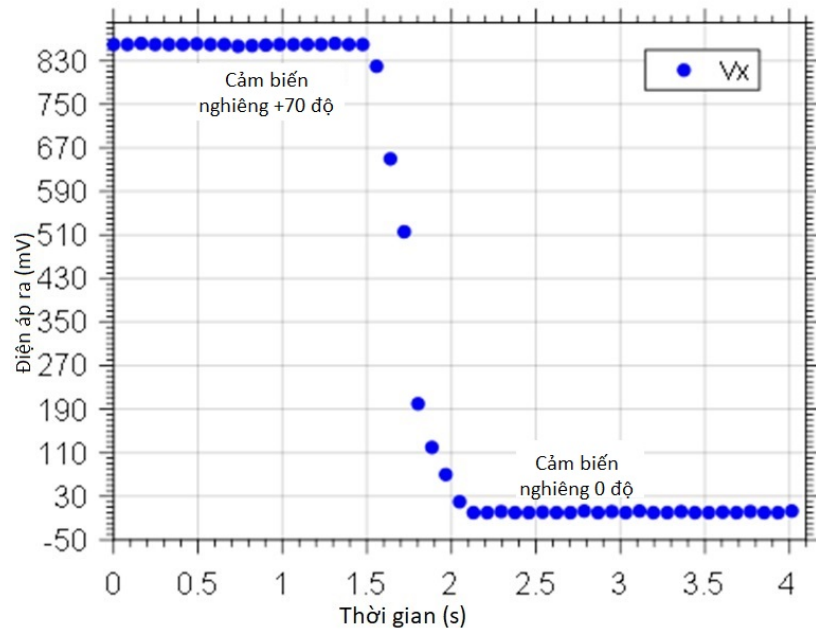
Phạm vi tuyến tính đo được ở cả trục x và trục y nhỏ hơn một chút so với giá trị mô phỏng, do bỏ qua các tác động của môi trường xung quanh và giữa các điện cực thu trong mô hình hóa và mô phỏng.

Hình 2.17 cho thấy điện áp đầu ra của cảm biến theo trục x và trục y trong phạm vi độ nghiêng từ 0° đến 90° với tín hiệu nhiễu xuyên kênh. Các đầu ra cấu trúc được tối ưu hóa được cải thiện hơn nhiều khi so sánh với thiết kế trước khi tối ưu.

Hình 2.18 cho thấy thời gian đáp ứng đo của cảm biến. Nó cho thấy rằng điện áp đầu ra có trạng thái ổn định sau khoảng 0,6 giây khi áp dụng độ nghiêng từ



Hình 2.17: Sự thay đổi của điện áp ra và nhiễu xuyên kênh khi cảm biến nghiêng trong dải 0° đến 90° .



Hình 2.18: Đáp ứng thời gian của cảm biến.

70^0 đến 0^0 hoặc ngược lại. Do đó, cấu trúc này có thể theo dõi những dao động nghiêng với biên độ lên đến 70^0 và tần số lớn nhất $1,5 \text{ Hz}$. Tần số hoạt động của cảm biến sẽ lớn hơn nhiều đối với các dao động nghiêng (rung) có biên độ nhỏ.

2.2.8 Độ nhạy của cấu trúc cảm biến

Đặc trưng của các cảm biến phát hiện độ nghiêng nói chung và cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng nói riêng dựa trên công nghệ MEMs đều có kích thước nhỏ, công suất tiêu thụ thấp. Các cảm biến này đều có chung một nhược điểm đó là khi góc nghiêng càng lớn thì độ nhạy càng thấp. Việc cải thiện độ nhạy là vấn đề đã và đang nhận được nhiều quan tâm.

Độ nhạy của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng biểu thị độ lớn của sự thay đổi trên đầu ra khi thay đổi độ lớn của góc nghiêng đầu vào.

Do vậy, dựa vào các kết quả đo được, Luận án tính được độ nhạy của cấu trúc. Ví dụ, đối với cấu trúc cảm biến trước khi tối ưu kích thước:

Độ nhạy của cảm biến khi phát hiện độ nghiêng theo trục x là: $960 \text{ mV}/60 \text{ độ} = 16 \text{ (mV/độ)}$; theo trục y là: $990 \text{ mV}/25 \text{ độ} = 39,6 \text{ (mV/độ)}$.

Sau khi tối ưu kích thước, độ nhạy của cảm biến theo trục x là: $870 \text{ mV}/70 \text{ độ} = 12,4 \text{ (mV/độ)}$; theo trục y là: $1045 \text{ mV}/30 \text{ độ} = 34,8 \text{ (mV/độ)}$.

Như vậy, ta thấy rằng sau khi tối ưu kích thước thì phạm vi làm việc tuyến tính tăng lên nhưng độ nhạy lại giảm. Tuy nhiên, độ nhạy có thể được cải thiện bằng cách sử dụng một chất lỏng khác có hằng số điện môi cao hơn.

Độ phân giải là thay đổi nhỏ nhất trong phạm vi đo có thể được phát hiện, đó là một trong những thông số quan trọng của hệ thống cảm biến nghiêng. Yếu tố cơ bản trong xác định độ phân giải đó là nhiễu. Sự xuất hiện của nhiễu chính là nguyên nhân gây ra sai số. Độ phân giải được xác định bằng cách chia nhiễu cho độ nhạy. Ví dụ, nhiễu đo được khoảng 5 mV với độ nhạy là $12,4 \text{ (mV/độ)}$ thì độ phân giải bằng khoảng $0,4 \text{ độ}$.

Trong kết quả của mọi phép đo vật lý luôn xuất hiện nhiễu, và do đó, nhiễu

cũng xuất hiện trong tất cả các hệ thống đo lường điện. Có thể phân chia nhiễu thành nhiễu ngoài (external noise) và nhiễu trong (internal noise). Nhiễu ngoài có thể phát sinh từ nhiễu công nghiệp, nhiễu xuyên kênh từ các nguồn tín hiệu khác,... Nhiễu trong bao gồm một số loại nhiễu như: nhiễu nhiệt (Johnson noise), nhiễu $1/f$ ($1/f$ noise).

Thông thường, đo và phân tích chính xác các nguồn nhiễu cũng như phân tích vai trò của từng nguồn nhiễu là một bài toán rất khó. Trong Luận án này, để đơn giản, nghiên cứu sinh thực hiện đo độ lớn của nhiễu tác động lên các hệ đo thông qua xác định trung bình biên độ trung bình của tín hiệu lỗi ra của hệ thống khi đặt cảm biến ổn định ở vị trí cân bằng. Do cảm biến nghiêng trong luận án này được thiết kế dựa trên nguyên lý điện dung, nên về cơ bản, nhiệt độ của môi trường ảnh hưởng rất ít lên cảm biến, nó chỉ thay đổi đáp ứng của cảm biến thông qua thay đổi tính chất của chất lỏng sử dụng như hằng số điện môi, độ dính ướt bề mặt, độ giãn nở. Bên cạnh đó, nhiệt độ có thể làm thay đổi hoạt động của các linh kiện điện tử sử dụng trong mạch như điện trở, mạch khuếch đại,... Tuy vậy, các ảnh hưởng này thông thường khá nhỏ và có thể bỏ qua không cần xét đến trong trường hợp cảm biến dạng này.

Cảm biến được đề xuất được gắn lên mạch PCB, nó được đóng gói vào một hộp kín như một lồng pharaday để cách ly hệ thống đo ra khỏi các nguồn gây nhiễu bên ngoài. Bằng cách đặt cảm biến lên mạch đo, mà các dây kết nối các điện cực cảm biến từ cấu trúc cảm biến tới mạch đo cũng được rút ngắn và điện dung ký sinh do các dây này gây ra sẽ bị giảm. Kỹ thuật dùng 'khiên' bảo vệ hệ thống cảm biến có thể sử dụng trong tương lai để giảm thiểu điện dung ký sinh.

Độ chính xác của cảm biến cũng là một thông số quan trọng để đánh giá cấu trúc. Do đó, để xác minh độ chính xác của các phép đo trong toàn thang, các thí nghiệm được thực hiện lặp lại nhiều lần để cho ra kết quả ổn định.

2.2.9 Nhận xét

Như vậy, sau khi thực hiện việc tối ưu hóa kích thước của các điện cực, cảm biến nghiêng được đề xuất có độ nhạy $12,4 \text{ mV/}^\circ$ và độ phân giải $\pm 0,4^\circ$ khi nghiêng theo trục x một góc nằm trong khoảng $[-70^\circ, +70^\circ]$ và có độ nhạy $34,8 \text{ mV/}^\circ$ và độ phân giải $\pm 0,14^\circ$ khi nghiêng theo trục y một góc nằm trong khoảng $[-30^\circ, +30^\circ]$. So với cấu trúc trước khi tối ưu hóa kích thước thì phạm vi làm việc đã được cải thiện.

Trên đây Luận án đã đề cập đến việc nghiên cứu, mô phỏng, thiết kế và khảo sát thành công cấu trúc cảm biến nghiêng điện dung hai trục. Tuy nhiên, phạm vi làm việc của cảm biến này khi nghiêng theo trục x và trục y không tương đương do tính không đối xứng của cấu trúc cảm biến. Trong phần tiếp theo, Luận án đề xuất cấu trúc cảm biến nghiêng đối xứng hình cầu hai trục dựa trên môi trường điện môi là không khí và chất lỏng để đạt được các tính chất như nhau trên cả hai trục của cảm biến.

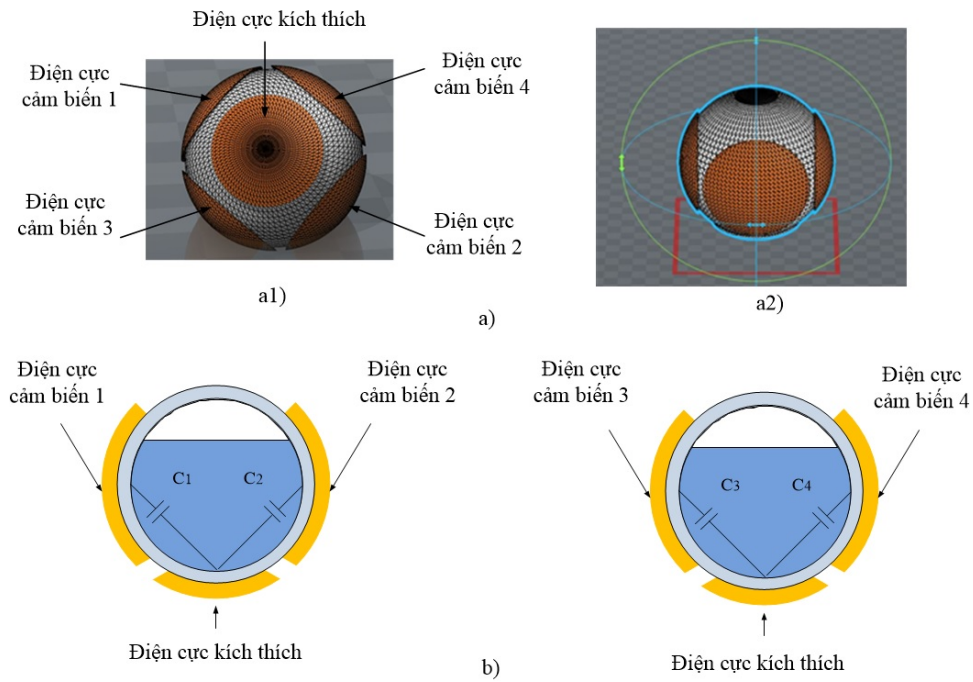
2.3 Cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục in 3D

Bằng cách sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics, nguyên lý làm việc của cảm biến được xác định bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Lượng chất lỏng được tối ưu cho phạm vi làm việc tuyến tính. Cảm biến được chế tạo bằng công nghệ tạo mẫu nhanh.

2.3.1 Cấu trúc và mô phỏng cảm biến nghiêng

Cấu trúc của cảm biến nghiêng có dạng hình cầu được trình bày trong hình 2.19.

Chất điện môi hai pha lỏng/khí được đặt trong một hộp nhựa hình cầu rỗng có đường kính 10 mm , tương đương 523 mm^3 . Bốn điện cực mỏng, tròn làm



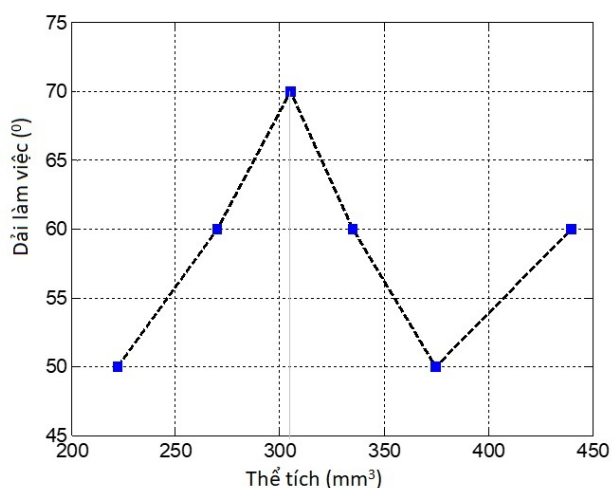
Hình 2.19: Cấu trúc của cảm biến nghiêng: a) Dạng hình học, (a1) Nhìn từ dưới lên, (a2) Nhìn toàn cảnh; (b) Các cặp tụ điện cảm biến trên trục x (C_1, C_2) và trục y (C_3, C_4).

bằng đồng được uốn cong theo hình dạng kênh dẫn tạo thành hai cặp điện cực cảm biến. Các điện cực cảm biến của từng cặp là đối xứng nhau qua tâm hình cầu và hai trục đối xứng của từng cặp là vuông góc nhau, từ đó tạo thành các trục cảm biến của cấu trúc. Ở phía dưới cùng của hình cầu, một điện cực đồng khác được gắn sao cho trục đối xứng của nó thẳng hàng với trục đối xứng của toàn bộ cấu trúc. Điện cực này được gọi là điện cực kích thích. Các điện cực tạo thành hai cặp tụ điện được gán tên là $C_1 - C_2$ và $C_3 - C_4$. Bằng cách ghi nhận sự thay đổi về giá trị của cặp tụ điện này ta có thể phát hiện ra độ nghiêng.

Đặc tính của mô hình cảm biến được nghiên cứu bằng cách sử dụng phân tích phần tử hữu hạn trong COMSOL Multiphysics. Môi trường điện môi hai pha nước / không khí có tác động mạnh đến phạm vi làm việc hay phạm vi đặc tính tuyến tính của cảm biến.

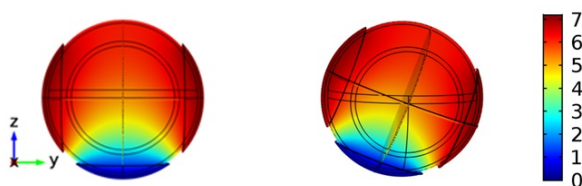
Thể tích của chất lỏng (nước tinh khiết) thay đổi từ 222 mm^3 đến 440 mm^3

(tương đương từ 42% đến 84% thể tích bên trong hình cầu) và tiến hành khảo sát các tác động tương ứng trên phạm vi làm việc của cảm biến. Các kết quả được hiển thị trong hình 2.20.



Hình 2.20: Dải làm việc của cảm biến tương ứng với thể tích nước chứa trong hình cầu.

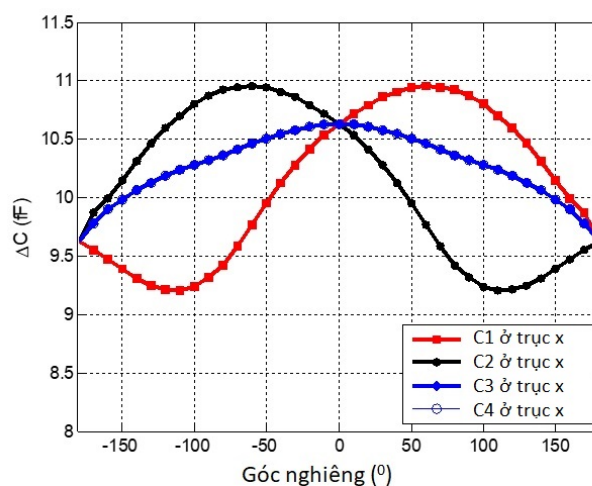
Qua đồ thị hình 2.20, ta thấy rằng phạm vi làm việc lớn nhất của cấu trúc (nghiêng 70°) đạt được khi thể tích chất lỏng chiếm khoảng 60% thể tích hình cầu (tương đương 305 mm^3).



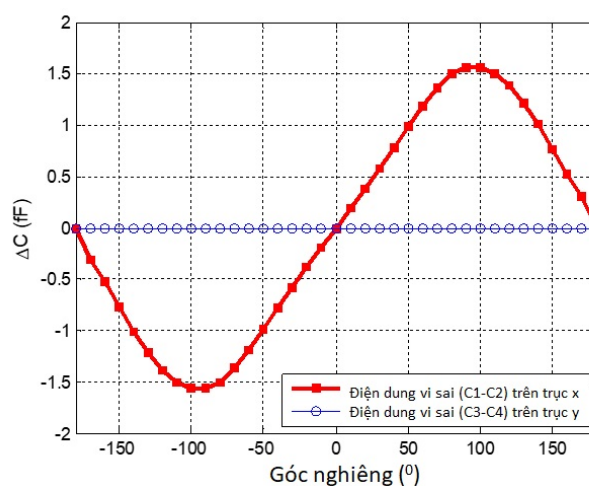
Hình 2.21: Sự phân bố điện trường của cảm biến tại góc 0° (bên trái) và góc 20° (bên phải)

Luận án tiếp tục khảo sát sự phân bố của điện trường của cảm biến bằng cách đặt điện áp một chiều ($+7 \text{ V}$) vào giữa điện cực kích thích và điện cực cảm biến khi cảm biến ở vị trí cân bằng (0°) và khi nghiêng một góc 20° (hình 2.21).

Với lượng chất lỏng chiếm khoảng 60% thể tích hình cầu, ta tiến hành khảo sát hoạt động của cảm biến trong phạm vi $\mp 180^\circ$ theo hai hướng trục x và trục y . Kết quả được hiển thị trong hình 2.22.



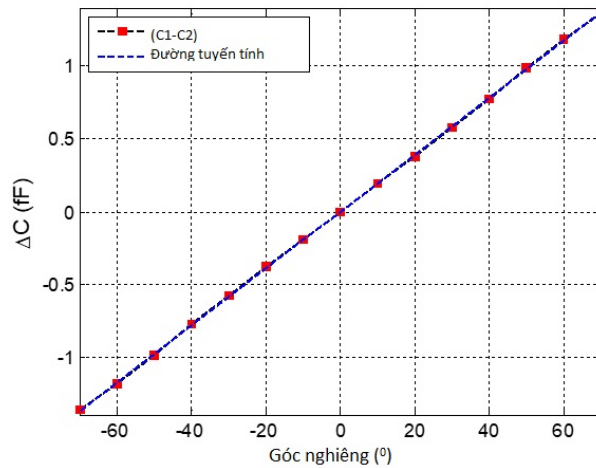
Hình 2.22: Khảo sát hoạt động của cảm biến trong dải đo -180° đến $+180^\circ$



Hình 2.23: Khảo sát giá trị vi sai của cặp tụ C_1, C_2 trên trục x và cặp tụ C_3, C_4 trên trục y

Để đánh giá sự ảnh hưởng lẫn nhau của hai trục x và trục y khi thực hiện nghiêng cảm biến, luận án đã tiến hành khảo sát giá trị điện dung vi sai của từng cặp tụ điện.

Hình 2.23 cho thấy điện dung vi phân của các cặp $C_1 - C_2(\Delta Cx)$ và $C_3 - C_4(\Delta Cy)$. Qua hình ta thấy rằng ΔCy không bị ảnh hưởng gì khi ΔCx thay đổi giá trị một cách đáng kể. Điều này cho thấy rằng hoạt động cảm biến ở hai trục vuông góc được cách ly tốt.



Hình 2.24: Sự thay đổi của điện dung vi sai theo góc nghiêng trong phạm vi hoạt động của cảm biến từ -70^0 đến $+70^0$

Hình 2.24 cho thấy phần tuyến tính của phạm vi làm việc của cấu trúc được đề xuất trong trục x . Độ tuyến tính đạt được trong khoảng từ -70^0 đến $+70^0$. Kết quả tương tự cho hoạt động của trục y . Sự khác biệt so với nghiên cứu trước đây [33], tính đối xứng này trong thuộc tính cảm biến là do cấu trúc đối xứng của cảm biến. Khi cảm biến nghiêng theo một trục, vùng phủ của dung dịch trên hai điện cực lên trục kia sẽ có cùng sự thay đổi. Điều này dẫn đến điện dung vi sai giữa hai cặp điện cực tương ứng có giá trị bằng 0.

2.3.2 Thực nghiệm

Để xác nhận chức năng của cấu trúc, nên sau khi tiến hành mô phỏng, Luận án đã chế tạo nguyên mẫu bằng cách sử dụng công nghệ in 3D. Máy in 3D được cung cấp bởi hãng Stratasys và mẫu là các lớp vật liệu nhựa có kích thước 30 nm . Giả định rằng sự ảnh hưởng của vật liệu và độ dày của quả cầu không ảnh

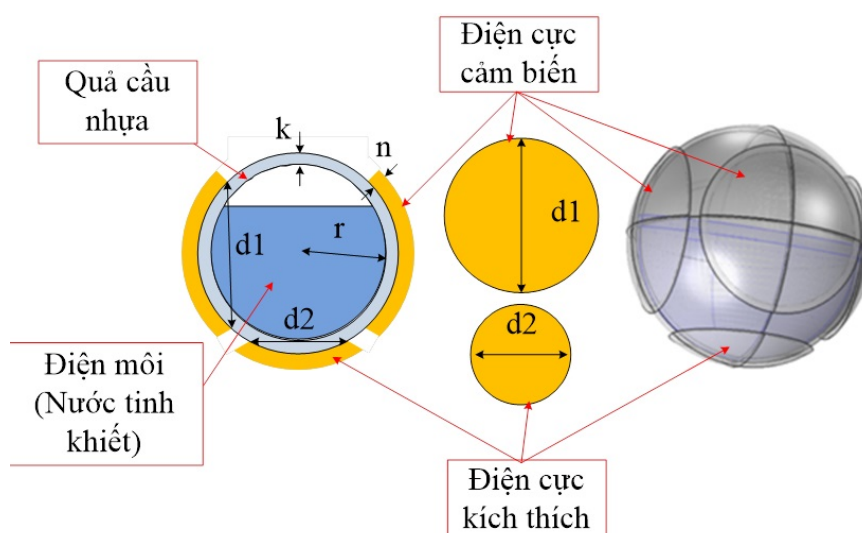
Bảng 2.3: Các thông số của cảm biến nghiêng hai trục

Thông số	Giá trị (mm)
Bán kính hình cầu (mặt trong)(r)	5.00
Độ dày vỏ hình cầu (k)	0.20
Đường kính của điện cực cảm biến ($d1$)	5.50
Đường kính của điện cực kích thích ($d2$)	4.60
Độ dày của điện cực (n)	0.20

hưởng đến hoạt động của cấu trúc cảm biến.

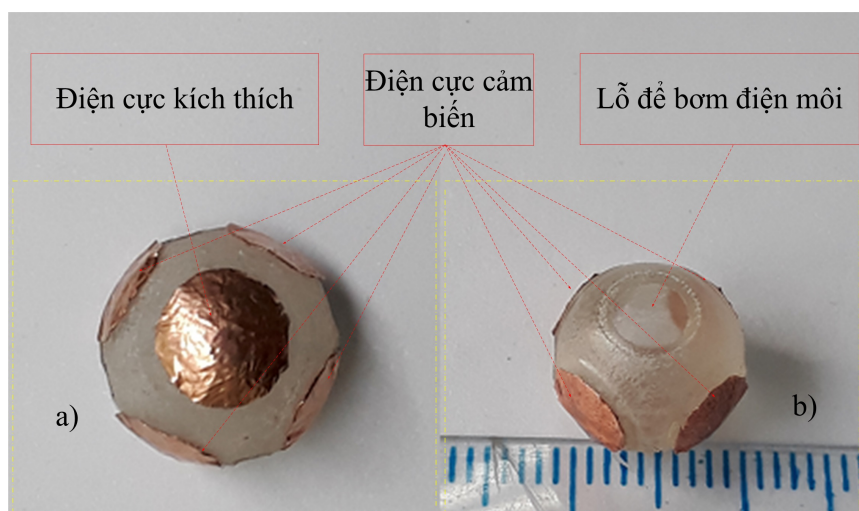
Để tạo ra hai pha lỏng-khí, một phần nước tinh khiết được đổ vào quả cầu (chiếm 60% thể tích quả cầu). Năm điện cực bằng đồng được gắn bên ngoài quả cầu. Các thông số của cấu trúc được cho trong bảng 2.3.

Hình 2.25 là cấu trúc của cảm biến và hình 2.26 nguyên mẫu của cảm biến được chế tạo.



Hình 2.25: Cấu trúc của cảm biến điện dung

Hình 2.27 cho thấy thiết lập thử nghiệm cho phép đo góc nghiêng. Cấu trúc cảm biến được gắn trên một PCB và PCB được đặt chắc chắn trên một đĩa



Hình 2.26: Nguyên mẫu của cảm biến: a) Nhìn từ dưới lên; b) Nhìn từ trên xuống

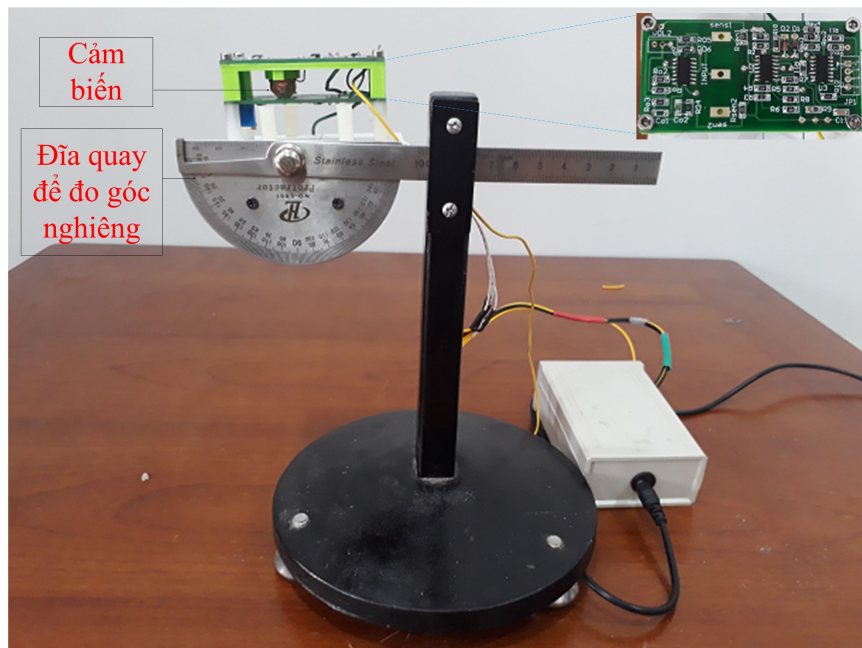
quay với độ phân giải 1° .

Một máy phát cung cấp tín hiệu sin 127 kHz cho điện cực kích thích và bốn điện cực khác hoạt động như bộ thu. Dầu ra của cảm biến được đưa vào mạch chuyển đổi để thu được điện áp đầu ra thay vì điện dung.

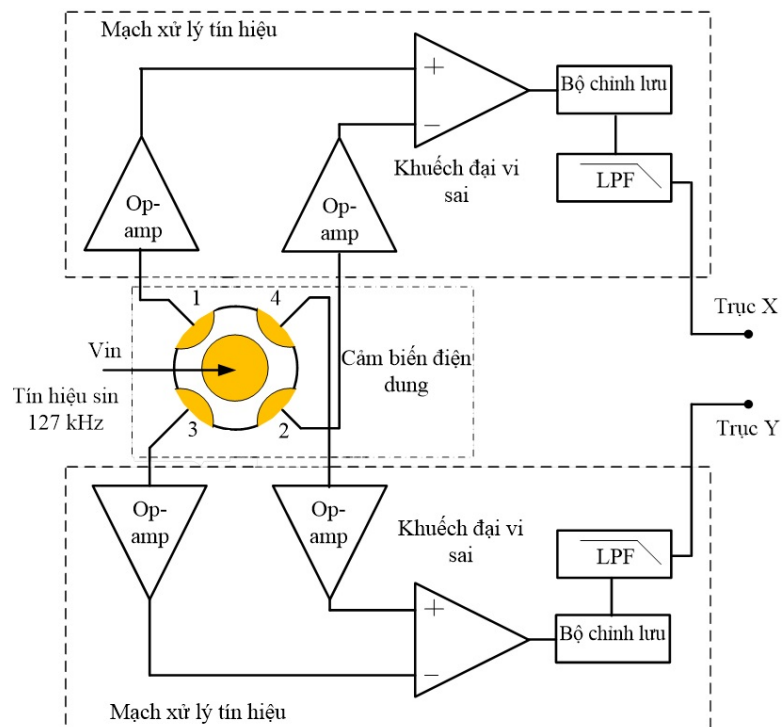
Các điện áp ra của cảm biến, lần lượt, được đưa vào bộ khuếch đại vi sai. Các tín hiệu đầu ra của bộ khuếch đại vi sai đi qua bộ chỉnh lưu và sau đó qua bộ lọc thông thấp (LPF). Quá trình này được thể hiện trong hình 2.28.

Các đặc tính của cấu trúc mẫu đã được khảo sát bằng cách thay đổi góc nghiêng theo cả hướng trục x và trục y . Các kết quả với góc nghiêng từ -120° đến $+120^{\circ}$ được thể hiện trong hình 2.29.

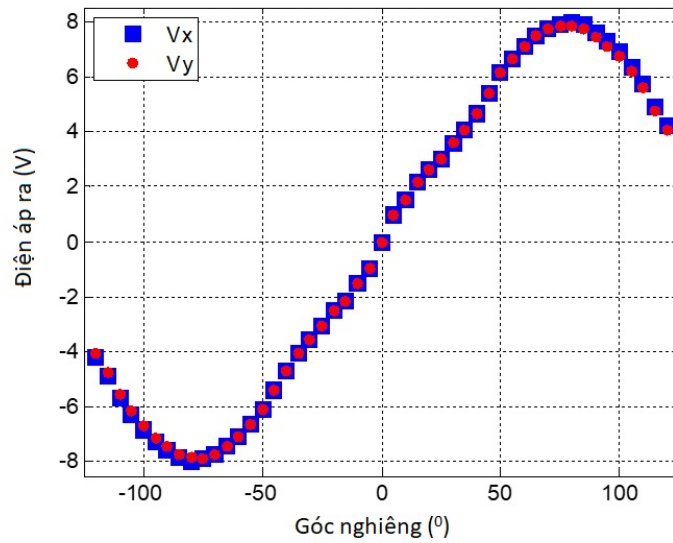
Qua đồ thị ta thấy rằng kết quả điện áp ra trên trục x và trục y gần giống nhau. Điều này chứng tỏ rằng cấu trúc cảm biến của nguyên mẫu có tính đối xứng. Một đoạn phóng to của đồ thị nằm trong dải làm việc được thể hiện trong hình 2.30 cho thấy đồ thị này là tuyến tính. Đồng thời, kết quả cũng cho thấy độ nhạy của cấu trúc khoảng 115 mV° , độ phân giải khoảng $\pm 0.5^{\circ}$ trong phạm vi tuyến tính $[-70^{\circ}, +70^{\circ}]$. Kết quả này cũng phù hợp với kết quả thu được từ mô phỏng, do đó, xác nhận chức năng của cấu trúc cảm biến. Phạm vi làm việc



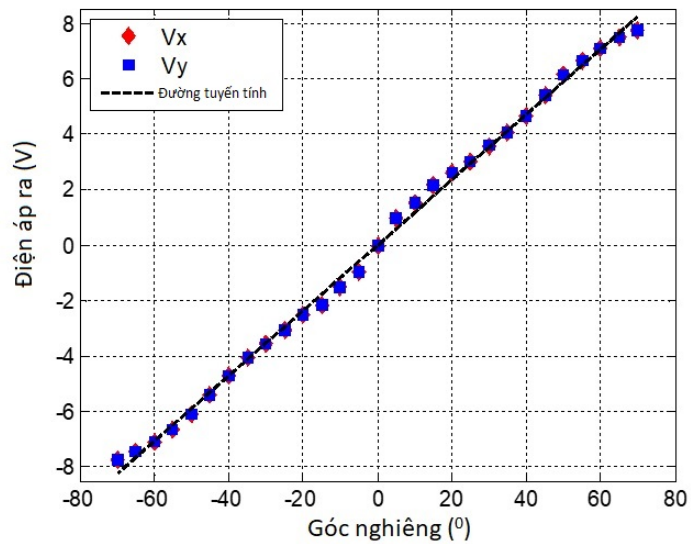
Hình 2.27: Thiết lập thực hiện phép đo góc nghiêng



Hình 2.28: Sơ đồ khối của mạch đo góc nghiêng



Hình 2.29: Mối quan hệ giữa điện áp ra và góc nghiêng theo trục x và trục y



Hình 2.30: Mối quan hệ giữa điện áp ra và góc nghiêng theo trục x và trục y trong dải -70° đến $+70^\circ$

tuyến tính này được cải thiện đáng kể so với cấu trúc được đề xuất ở phần 2.2. Ngoài ra, công nghệ in 3D giúp chế tạo cấu trúc nhanh chóng với chi phí hợp lý.

Cảm biến nghiêng hai trục hình cầu được đề xuất có thể được áp dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp ô tô, công trình dân dụng và các công trình quân sự.

2.4 Kết luận chương

Trong chương 2, Luận án đã trình bày thiết kế, chế tạo và mô tả cảm biến nghiêng hai trục dựa trên cấu trúc cảm biến điện dung có chất lỏng làm điện môi. Cảm biến bao gồm năm điện cực được bố trí ở các vị trí được chỉ định xung quanh một ống nhựa hình trụ, một phần của các điện cực được lấp đầy với chất lỏng điện môi. Với sự sắp xếp độc đáo này, cảm biến được đề xuất có thể phát hiện hai thành phần của góc nghiêng, theo trục x và trục y một cách đồng thời.

Đầu tiên, thiết kế của thiết bị được thực hiện dựa trên các kết quả định tính, các kết quả này là cơ sở thử nghiệm của Luận án. Dựa trên kết quả đo được, ta có được độ nhạy góc nghiêng theo trục x là $16 \text{ mV}/^\circ$ trong phạm vi $\pm 60^\circ$, độ nhạy góc nghiêng theo trục y là $39,6 \text{ mV}/^\circ$ trong phạm vi $\pm 25^\circ$.

Nhờ sử dụng chuyển động của cấu trúc chất lỏng để cảm nhận góc nghiêng, nên cấu trúc này tương đối đơn giản, khối lượng không đáng kể vì nó được treo như một phần của cảm biến và khả năng chống rung mạnh hơn. Do đó, cảm biến của đề xuất này có độ nhạy cao, hiệu quả về chi phí và có thể được sử dụng trong nhiều ứng dụng.

Để tăng phạm vi hoạt động, phần tiếp theo của chương 2, Luận án trình bày phương án tối ưu hóa kích thước của cấu trúc. Nguyên lý làm việc của cảm biến nghiêng hình trụ trục kép sử dụng hỗn hợp điện môi hai pha xăng/không khí đã được xác nhận bằng mô phỏng số. Hình dạng của các điện cực cảm biến đã được tối ưu hóa bằng cách thay đổi kích thước của chúng để tối đa hóa phạm

vi làm việc tuyến tính trong cả hai trục x và y . Các khảo sát được tiến hành để xác nhận hiệu suất của cấu trúc cảm biến đã được tối ưu hóa. Các giá trị đo được khớp với giá trị mô phỏng. Cảm biến độ nghiêng được đề xuất có thể đo góc nghiêng trong dải $[-70^0, +70^0]$ với độ nhạy $12,4 \text{ mV}^0$ và độ phân giải $\pm 0,4^0$ trên trục x và trong dải $[-30^0, +30^0]$ với độ nhạy $34,8 \text{ mV}^0$ và độ phân giải $\pm 0,14^0$ trên trục y . Việc tối ưu nhằm khảo sát các thông số hình học của cảm biến để có phạm vi làm việc và độ nhạy tốt hơn. So với cấu trúc trước khi được tối ưu, phạm vi làm việc đã được cải thiện.

Nhược điểm chung của cấu trúc cảm biến điện dung kiểu hình trụ này là phạm vi làm việc của cảm biến theo trục x và trục y chưa tương đương nhau do tính không đối xứng cấu trúc của cảm biến.

Để khắc phục nhược điểm của cấu trúc cảm biến điện dung đo góc nghiêng kiểu hình trụ, Luận án tiếp tục trình bày thiết kế và chế tạo cảm biến phát hiện góc nghiêng hai trục hình cầu sử dụng môi trường điện môi hai pha lỏng/khí. Mô phỏng số và khảo sát thực nghiệm đã được thực hiện để nghiên cứu các thuộc tính cảm biến của cấu trúc cảm biến được đề xuất. Các kết quả thực nghiệm và mô phỏng cho thấy sự tương đồng. Cảm biến nghiêng được đề xuất có thể đo góc nghiêng trong phạm vi từ -70^0 đến $+70^0$, với độ nhạy 115 mV^0 và độ phân giải là $\pm 0,5^0$. Kết quả cho thấy cấu trúc đối xứng được đề xuất có thể đạt được khả năng cảm nhận góc nghiêng tương tự nhau trên cả hai trục nghiêng, đồng thời độ nhạy của cấu trúc cũng tăng lên đáng kể. Ngoài ra, công nghệ in 3D giúp chế tạo cấu trúc nhanh chóng với chi phí hợp lý.

Ưu điểm những cấu trúc được đề xuất trong Luận án so với các thiết kế trước đó là có thể phát hiện độ nghiêng theo hai hướng trục x và y , độ nhạy cao, thiết kế nhỏ gọn và đơn giản, có khả năng sản xuất hàng loạt để có thể áp dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp ô tô, công trình dân dụng và quân sự.

Các bài báo đã công bố:

[1].(2018), "A Robust Two-axis Tilt Angle Sensor based on Air/Liquid Two-phase Dielectric Capacitive Sensing Structure", IETE Journal of Re-

search, Doi.org/10.1080/03772063.2008.1518732 Nanotechnology, ISSN: 0377-2063. (SCIE)

[2]. (2019), "Study on design optimization of a capacitive tilt angle sensor", IETE Journal of Research, doi.org/10.1080/03772063.2019.1649214. (SCIE)

[3]. (2019), "Symmetry Two-axis Tilt Angle Capacitive Sensor System", Tạp chí Khoa học (VNU Journal of Science), VNU Journal of Science: Mathematics – Physics, Vol. 35, No. 2 (2019) 60-66

[4]. (2018), "Thiết kế, mô phỏng cảm biến hình trụ kiểu tụ điện đo góc nghiêng hai chiều", Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Trường Đại học Công nghiệp, ISSN: 1859-3585, pp.22-27.

[5]. (2018), "A 3D Printed Two-axis Tilt Angle Capacitive Sensor", 2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics, pp 191-195.

Cảm biến điện dung phát hiện vi hạt

3.1 Mở đầu

Nguyên nhân chính gây tử vong trên toàn thế giới hiện nay là ung thư [34]. Trong đó, di căn từ các khối u nguyên phát lại là nguyên nhân gây tử vong hàng đầu của ung thư [78]. Khối u này được hình thành dựa vào các yếu tố: sự đột biến của tế bào trong quá trình tăng trưởng và sự không nhạy cảm của tế bào đến tín hiệu ức chế [34]. Trong đó nguyên nhân chính gây tử vong là sự hình thành, tích tụ và lây lan của các khối u thứ cấp hay còn gọi là sự di căn. Quá trình di chuyển của các tế bào ác tính từ khối u nguyên phát đến các cơ quan khác nhau trong cơ thể thông qua dòng máu được gọi là quá trình chuyển đổi biểu mô – trung mô (EMT). Các tế bào này lưu thông trong dòng máu nên được gọi là các tế bào khối u tuần hoàn CTCs [54]. Do đó, các tế bào khối u này có thể cung cấp các thông tin quan trọng để chẩn đoán ung thư di căn và theo dõi tiến trình điều trị [78]. Sự hiển diện của các tế bào khối u tuần hoàn trong máu của bệnh nhân ung thư là một chỉ báo quan trọng cho sự tiến triển của bệnh và sự sống còn của bệnh nhân [72]. Tuy nhiên, CTCs rất hiếm trong máu nên việc phát hiện và nhận diện đặc tính kỹ thuật là một thách thức đối với các nhà nghiên cứu. Việc phát hiện và cô lập CTCs là một vấn đề liên ngành nên đòi

hỏi sự hợp tác chặt chẽ giữa các nhà vật lý, hóa học, kỹ thuật và sinh học [34].

Có nhiều phương pháp phát hiện và cô lập CTCs. Các phương pháp này chủ yếu dựa trên axit nucleic, đặc tính vật lý hay kháng thể.

- Phương pháp dựa vào axit nucleic: Phương pháp này xác định phân tử DNA hoặc mRNA (như một dấu hiệu) trong mẫu để xác định gián tiếp sự hiện diện của CTCs. Phương pháp này cải thiện được độ đặc hiệu và độ nhạy, tuy nhiên nó lại làm giảm độ chính xác tổng thể của cách tiếp cận này. Đồng thời phương pháp này cũng có một nhược điểm lớn là phải phân giải CTCs trước khi thực hiện quá trình PCR (Polymerase Chain Reaction, phản ứng chuỗi polymerase) là một kỹ thuật nhằm tạo ra một lượng lớn bản sao DNA mục tiêu trong ống nghiệm dựa vào các chu kỳ nhiệt. Kỹ thuật này được nhà khoa học người Mỹ Kary Mullis phát minh vào năm 1985). Điều này làm ngăn cản sự quan sát trực tiếp, liệt kê và phân tích.
- Phương pháp dựa trên đặc tính vật lý: Đặc tính vật lý của tế bào bao gồm: mật độ, kích thước, độ dẻo cơ học hay tính chất điện môi.
 - Phương pháp dựa vào kích thước: Cách ly CTCs dựa vào cũng là một phương pháp hữu hiệu bởi vì kích thước của CTCs ($\approx 20 \mu m - 30 \mu m$) thường lớn hơn so với các tế bào máu ($\approx 8 \mu m - 12 \mu m$) [34]. Tuy nhiên đối với các CTCs có kích thước nhỏ thì kỹ thuật lọc sẽ cho độ nhạy và độ đặc hiệu tương đối thấp bởi vì các tế bào bạch cầu có kích thước lớn có thể trộn lẫn với CTCs [54].
 - Phương pháp dựa vào điện động học (electrokinetic) [34]: Các tế bào có thể được coi là các hạt điện môi, chúng trung hòa về điện và có thể phân loại được (Gascoyne và Vykoukal, 2002). Do đó, khi chúng được đặt trong một điện trường (DC hoặc AC) sẽ sinh ra mô men lưỡng cực điện trong tế bào (Gonzalez và Remcho, 2005). Độ lớn và hướng của mô men lưỡng cực này phụ thuộc vào tính chất điện môi của các tế bào. Những thuộc tính này bị chi phối bởi tính phân cực và độ dẫn

của màng tế bào và nhân tế bào (Gascoyne và Vykoukal, 2002). Do có kiểu hình dạng, trạng thái sinh lý, hình thái học khác nhau nên các tế bào khác nhau có tính chất điện môi khác nhau, đây là nguyên tắc cơ bản được sử dụng cho cách ly CTCs (Broche và cộng sự, 2007, Pethig, 1996, Pratt và cộng sự, 2011). Trong thực tế, khi các tế bào khác nhau được tiếp xúc với điện trường AC không đồng nhất, dựa trên tính chất điện môi của các tế bào và các hạt trung gian cũng như tần số và biên độ của điện trường, thì chúng ta sẽ có được các lực điện động khác nhau. Các lực này có thể được sử dụng để mô tả và cách ly các tế bào thông qua điện cơ (electrorotation) (Tức là chuyển động quay của các tế bào trong trường AC quay) và điện di điện môi (dielectrophoresis -DEP) (nghĩa là lực đẩy hoặc chuyển động tịnh tiến của các tế bào trong điện trường AC không đồng nhất), (Chen và cộng sự, 2004, Fiedler và cộng sự, 1998).

- Phương pháp dựa vào kháng thể: Phương pháp này phổ biến và hiệu quả nhất để phát hiện và cách ly CTCs là dựa trên liên kết đặc hiệu giữa kháng thể và kháng nguyên. Để cách ly CTCs người ta sử dụng “ma trận” trung gian kháng thể để bắt giữ CTCs một cách trực tiếp hoặc gián tiếp. Ma trận này thường có hai dạng: hạt từ hoặc sự biến đổi của bề mặt trong kênh dẫn (thường là vi kênh). Nguyên tắc cơ bản của phương pháp này là tìm kiếm được tế bào ung thư di chuyển tự do trong hệ tuần hoàn và đưa chúng đến điểm xác định [34]. Tuy nhiên chỉ có một vài kháng thể có thể xác định được CTCs và các tế bào ung thư. Một số aptamer DNA có tính chọn lọc cao và ổn định, nên chúng được sử dụng như một chất hấp thụ có ái lực cao với CTC trong các thiết bị vi lưu cho phép phát hiện tế bào ung thư trong một vài ml máu. Một số tính chất đặc biệt của aptamer làm cho chúng thích hợp hơn so với các kháng thể để hấp thụ CTC. Aptamer được sử dụng phổ biến là các oligonucleotide DNA [72] chuỗi đơn và chúng ổn định hơn nhiều so với các kháng thể protein nhờ cấu trúc đặc biệt có

tính chọn lọc cao đối với các tế bào (phân tử) đích, đồng thời chúng cũng dễ dàng thay đổi với nhãn và nhóm hóa học bất kỳ. Do đó, aptamer đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các phương pháp dò tìm khác nhau, chẳng hạn như trong kính hiển vi đồng tụ hay hiển vi quang học, dò tìm điện hóa ...

Trong số các phương pháp này thì phương pháp sử dụng các thiết bị vi lưu với kháng thể trên kênh vi lỏng tỏ ra có ưu thế vượt trội. Trong phần tiếp, luận án sẽ đề cập đến việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo chip vi lỏng phát hiện vi hạt dựa trên kỹ thuật điện di điện môi và aptamer.

3.2 Thiết bị vi sai phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc để phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng

3.2.1 Giới thiệu

Trong những thập kỷ qua, các thiết bị vi lỏng được sử dụng nhiều để thao tác hạt và tế bào. Bằng cách này nên việc lấy mẫu và thuốc thử được giảm thiểu, độ nhạy của thiết bị tăng cao, thời gian xử lý được rút ngắn... Những tiến bộ này đã khởi sắc sự phát triển của nhiều lĩnh vực khác như: phân tích hóa học, nghiên cứu y sinh học, dược phẩm và chăm sóc sức khỏe [77-86]. Phát hiện đối tượng hay các vi hạt là một nhiệm vụ quan trọng của các thiết bị vi lỏng. Gần đây, một số công trình nghiên cứu đã xử lý với thiết kế và chế tạo các hệ thống nhỏ gọn bằng cách nhúng điện cực vào trong các kênh vi lỏng để phát hiện hạt. Trong số các kỹ thuật đã được kết hợp với hệ thống vi lỏng như huỳnh quang, khối phổ (một kỹ thuật dùng để đo đặc tỉ lệ khối lượng trên điện tích của ion), điện hóa, ACEO (điện thẩm -AC electro-osmosis) [20-79], dẫn điện thì cảm biến điện dung nổi lên như là một phương pháp đầy hứa hẹn trong quy mô nhỏ nhờ

sự chế tạo và thiết lập phép đo đơn giản cũng như khả năng thu nhỏ của chúng.

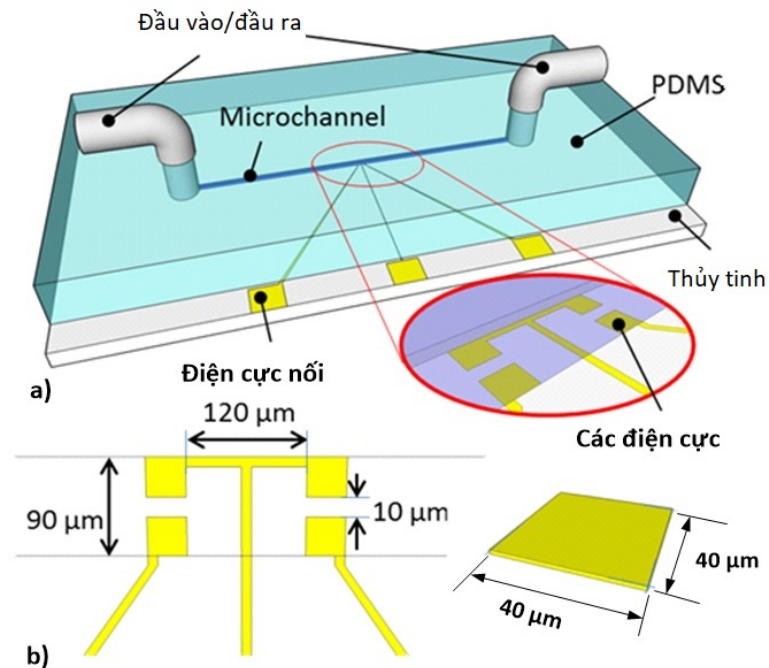
Các ứng dụng của thiết bị phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc (C^4D - capacitively coupled contactless conductivity detection) trên hệ thống thu nhỏ đã tăng đáng kể trong thập kỷ qua do phương pháp phát hiện đơn giản và tính phổ quát của nó [51]. Một số công trình nghiên cứu liên quan đến các ứng dụng của kỹ thuật C^4D để phát hiện dẫn trong kênh quy mô bình thường đã được công bố [35-76].

Báo cáo đầu tiên về C^4D trong các hệ thống vi lỏng được xuất bản vào năm 2001 bởi Guijt và cộng sự [65]. Các điện cực cách điện với kênh vi lỏng để tránh những khó khăn khác nhau thường gặp trong phương pháp tiếp xúc điện cực như ô nhiễm điện cực, tạo bọt, hiệu ứng phân cực, hiệu ứng xói mòn điện và nhiễu điện do điện trường ứng dụng trong hệ thống điện di [20-37]. Nhược điểm chính của hệ thống C^4D là có độ nhạy thấp hơn so với các phương pháp phát hiện điện hóa khác. Kể từ khi công bố đầu tiên về kỹ thuật C^4D áp dụng cho các hệ thống vi lỏng, phát triển khác nhau của cấu trúc C^4D đã được đề xuất để giải quyết những hạn chế của nó. Một lá chắn giữa các điện cực kích thích và điện cực pick-up có thể được sử dụng để ngăn chặn điện tích đi lạc [45-30]. Một số thiết kế tận dụng lợi thế của các nguyên tắc cộng hưởng nhưng có những khó khăn cụ thể trong việc xác định tần số cộng hưởng của mạch [37-49]. Kỹ thuật tiềm năng mới được áp dụng trong cấu trúc C^4D để phát hiện hạt trong kênh chất lỏng là sử dụng điện dung vi sai.

Trong quá trình nghiên cứu, Luận án đã đề xuất một nền tảng vi lỏng để phát hiện đối tượng có cỡ micro như trong hình 3.1.

Cảm biến DC^4D được xây dựng từ bốn vi điện cực vuông được nhúng vào kênh vi lỏng. Các điện cực được làm bằng vàng và đặt cách nhau với một khoảng nhỏ. Kích thước của các điện cực và cấu trúc kênh được minh họa trong hình 3.1.

Chip vi lỏng là sự hàn gắn bởi hai thành phần: phần dưới là các điện cực, dây dẫn và điện cực nối được chế tạo trên đế thủy tinh; phần trên là kênh vi lỏng



Hình 3.1: Cấu trúc cảm biến phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc đồng phẳng ($D - C^4D$).

được chế tạo bằng vật liệu PDMS (PDMS-polydimetylsiloxan). Vật liệu PDMS có tính trong suốt, không độc hại và không cháy. Đồng thời, loại vật liệu này có tính tương thích sinh học cao nên thường được sử dụng để chế tạo kênh vi lỏng. Hai phần PDMS và thủy tinh được gắn chặt với nhau bởi kỹ thuật hoạt hóa bề mặt O_2 plasma.

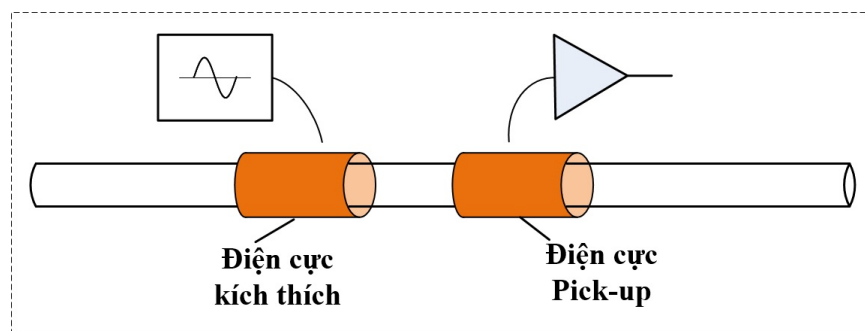
Cấu trúc của DC^4D bao gồm hai cấu trúc đơn C^4D . Tín hiệu kích thích cho các điện cực là tín hiệu hình sin. Sự sai khác trung bình giữa hai cặp điện cực sẽ gây ra sự khác biệt trong trở kháng của hai tụ điện, dẫn đến sự khác biệt giữa hai tín hiệu đầu ra. Đầu ra tín hiệu từ hai điện cực pick-up được khuếch đại và sau đó được giải điều chế để loại bỏ các bộ phận sóng mang.

Do đó, cấu trúc này có độ nhạy cao khi phát hiện hạt hoặc đối tượng trong kênh vi lỏng, nó đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Sự xuất hiện của các đối tượng hoặc các hạt vi mô trong dòng chảy chất lỏng có thể dẫn đến sự mất cân bằng giá trị điện dung giữa hai cặp điện cực, điều này

sẽ làm thay đổi kết quả của tín hiệu đầu ra. Trong phần tiếp Luận án sẽ trình bày thiết kế, mô phỏng, chế tạo và đo lường của cấu trúc phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ vi sai không tiếp xúc- DC^4D .

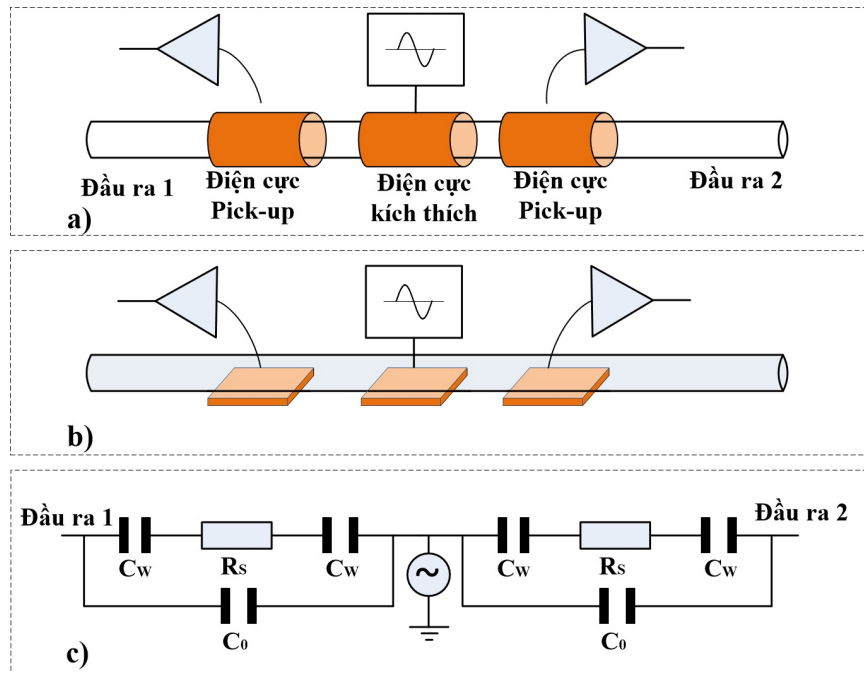
3.2.2 Nguyên tắc làm việc của bộ phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc - DC^4D

Một cấu trúc C^4D thông thường được trình bày trong hình 3.2. Cấu trúc này bao gồm hai điện cực đặt cách nhau một khoảng và cách ly với dòng điện. Một điện áp xoay chiều (AC) được đặt lên một trong các điện cực galvanic và dòng điện AC tại đầu ra có thể được đo tại điện cực thứ hai. Cấu trúc của hệ bao gồm các điện cực, lớp cách điện và chất điện phân. Do có lớp cách điện trong cấu trúc không tiếp xúc này nên giá trị điện dung đo được thấp hơn so với các cấu trúc tiếp xúc trực tiếp. Chính vì vậy mà tần số hoạt động của cấu trúc không tiếp xúc phải cao hơn loại tiếp xúc trực tiếp [51].



Hình 3.2: Sơ đồ cấu trúc của C^4D .

Để khắc phục các nhược điểm của cấu trúc C^4D thông thường và tăng độ nhạy, Luận án đề xuất cấu trúc C^4D vi sai (DC^4D) như trong hình 3.3. Cấu trúc DC^4D bao gồm hai bộ C^4D đơn cùng với một sóng mang hình sin đặt vào điện cực trung tâm như là điện cực kích thích. Nếu vật liệu giữa hai cặp điện cực khác nhau thì trở kháng giữa hai tụ cũng khác nhau, do đó, tín hiệu đầu ra



Hình 3.3: Sơ đồ cấu trúc và mạch tương đương của cấu trúc DC^4D .

cũng có giá trị khác nhau. Để loại bỏ các thành phần sóng mang ở các tín hiệu đầu ra ta phải khuếch đại tín hiệu thu được và giải điều chế chúng.

Hình 3.1 cho thấy cấu trúc đề xuất được thực hiện trên đế thủy tinh với một lớp kim loại, một lớp bảo vệ, một lớp kênh dẫn, và lớp chứa các đầu vào và đầu ra được đặt trên cùng của cấu trúc.

Thông thường, các điện cực có thể có hình dạng bất kỳ và bố trí sắp xếp theo kiểu trục hoặc hình chữ U [46,38,35,85,75]. Do quy trình chế tạo cho các cấu trúc có nhỏ rất phức tạp nên thông thường cấu trúc cảm biến điện dung được chế tạo theo kiểu cấu trúc đồng phẳng.

Cấu trúc DC^4D có bốn điện cực được chế tạo trên lớp thủy tinh để có thể tạo thành từ hai tụ điện đồng phẳng giống nhau và được đặt đối diện nhau. Chen và cộng sự đã đưa ra các mô hình phân tích cho cấu trúc cảm biến điện dung đồng phẳng [19]. Giá trị điện dung của hai bản dẫn song song, đồng phẳng và bán vô hạn được tính như sau:

$$C = \frac{2\epsilon_0\epsilon_r l}{\pi} \ln \left[\left(1 + \frac{w}{a}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{w}{a}\right)^2 - 1} \right] \quad (3.1)$$

trong đó, ϵ_0 là hằng số điện môi chân không, ϵ_r là hằng số điện môi của môi trường điện môi đồng nhất, w là chiều rộng của điện cực, $2a$ là khoảng cách giữa các điện cực và l là chiều dài của cặp điện cực.

Cảm biến điện dung loại này hoạt động dựa trên sự thay đổi của điện dung khi hằng số điện môi hoặc độ dẫn điện của chất lỏng nằm giữa các điện cực thay đổi. Mỗi loại vật liệu hay chất lỏng đều có hằng số điện môi khác nhau, nên khi có sự xuất hiện của một loại vật liệu hoặc một vật thể lạ trong môi trường đồng nhất nằm giữa các điện cực thì giá trị điện dung sẽ thay đổi tương ứng.

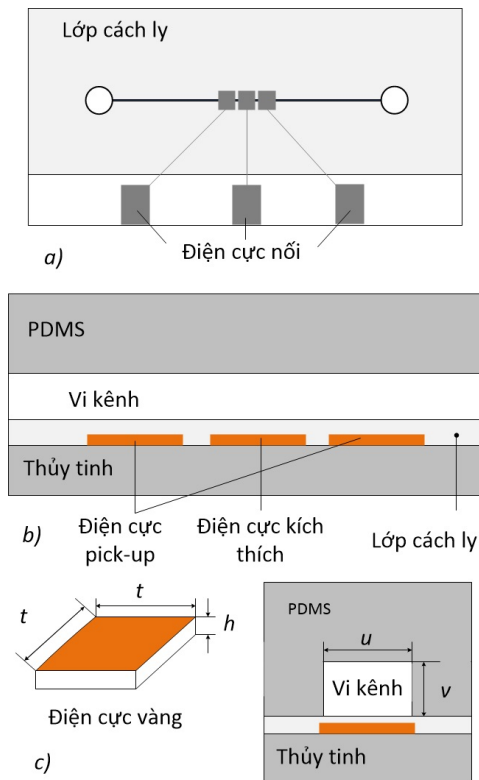
Trong quá trình tính toán có xem xét đến ảnh hưởng của vật liệu của lớp bảo vệ và độ dày trên điện dung của tụ điện phẳng. Trong thực tế, quá trình chế tạo lớp bảo vệ SiO_2 rất phức tạp nên độ dày của lớp này luôn nhỏ hơn 1 mm , do vậy, trong mô phỏng, Luận án sử dụng lớp SiO_2 có độ dày từ 200 nm đến 1 μm .

3.2.3 Chế tạo và thiết lập phép đo

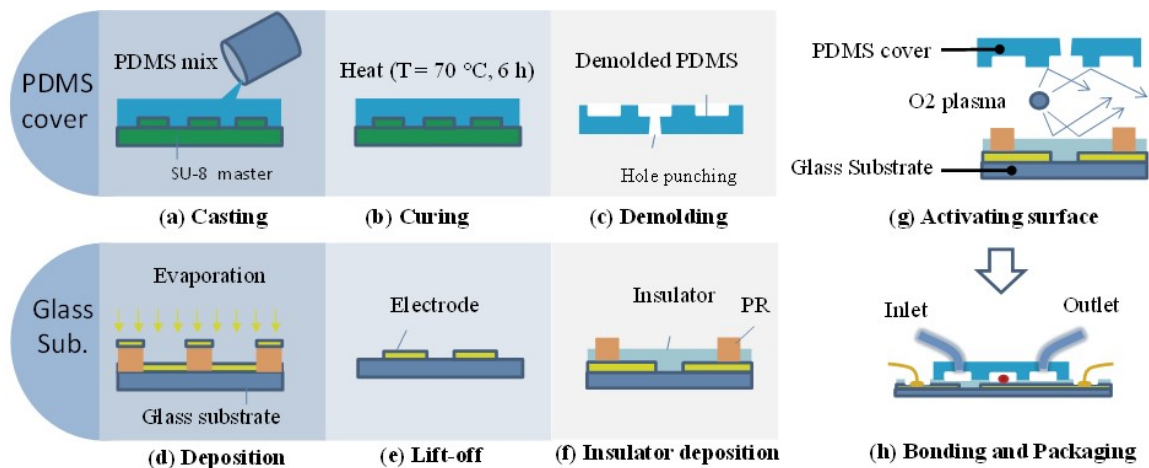
Polymer là vật liệu phổ biến sử dụng để chế tạo chip vi lỏng do chi phí thấp và dễ chế tạo [24-50]. Do vậy, chip vi lỏng được tạo thành bởi một lớp thủy tinh và lớp PDMS. Trên lớp thủy tinh gắn các điện cực bằng vàng và các điện cực nối và sau đó toàn bộ cấu trúc được phủ một lớp màng mỏng SiO_2 để các điện cực không tiếp xúc trực tiếp với chất điện phân trong kênh dẫn lỏng. Kênh vi lỏng nằm trong lớp PDMS. Hình 3.4 mô tả cấu trúc của một chip vi lỏng.

Bảng 3.1 liệt kê các thông số của cấu trúc.

Hình 3.5 mô tả quá trình chế tạo cấu trúc. Kỹ thuật đúc khuôn được sử dụng để chế tạo kênh vi mô PDMS [17]. Chất tiền polyme PDMS và chất làm cứng (curing agent) được trộn với nhau theo tỷ lệ trọng lượng 10:1. Hợp chất sau khi được trộn đều thì đổ vào khuôn SU-8, khuôn này đặt trên đế silicon.



Hình 3.4: Cấu trúc đề xuất chip vi lỏng: a) Mặt trên; b) Mặt cắt ngang; c) Kích thước của các điện cực và kênh dẫn.



Hình 3.5: Quy trình chế tạo chip DC^4D : a) Tạo khuôn; b) Ủ nhiệt; c) Dỡ khuôn; d) Làm lắng đọng; e) Loại bỏ phần thừa; f) Lắng đọng lớp cách ly; g) Kích hoạt bề mặt; h) Hàn gắn chip.

Bảng 3.1: Thông số của cấu trúc

Ký hiệu	Giá trị	Ghi chú
u	$30 \mu m$	Chiều rộng của vi kênh
v	$50 \mu m$	Chiều cao của vi kênh
t	$40 \mu m$	Chiều rộng của điện cực
h	$150 nm$	Chiều cao của điện cực
a	$10 \mu m$	Khoảng cách giữa các điện cực

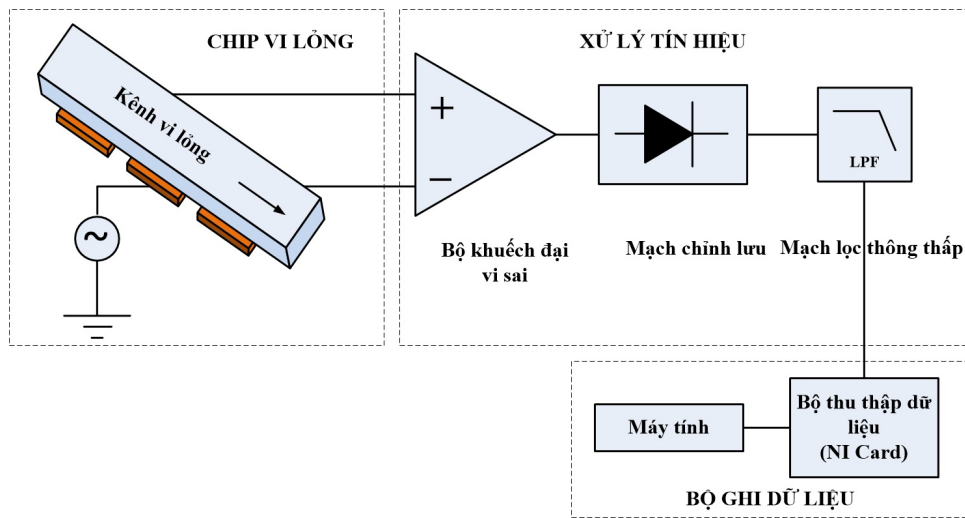
Để làm mất hết bọt khí trên bề mặt của hỗn hợp PDMS ta phải tiến hành khử khí, sau đó nung ở nhiệt độ $70^{\circ}C$ trong 6 giờ. Sau đó, hỗn hợp được lấy ra khỏi khuôn SU-8 và làm nguội xuống nhiệt độ phòng. Đầu vào và đầu ra trên đế PDMS được tạo ra bằng cách đục lỗ. Các vi điện cực và điện cực nối được chế tạo bằng cách làm bay bốc vật liệu trên đế thủy tinh.

Một chất cản quang âm (*ZPN-1150 là chất mặc định bị hòa tan trong dung môi tráng rửa nhưng sau khi bị chiếu xạ thì phần bị chiếu xạ sẽ không bị hòa tan*) được đặt trên đế thủy tinh trong 3 giây. Sau đó, làm bốc hơi lớp vàng Au/Ti dày $150 nm$ để loại bỏ những mảnh vàng không mong muốn.

Lớp cách điện SiO_2 để bảo vệ điện cực cảm biến được làm lắng đọng bằng cách kỹ thuật phún xạ (sputtering). Để tạo thành một liên kết không thể đảo chiều, bề mặt PDMS và tấm thủy tinh được đặt trong buồng khí oxy plasma để xử lý bề mặt [52] (trong thời gian 30 giây, công suất $50 W$ đối với bề mặt PDMS; và 6 phút, $50 W$ đối với tấm thủy tinh), sau đó chúng được gắn với nhau bởi một chip dán có độ chính xác cao (CA-300ss, Công ty Bondtech) để hoàn thiện quá trình tạo chip.

Để thực hiện khảo sát hoạt động của chip vi lỏng DC^4D ta thiết lập hệ thống đo lường thực nghiệm (Hình 3.6).

Hệ đo gồm ba khối chính: chip vi lỏng, khối xử lý tín hiệu và bộ ghi dữ liệu. Tín hiệu hình sin được cho vào điện cực kích thích, tín hiệu ra được lấy từ hai

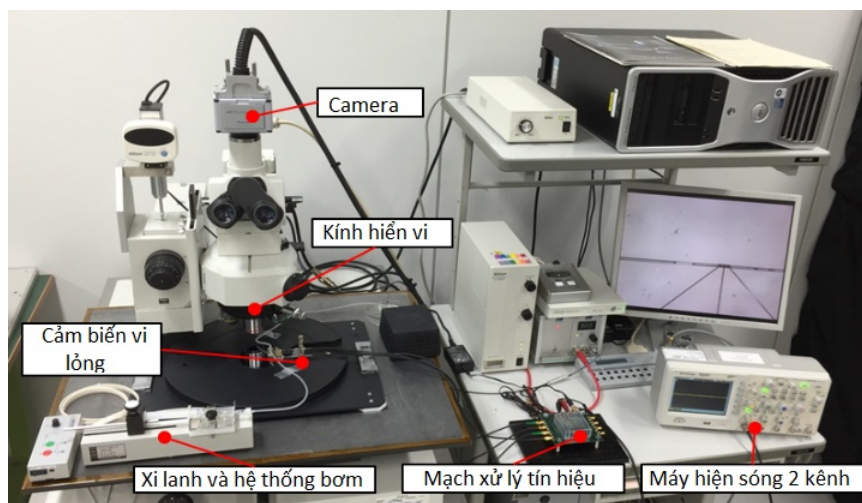


Hình 3.6: Thiết lập hệ thống đo thực nghiệm.

điện cực bẫy (pick-up). Tín hiệu ra này được đưa vào khối xử lý tín hiệu.

Khối xử lý tín hiệu bao gồm có bộ khuếch đại vi sai, mạch chỉnh lưu và mạch lọc thông thấp. Sau quá trình xử lý dữ liệu, các dữ liệu này được đưa tới máy tính thông qua bộ thu thập dữ liệu NI (DAQPad-6016) và sau đó được xử lý bằng phần mềm LabVIEW. Để ghi lại chuyển động của các đối tượng trong kênh dẫn Luận án đã sử dụng một kính hiển vi có camera tốc độ cao.

Hình 3.7 là hệ đo thực nghiệm trong phòng thí nghiệm.

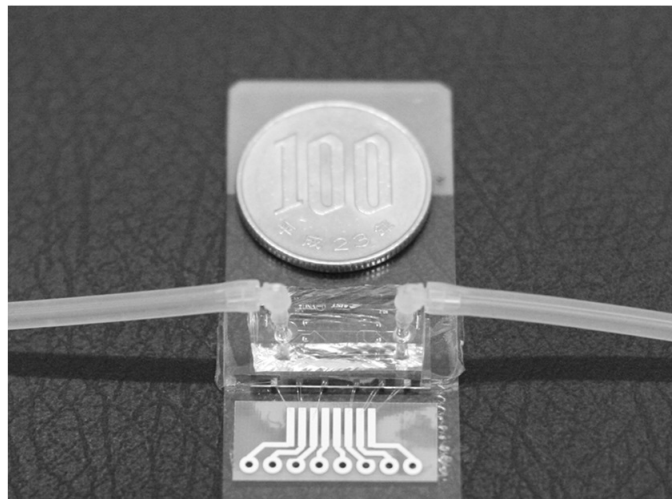


Hình 3.7: Thiết lập hệ đo thực tế.

3.2.4 Phát hiện đối tượng

Từ bản thiết kế trên, Luận án đã thực hiện chế tạo cảm biến vi lỏng DC^4D với kích thước bao phủ tương ứng $(10 \times 20 \times 6) \text{ mm}$. Hình 3.8 là hình ảnh nguyên mẫu của chip vi lỏng sau khi được chế tạo.

Hình 3.9 là hình ảnh đóng gói của chip vi lỏng, đầu vào và đầu ra kết nối với chip bằng cầu nối hình chữ L. Để quan sát được cấu trúc cảm biến ta sử dụng kính hiển vi. Hình ảnh phóng to cho thấy các vi điện cực trên tấm thủy tinh và kênh dẫn trong lớp PDMS gắn chặt với nhau nhờ khả năng kết dính của bonder. Các điện cực nối dùng để kết nối với các dây dẫn bên ngoài chip.

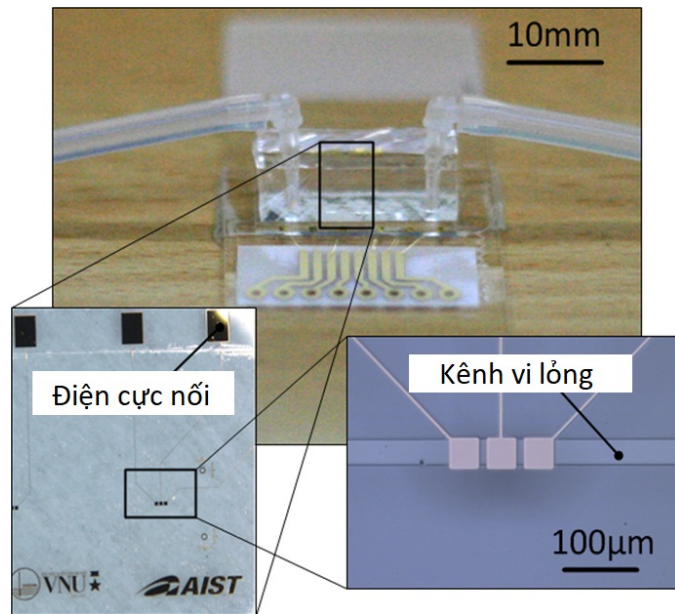


Hình 3.8: Hình ảnh nguyên mẫu chip vi lỏng sau khi được chế tạo.

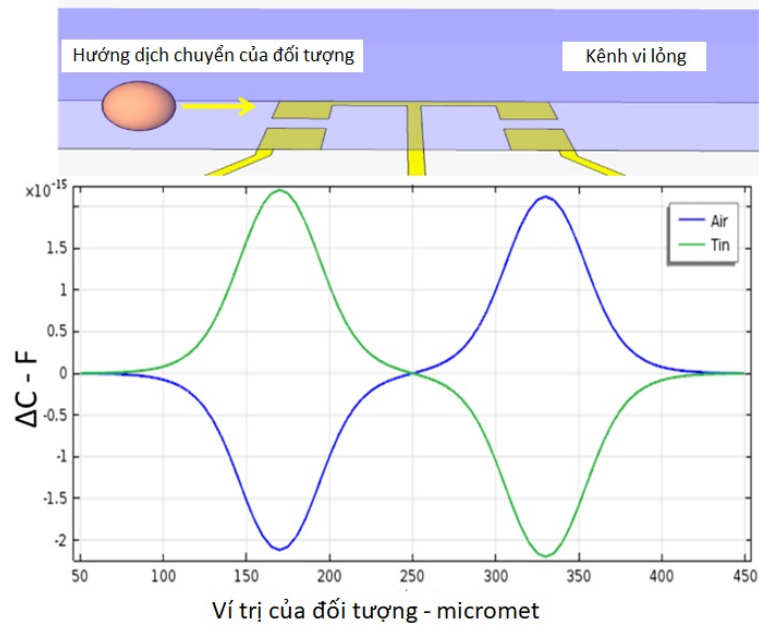
Để đánh giá được hiệu suất làm việc cấu trúc, Luận án đã thực hiện các phép đo. Từ các kết quả phép đo ta thấy rõ mối quan hệ giữa giá trị điện dung và các đối tượng cần phát hiện.

Hình 3.10 là mô phỏng giá trị điện dung thay đổi theo vị trí của vi hạt trong kênh dẫn. Đồ thị cho thấy sự thay đổi điện dung vi sai khi một bong bóng khí và một hạt thiếc có đường kính $25 \mu\text{m}$ đi qua vi kênh dẫn là nước tinh khiết.

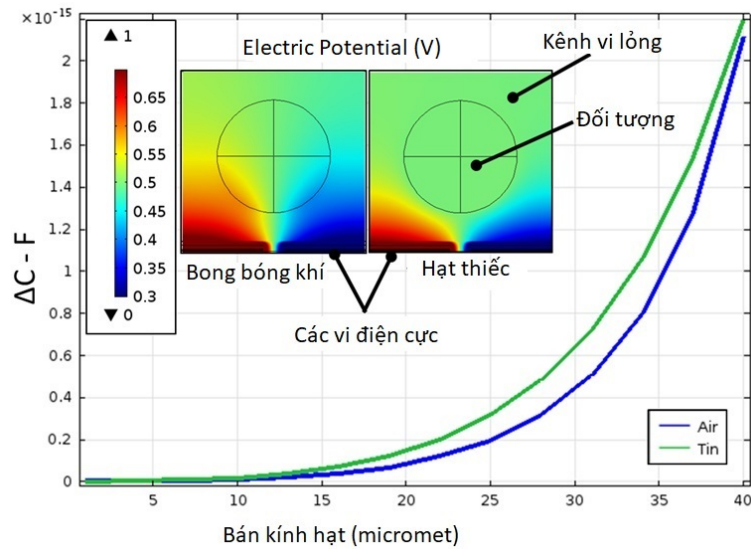
Hình 3.11 là mô phỏng giá trị điện dung thay đổi theo của vi hạt trong kênh dẫn. Qua đồ thị ta thấy với cùng thì hạt thiếc có sự thay đổi điện dung lớn hơn



Hình 3.9: Chip vi lỏng được tích hợp bởi cấu trúc DC^4D .



Hình 3.10: Điện dung thay đổi theo vị trí của vi hạt trong kênh dẫn.



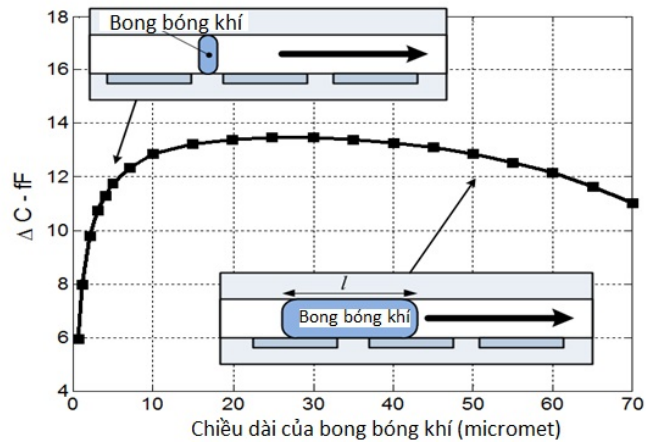
Hình 3.11: Điện dung thay đổi theo bán kính của vi hạt trong kênh dẫn.

bong bóng khí. Điều này chứng tỏ rằng khi đối tượng là vật dẫn điện thì giá trị điện dung sẽ lớn hơn khi đối tượng là vật không dẫn điện so độ dẫn điện của các loại vật liệu là khác nhau. Ví dụ, độ dẫn điện của nước tinh khiết cao hơn không khí nhưng lại thấp hơn hạt thiếc. Do đó, tính chất điện của các đối tượng có thể xác định bằng cách phân tích các tín hiệu đầu ra.

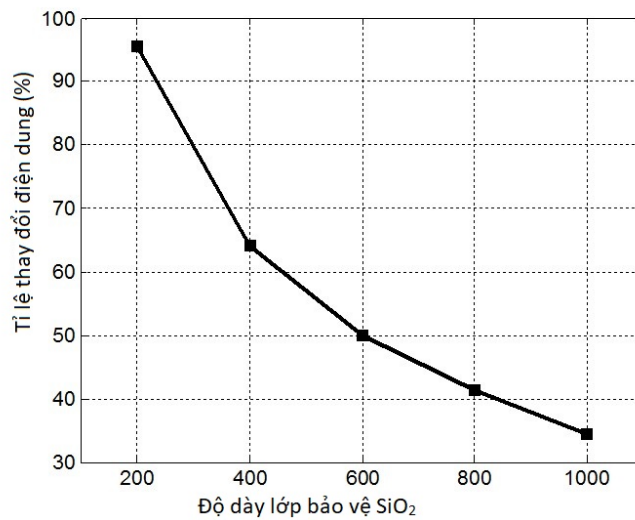
Do sức căng bề mặt của kênh vi dẫn các bong bóng khí hiếm khi có dạng hình cầu mà chúng thường có dạng dài như được hiển thị trên các khung hình nhỏ (insets) của Hình 3.12. Kết quả mô phỏng cho thấy giá trị điện dung tăng đáng kể khi chiều dài của bong bóng khí lớn.

Hình 3.13 cho thấy sự phụ thuộc của điện dung vào độ dày của lớp bảo vệ. Độ dày của lớp bảo vệ càng tăng thì sự thay đổi điện dung càng giảm.

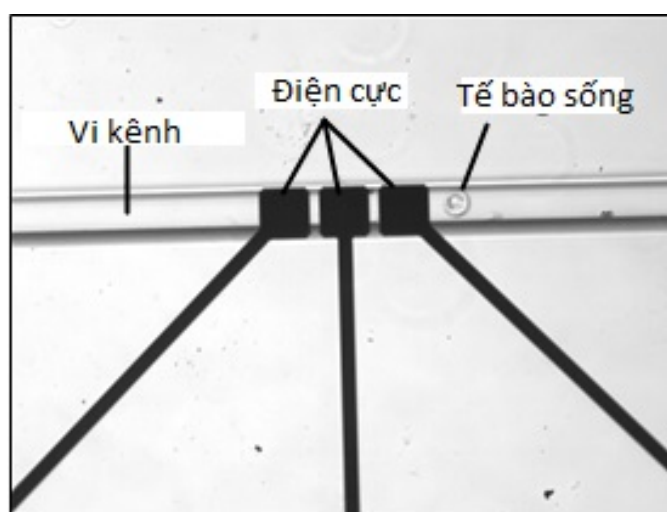
Hình 3.14 là hình ảnh phóng to tương ứng của cấu trúc cảm biến khi có một tế bào sống (tế bào ung thư Sarcoma-180) di chuyển qua phạm vi hoạt động của chip. Trong đó, của tế bào là khoảng $25 \mu m$, chiều rộng của vi kênh vi dẫn là $30 \mu m$. Chính vì vậy mà cấu trúc vi kênh này chỉ phù hợp cho việc phát hiện một tế bào S-180.



Hình 3.12: Mối quan hệ giữa điện dung và chiều dài của bong bóng khí.



Hình 3.13: Mối quan hệ giữa điện dung và độ dày lớp bảo vệ.



Hình 3.14: Hình ảnh thu được của tế bào sống khi đi qua chip vi lỏng

3.2.5 Nhận xét

Để phát hiện được đối tượng có cỡ micro, Luận án đề xuất cấu trúc cảm biến điện dung vi sai phát hiện độ dẫn điện mà không cần tiếp xúc với chất lỏng. Các vi điện cực của tụ điện cách ly với chất điện phân bằng lớp bảo vệ SiO_2 . Giá trị điện dung phụ thuộc vào hằng số điện môi và độ dẫn điện của môi trường trong kênh dẫn. Các kết quả nghiên cứu cho thấy nền tảng này hoàn toàn có thể phát hiện được các đối tượng vi mô với bất kỳ độ dẫn điện nào.

3.3 Thao tác tế bào trong chất lỏng dựa trên nguyên lý DEP

3.3.1 Mở đầu

Nhiều ứng dụng y sinh học đòi hỏi thao tác vi hạt trên chip bao gồm nồng độ tế bào, tách, cách ly và nhận dạng, khuôn mẫu, đánh bẫy và định vị [29-44]. Trong những năm gần đây, việc phát hiện các tế bào ung thư hoặc các tế bào khối u (CTCs) là một ứng dụng quan trọng trong chẩn đoán y học. Trong ung

thư, CTCs đã được tạo ra do các tế bào ung thư tách khỏi khối u ban đầu, đi vào trong máu, do vậy, có thể sử dụng ứng dụng này để dự báo sớm của quá trình di căn [60]. Một trong những kỹ thuật khác nhau liên quan đến các thao tác của các hạt, đó là kỹ thuật điện di điện môi (DEP), kỹ thuật đã được chứng minh là một phương pháp hữu dụng và rộng rãi sử dụng trong các thao tác một loạt các hạt sinh học khác nhau, chẳng hạn như các tế bào, vi khuẩn, virus, protein và DNA [63-8].

Trong các nghiên cứu gần đây, một mô-đun điện cầm tay đã được phát triển, trong đó kỹ thuật điện di điện môi (DEP) đã được khai thác nhằm chọn lọc tập trung và cô lập các tế bào ung thư từ một mẫu máu ngoại biên [13-28]. Điện trường cao được tạo ra bằng cách đặt điện áp lên các cặp điện tròn thông qua role theo từng bước. Các tế bào sống dưới tác động của lực DEP dương sẽ chuyển động về hướng trung tâm của vi buồng điều khiển (experimenting microchamber). Lực áp dụng trên các tế bào ung thư thường lớn hơn tế bào hồng cầu nên chúng có thể di chuyển đến các điện cực trung tâm sớm hơn nhiều so với các tế bào máu bình thường. Do vậy, các tế bào hồng cầu hoặc các thành phần trong máu bình thường khác sẽ được tách ra khỏi các tế bào ung thư. Để quan sát các thí nghiệm, hệ thống mạch tổng thể tạo ra điện trường cao tập trung di động được xây dựng trên một bảng mạch in (PCB) và chip vi chế tạo đã được gắn kết vào các mô-đun điện.

Trong thiết kế trước đây của chúng tôi, các thao tác của vi hạt được quan sát và ghi lại bằng cách sử dụng một kính hiển vi quang học. Một cách tiếp cận mới được đề ra là các vi mạch chế tạo không những tập trung được các tế bào mục tiêu mà còn phải thực hiện được việc phát hiện và bắt giữ chúng. Trong số các kỹ thuật vật lý khác nhau để phát hiện các đối tượng trong một kênh vi lỏng, cảm biến điện dung nổi lên như là kỹ thuật tốt nhất, nhờ vào việc chế tạo đơn giản và thiết lập đo lường, cũng như khả năng giảm thiểu [82-2]. Các cảm biến điện dung vi sai với ba hoặc bốn cấu trúc điện cực liền kề đã được phát triển [71-61]. Các cảm biến có thể được sử dụng để phát hiện các hạt lạ, bong

bóng khí trong dòng vi lỏng hoặc tế bào trong các thiết bị y tế với độ nhạy cao và hoạt động mạnh mẽ. Trong nghiên cứu này, một thiết kế mới được đề xuất rằng hai điện cực đối xứng được bổ sung bên cạnh các điện cực trung tâm cho các mục đích cảm biến. Điện dung giữa hai điện cực cảm biến tăng lên khi các tế bào đang bị mắc kẹt trong đầu chụp điện cực. Các tế bào bị mắc kẹt có thể được phát hiện bằng cách giám sát sự thay đổi này. Cấu trúc đối xứng này là hữu ích cho việc xây dựng mạch phát hiện bằng cách loại bỏ nhiễu thông thường và tự ký sinh.

3.3.2 Thao tác DEP

Nguyên tắc điện di điện môi

Khi các hạt điện môi đặt trong một điện trường không đồng nhất thì sẽ xuất hiện một lực tác động lên các hạt này, lực này được gọi là lực DEP (dielectrophoresis) hay lực điện di điện môi. Lực DEP sẽ làm các hạt di chuyển nhờ sự tương tác giữa mô men lưỡng cực và điện trường không đồng nhất. Lực DEP có độ lớn phụ thuộc vào chất điện môi, tính chất điện của hạt, hình dáng cũng như kích thước của hạt. Ngoài ra nó còn phụ thuộc vào tần số điện trường tác động lên hạt. Do vậy, kỹ thuật điện di điện môi thường được sử dụng để thao tác hạt như: phân tách, định hướng. Các thao tác này thường dựa trên tốc độ di chuyển của các hạt trong môi trường điện di điện môi.

Trong một điện trường, các phân tử tích điện thuộc pha lỏng sẽ di chuyển về phía các điện cực. Vận tốc di chuyển của các phân tử này sẽ tùy thuộc vào tỷ lệ điện tích và khối lượng của các phân tử này. Do đó, giữa các phân tử có cùng khối lượng, phân tử nào có điện tích lớn hơn thì sẽ di chuyển về các điện cực ngược dấu nhanh hơn.

Thao tác điện di điện môi

DEP là sự chuyển động của các hạt đặc trưng được đặt trong một điện trường không đồng nhất gây ra bởi hiệu ứng phân cực. Khi điện trường được tính trong miền tần số, lực điện di điện môi đặt trên một hạt hình cầu có bán kính r_p lơ lửng trong môi trường lỏng được tính theo công thức:

$$F_{DEP} = 2\pi r_p^3 \epsilon_m \text{Real} \left(\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \right) \nabla |E_{rms}|^2 \quad (3.2)$$

Trong đó, E_{rms} là điện áp hiệu dụng (giá trị trung bình bình phương điện áp), ϵ_p^* và ϵ_m^* là hằng số điện môi (dạng số phức) của hạt và của môi trường huyền phù (suspension medium). Hằng số điện môi dạng số phức có thể được viết:

$$\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (3.3)$$

Trong đó, ϵ là hằng số điện môi, σ là độ dẫn điện, j là đơn vị ảo ($\sqrt{-1}$) và $\omega = 2\pi f$ là tần số góc của điện áp xoay chiều AC.

Tham số Clausius-Mossotti (f_{CM}) là một tham số về sự phân cực của một hạt. Nó phụ thuộc vào hằng số điện môi của các hạt và môi trường huyền phù và là hàm số của tần số điện trường tác động lên hạt. Tham số Clausius-Mossotti cho một hạt hình cầu được thể hiện ở phương trình sau:

$$f_{CM} = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad (3.4)$$

Lực DEP không chỉ phụ thuộc vào sự phân cực tương đối của một hạt, mà còn phụ thuộc vào hình dạng và kích thước của các hạt, cũng như tần số của điện áp. Lực DEP thường được chia thành hai loại: pDEP (DEP dương) và nDEP (DEP âm). Lực pDEP xuất hiện khi các hạt có một hằng số điện môi cao hơn so với các chất lỏng, nhờ vậy mà các hạt được hút vào khu vực điện trường cao.

Ngược lại, lực nDEP sẽ xuất hiện khi hằng số điện môi của hạt nhỏ hơn hằng số điện môi của chất lỏng và các hạt được hút vào khu vực có điện trường thấp.

Đối với các tế bào sống, tính chất điện môi có thể được xây dựng bằng mô hình nguyên bào, dựa trên một hạt hình cầu bao gồm một tế bào chất và màng tế bào [32]. Hằng số điện môi tương đương (ϵ_{eq}^*) có thể nhận được bằng cách bỏ qua độ dẫn điện của màng tế bào trong mô hình nguyên bào:

$$\epsilon_{eq}^* = \epsilon_s^* \left[\left(\left(\frac{r_0}{r_i} \right)^3 + 2 \left(\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_s^*} \right) \right) / \left(\left(\frac{r_0}{r_i} \right)^3 - \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_s^*} \right) \right] \quad (3.5)$$

Trong đó, r_0 và r_i là bán kính bên ngoài và bên trong của màng tế bào, ϵ_s^* là hằng số điện môi dạng phức của màng ngoài.

Do đó, tham số Clausius-Mossotti cho các tế bào sống có thể được viết lại thành:

$$f_{CM}(\omega) = -\frac{\omega^2(\tau_m\tau_c^* - \tau_c\tau_m^*) + j\omega(\tau_m^* - \tau_m - \tau_c^*) - 1}{\omega^2(2\tau_m\tau_c^* + \tau_c\tau_m^*) - j\omega(\tau_m^* + 2\tau_m + \tau_c^*) - 2} \quad (3.6)$$

Trong đó, $\tau_c^* = c_m R / \sigma_c$ và $\tau_c = \epsilon_c / \sigma_c$ là hằng số thời gian, σ_c và ϵ_c lần lượt là độ dẫn điện và hằng số điện môi của tế bào chất. Tham số c_m và R là điện dung tương đương của màng tế bào và bán kính của tế bào. Ngoài ra, hằng số thời gian τ_m và τ_m^* có thể được định nghĩa bằng:

$$\tau_m = \frac{\epsilon_m}{\sigma_m} \quad (3.7)$$

$$\tau_m^* = \frac{c_m R}{\sigma_m} \quad (3.8)$$

σ_m và ϵ_m là độ dẫn điện và hằng số điện môi của môi trường huyền phù.

3.4 Phương pháp thực hiện phát hiện và bắt giữ tế bào HeLa

3.4.1 Mở đầu

Các tế bào HeLa là những tế bào ung thư cổ tử cung của con người và cũng chính là tế bào mục tiêu trong nghiên cứu này. Dòng tế bào này được phân lập từ tế bào ung thư cổ tử cung ngày 8 tháng 2 năm 1951 từ Henrietta Lacks, bệnh nhân đã qua đời vì ung thư vào ngày 4 tháng 10 năm 1951. Các tế bào HeLa thường sử dụng rộng rãi trong sinh học và y học để làm thí nghiệm vì nó là tế bào ung thư ổn định, "bất tử" (chúng không chết sau một số lần phân chia) và chúng có thể liên tục tự nhân bản vô thời hạn.

Trong thực tế, các tế bào HeLa là những dòng tế bào đầu tiên của con người có thể tồn tại vô thời hạn trong ống nghiệm. Hơn nữa, các tế bào HeLa cũng có nhiều đặc điểm chung với các tế bào bình thường, chẳng hạn như sản xuất protein, thể hiện và điều tiết gen, và dễ bị nhiễm trùng. Do đó, các tế bào HeLa có thể giúp cho các nhà khoa học nghiên cứu các vấn đề về ung thư.

3.4.2 Phương pháp thực hiện

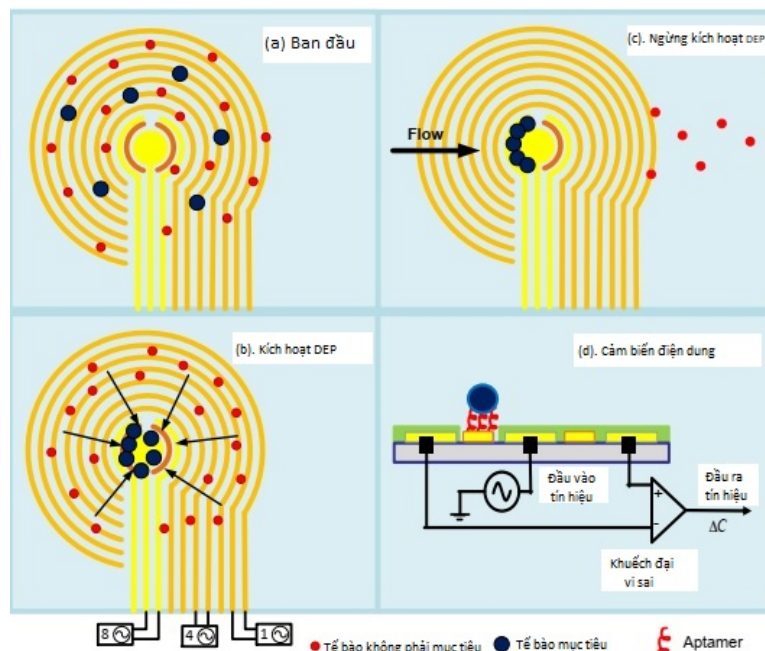
Khảo sát các thao tác phát hiện và bắt giữ tế bào mục tiêu trong một vi mạch được minh họa trong hình 3.15.

Trong đó, hình 3.15(a) Tế bào mục tiêu và không phải mục tiêu được phân bố ngẫu nhiên trong buồng làm việc.

Hình 3.15(b) Các tế bào bị tác động bởi lực DEP di chuyển đến trung tâm của cảm biến. Tế bào mục tiêu bị bắt giữ bởi các aptamer dính trên các điện cực được thiết kế.

Hình 3.15(c) Tế bào không phải mục tiêu bị rửa trôi, chỉ giữ lại các tế bào mục tiêu.

Hình 3.15(d) Cảm biến điện dung DC^4D dùng để xác định sự hiện diện của các tế bào mục tiêu.



Hình 3.15: Phác họa của thiết bị vi lỏng cho các thao tác tế bào mục tiêu và phát hiện mục tiêu.

Các tế bào HeLa trong máu sẽ tập trung vào các điện cực chụp (capture).

Trong môi trường sucrose (đường), cả hai loại tế bào HeLa và hồng cầu (RBCs) đều đáp ứng với lực DEP dương.

Sử dụng phương trình 3.4 để tính hệ số Clausius-Mossotti cho hai loại tế bào này ta được kết quả tương ứng là 1,0 và 0,91 tại tần số 1 MHz.

Giả sử rằng các tế bào hồng cầu có dạng hình cầu với đường kính là $5 \mu m$. Đối tế bào hồng cầu (Erythrocytes) có hằng số điện môi là 57, độ dẫn điện là $0,52 S/m$ và điện dung màng là $0,9 \mu F$. Tế bào HeLa có đường kính khoảng $10 \mu m$ nên biên độ của lực DEP tác động lên các tế bào HeLa gấp khoảng bảy lần tế bào hồng cầu với cùng một điện trường. Do đó, ta có thể tách được tế bào HeLa và các tế bào máu bình thường khác.

Khi một điện trường được đặt lên hai vi điện cực sẽ tạo ra vùng có điện

trường cao giữa các cặp điện cực. Sau đó, đặt điện trường lên cặp điện cực liền kề, từ cặp điện cực ngoài cùng đến cặp điện cực trung tâm (Từ điện cực 1 đến điện cực 8). Do vậy, ta đã tạo được một điện trường bước.

Sự chuyển động của điện trường cao cũng dẫn đến sự chuyển động của các tế bào dưới tác động của lực DEP dương (pDEP). Ban đầu, cả hai tế bào HeLa và hồng cầu được phân phối ngẫu nhiên trên bề mặt các điện cực. Mặc dù cả hai loại tế bào đều có xu hướng di chuyển đến vị trí trung tâm của cảm biến nhưng các tế bào HeLa di chuyển nhanh hơn các tế bào hồng cầu nên các tế bào HeLa sẽ đến các điện cực trung tâm nhanh hơn so với hồng cầu.

Tiếp đến, sử dụng các thiết bị để tách và chiết xuất tế bào HeLa. Các Aptamer được gắn vào bề mặt của các điện cực chụp trung tâm để bắt các tế bào HeLa. Sau đó, cảm biến điện dung được sử dụng để đo lường sự khác biệt giá trị điện dung và như vậy, phát hiện được sự hiện diện của các tế bào HeLa hay các tế bào mục tiêu khác.

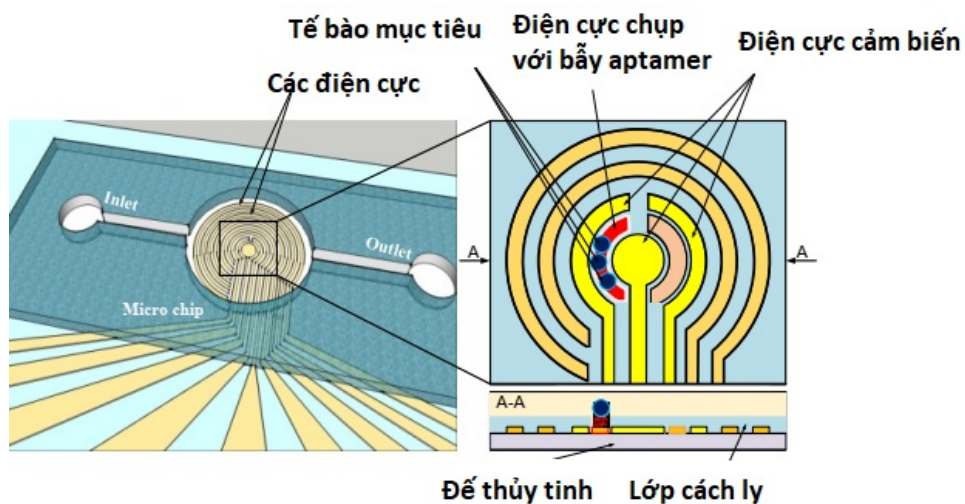
3.4.3 Thiết kế và mô phỏng

Hình 3.16 cho thấy mô hình hình học và các thông số thiết kế của mô hình được đưa ra trong bảng 3.2. Vi thiết bị được thiết kế bởi ba phần chính: chất nền thủy tinh, điện cực tròn và lớp cách nhiệt.

Bán kính và thể tích của buồng làm việc lần lượt là 600 mm và 113 nL . Các vi điện cực tròn tạo ra tám đôi thao tác DEP với các điện cực trung tâm hình kẹo lollipop [15]. Kết hợp các điện cực trung tâm với hai cặp đối xứng điện cực ở hai bên tạo ra một cấu trúc DC^4D .

Cấu trúc DC^4D có ba điện cực tạo thành tụ pick-up và tụ điện tham chiếu. Nhờ cấu trúc này mà khả năng phát hiện sự xuất hiện của các tế bào mục tiêu trên điện cực chụp được tăng cao.

Sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics để mô phỏng trường điện từ xung quanh các điện cực. Để tiến hành mô phỏng, các thông số của các tế bào sống



Hình 3.16: Sơ đồ vi mạch của cấu trúc.

Bảng 3.2: Thông số của cảm biến được sử dụng trong mô phỏng cấu trúc

Thông số	Kích thước	Đơn vị
Bán kính của khoang cầu vi mô	600	μm
Chiều cao của khoang cầu vi mô	100	μm
Độ rộng của điện cực	30	μm
Khoảng cách giữa các điện cực	30	μm
Bán kính của điện cực trung tâm	90	μm
Độ rộng của điện cực chụp	30	μm

Bảng 3.3: Các đặc tính của tế bào hồng cầu và tế bào HeLa

Tham số	Hồng cầu	HeLa
Độ dẫn điện bên trong (S/m)	0,52	0,84
Hằng số điện môi bên trong (ϵ_0)	57	47,5
Đường kính trong (μm)	5	10
Độ dẫn điện của màng	10^{-6}	$2,5 \times 10^{-7}$
Hằng số điện môi của màng (ϵ)	4,44	6
Độ dày của màng (nm)	9	8
Mật độ tế bào (tế bào/ mL)	3.25×10^6	$2,5 \times 10^5$
Tham số Clausius-Mossotti	0,91	1

được thể hiện trong Bảng 3.3. Điện cực vàng được đặt trên đế thủy tinh và bao phủ bởi một lớp PDMS mỏng để tránh sự tiếp xúc giữa các chất dịch và các điện cực. Các vi kênh được đổ đầy chất sucrose ($\epsilon_r = 78; \sigma = 1,76 \times 10^{-3} S/m$). Đối tượng được mô phỏng là tế bào RBC và HeLa.

3.4.4 Kết quả và thảo luận

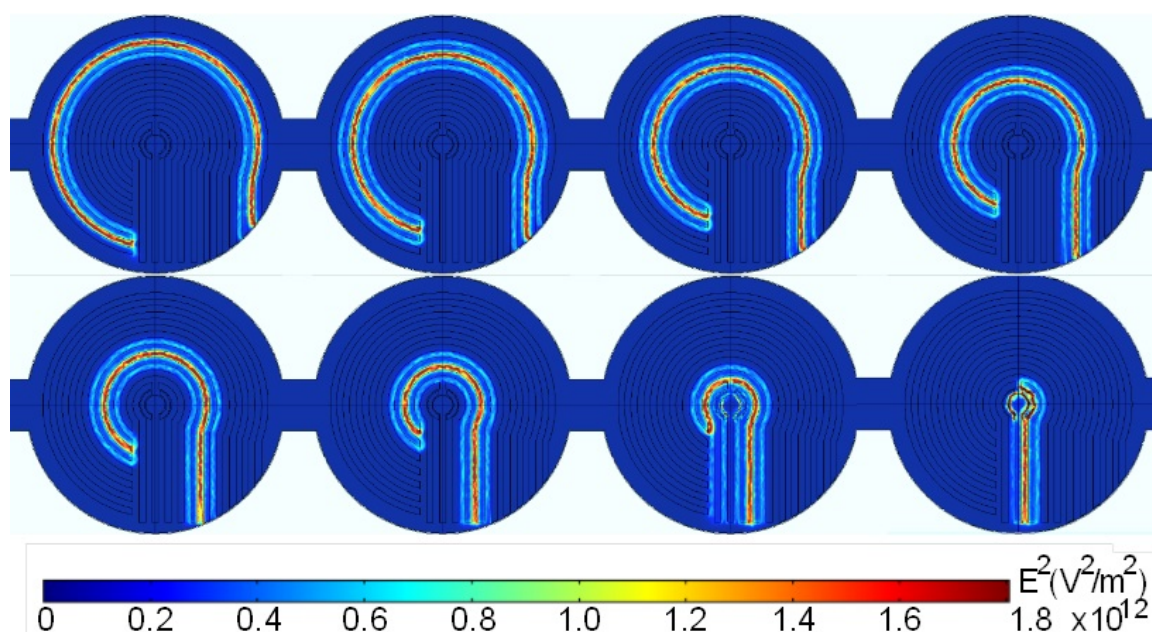
Dưới sự tác động của điện trường cường độ cao hoặc sau một thời gian dài tiếp xúc, hoặc cả hai điều kiện trên đều có thể dẫn đến làm vỡ màng tế bào và ly giải tế bào.

Điện trường cần thiết cho sự ly giải tế bào động vật có vú có độ lớn $10^6 V/m$ và ly giải tế bào có thể đạt được trong khoảng thời gian nhỏ hơn $33 ms$ bằng cách sử dụng một xung có độ rộng $1 ms$.

Một điện áp đỉnh-đỉnh $16 V$ ở tần số $1 MHz$ đủ để đảm bảo sự tồn tại của các tế bào và tạo ra lực DEP đủ mạnh để thao tác các tế bào.

Bình phương cường độ điện trường được đặt lên từ cặp điện cực ngoài cùng đến các cặp điện cực trung tâm (điện trường hướng vào trong theo từng bước)

được thể hiện trong hình 3.17. Gradient điện trường sẽ thay đổi theo giá trị điện áp đặt vào các điện cực. Ngoài ra, hình dạng của các điện cực có thể ảnh hưởng đến phân bố điện trường. Các hạt hay các tế bào, có thể di chuyển theo hướng trung tâm mỗi khi có sự thay đổi điện áp giữa các điện cực.



Hình 3.17: Kết quả mô phỏng của bình phương điện trường (E^2).

Các kết quả mô phỏng của các tế bào HeLa trong mẫu máu dưới sự tác động của điện trường có biên độ 16 V đỉnh-đỉnh với tần số 1 MHz dịch chuyển theo từng bước điện trường được thể hiện trong hình 3.18.

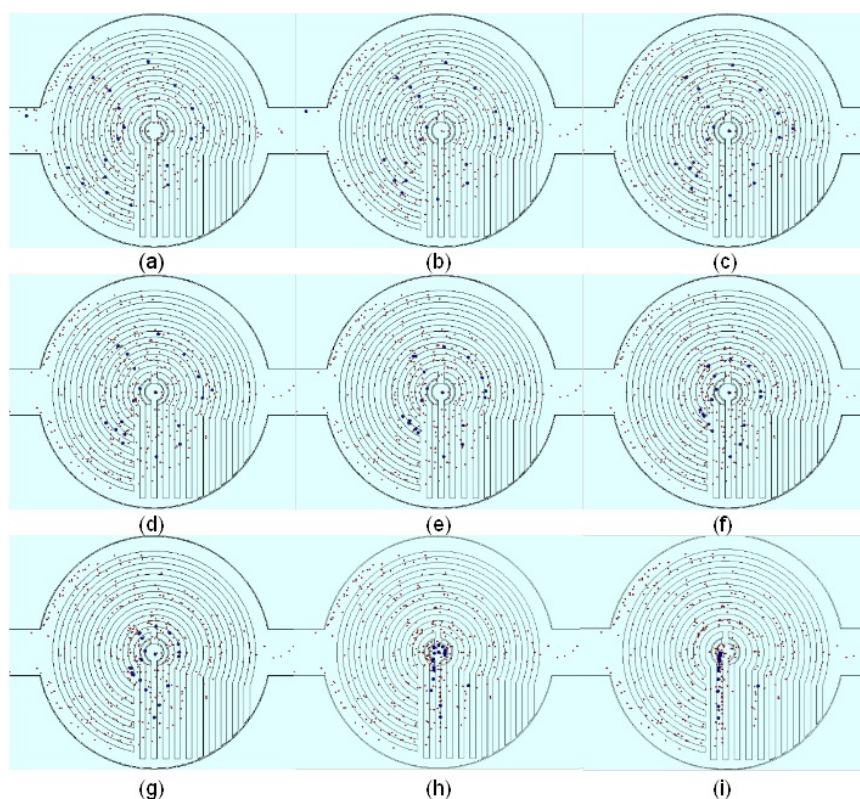
Nồng độ của các tế bào HeLa và hồng cầu đưa vào vi khoang cầu là $2,5 \times 10^5$ tế bào/ml và $3,25 \times 10^6$ tế bào/mL (tỷ lệ hồng cầu và tế bào HeLa bằng 13).

Ban đầu, các tế bào HeLa (tế bào mục tiêu) và các tế bào máu khác (tế bào không phải mục tiêu) được phân phối ngẫu nhiên trên bề mặt. Sau đó, mở luân phiên điện trường trên các cặp điện cực để cả hai loại tế bào bị hút bởi lực DEP sẽ di chuyển đến khu vực có gradient điện trường cao.

Do tính chất của tế bào HeLa nên lực tác động lên tế bào này lớn hơn khoảng 7 lần so với các tế bào khác với cùng phân bố điện trường. Các tế bào mục tiêu (HeLa) có vận tốc cao hơn khi di chuyển đến các điện cực trong cùng. Khi điện

trường bước được áp dụng thì tế bào HeLa được hút vào các điện cực trung tâm nhiều hơn các hồng cầu, do vậy, có thể tập hợp được các tế bào này từ mẫu vật nhất định.

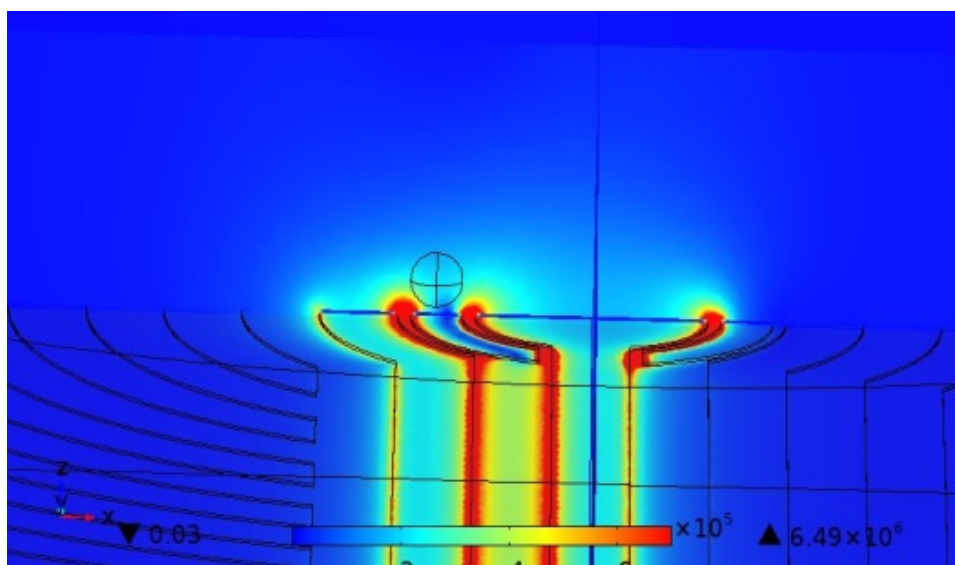
Trong mô phỏng, mặc dù vẫn còn một số tế bào không phải mục tiêu, nhưng các tế bào HeLa với mật độ cao đều tập trung tại điện cực trung tâm, điều này chứng minh được nguyên tắc làm việc của thiết bị được đề xuất.



Hình 3.18: Kết quả mô phỏng về sự dịch chuyển của các tế bào HeLa trong mẫu máu dưới sự tác động của điện trường bước (16V đỉnh-đỉnh; 1MHz).

Việc phát hiện và nhận biết các tế bào được tiến hành bởi cảm biến điện dung vi sai cấu tạo bởi hai điện cực đối xứng bên cạnh các điện cực trung tâm. Hình 3.19 mô phỏng điện trường xung quanh điện cực trung tâm với sự hiện diện của tế bào HeLa ở điện cực bắt.

Các kết quả mô phỏng trong hình 3.20 chỉ ra mối quan hệ giữa giá trị điện dung vi sai ở đầu ra và số lượng tế bào bắt được. Qua hình 3.20 ta thấy giá trị



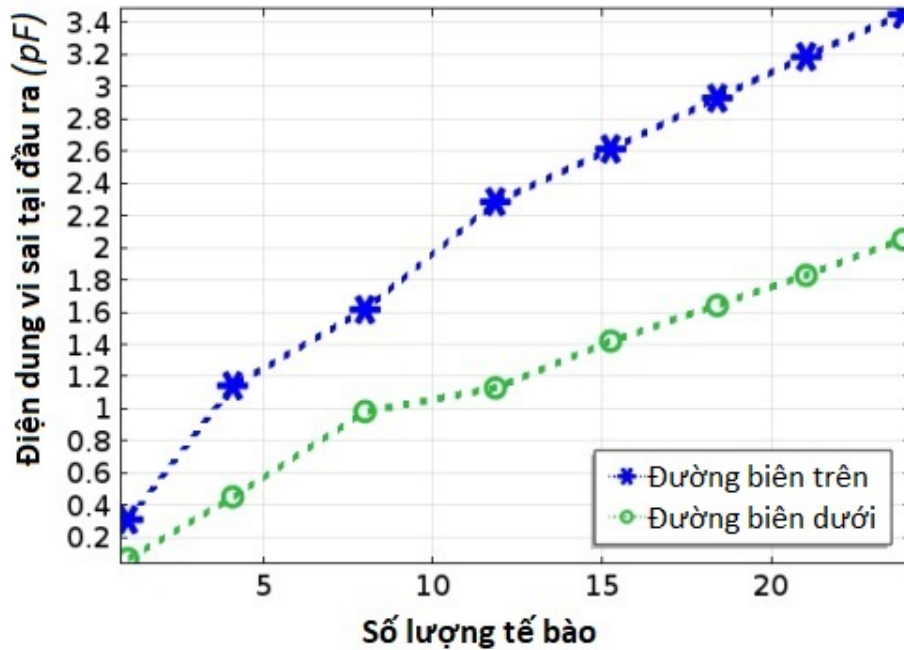
Hình 3.19: Phân phối của cường độ điện trường giữa điện cực cảm biến trái và điện cực trung tâm khi một tế bào HeLa được đặt tại các điện cực chụp.

điện dung vi sai tăng khi số lượng tế bào tăng. Nồng độ của các tế bào đóng góp vào sự thay đổi của điện dung tổng cộng, mà điện dung này chủ yếu phụ thuộc vào hằng số điện môi của môi trường giữa hai bản của tụ điện.

Bằng cách sử dụng aptamer thích hợp, có ái lực cao với các tế bào mục tiêu, các thiết bị được đề nghị cho thấy rằng các tế bào bị dính chặt trên các aptamer. Đây chính là cách tế bào mục tiêu bị bắt và không bị rửa trôi trong quá trình xả. Do vậy, mật độ của các tế bào mục tiêu trên các tế bào không phải mục tiêu là khá lớn nên khả năng phát hiện được tế bào mục tiêu là rất lớn. Sự thay đổi của điện dung vi sai lên đến $3,4 \text{ pF}$ đã đạt được và đủ khả năng để phát hiện sự hiện diện của các tế bào (hình 3.20).

3.4.5 Nhận xét

Phần này, Luận án đã đề xuất một nền tảng làm giàu vi lỏng DEP dựa trên cảm biến điện dung không tiếp xúc nhằm phát hiện vi hạt. Khi áp dụng một điện áp 16 V đỉnh-đỉnh cho các điện cực tại tần số 1 MHz sẽ sinh ra một lực DEP để tập trung tế bào HeLa vào các điện cực cảm biến. Nhờ đó, ta có thể



Hình 3.20: Mối quan hệ giữa điện dung vi sai và số lượng tế bào nhận biết được. Trục x là số lượng tế bào, trục y là giá trị điện dung vi sai.

phát hiện được sự xuất hiện của tế bào.

3.5 Kết luận chương

Trong chương này, Luận án đã đề xuất:

- Thiết kế, mô phỏng và chế tạo cảm biến phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc ($CD - C^4D$). Cấu trúc của cảm biến được đề xuất bao gồm 4 điện cực hình vuông nhúng trong một kênh vi lỏng. Các vi điện cực được cách ly với chất điện phân bằng lớp bảo vệ SiO_2 . Điện dung thay đổi khi có sự hiện diện của đối tượng trong khu vực làm việc của cảm biến, điều này được thể hiện qua quá trình mô phỏng và thực nghiệm. Một nguyên mẫu đã được chế tạo và tiến hành khảo sát sự hoạt động của cảm biến. Các kết quả cho thấy cấu trúc được đề xuất có khả năng phát hiện được các vật thể có siêu nhỏ bất kể chúng dẫn điện

(thiếc) hoặc không dẫn điện (không khí, SiO_2). Như vậy, cấu trúc này có thể phát hiện được bất kỳ đối tượng nào, có thể là hạt hoặc tế bào sống trong dung dịch điện phân.

- Luận án đã đề xuất cấu trúc phát hiện vi hạt sinh học dựa trên sự kết hợp giữa bộ cảm biến vi sai phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc ($CD - C^4D$) và thao tác điện di điện môi (DEP). Thiết bị này sử dụng một dãy các điện cực tròn và kỹ thuật điện di điện môi để thao tác các tế bào HeLa đến khu vực cảm biến. Các tế bào này bị bắt và phát hiện bởi một cảm biến điện dung vi sai. Thiết bị này có một khả năng cô lập, tập trung và phát hiện sự hiện diện của tế bào mục tiêu cụ thể từ các mẫu nhất định. Chính vì thế, lĩnh vực này rất hữu ích cho công nghệ sinh học, y học và chẩn đoán bệnh sớm.

Các bài báo đã công bố:

[6]. (2016), "Biological Microparticles Detection based on Differential Capacitive Sensing and Dielectrophoresis Manipulation", ATC 16, Ha noi, pp. 297-301.

[7]. (2017), "Coplanar differential capacitively coupled contactless conductivity detection (CD-C4D) sensor for micro object inside fluidic flow recognition", Electronic ISSN: 2167-0021, INSPEC Accession Number: 17088783, DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994250.

Kết luận

Cảm biến điện tử ngày càng được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau. Về cơ bản, các cảm biến được chế tạo dựa trên một số nguyên lý vật lý như áp điện trở, áp điện, nhiệt điện trở, điện dung, ... Cảm biến điện dung có một số ưu điểm như độ nhạy cao, hoạt động được ở môi trường khắc nghiệt, có khả năng tương thích với các quy trình chế tạo bán dẫn. Do đó, trong thực tế công nghiệp, công nghệ cảm biến điện dung là lựa chọn hàng đầu của các nhà nghiên cứu, chế tạo và sản xuất.

Trong luận án này, nghiên cứu sinh đã trình bày phần nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng, chế tạo, và thiết kế một số cấu trúc cảm biến điện dung nhằm phát hiện độ nghiêng và vi hạt. Đóng góp chính của luận án bao gồm:

1. Thiết kế, mô phỏng, chế tạo và khảo sát hoạt động của cấu trúc cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng kiểu hình trụ sử dụng hỗn hợp điện môi hai pha lỏng/khí. Cảm biến bao gồm năm điện cực được bố trí xung quanh ống hình trụ chứa một phần chất lỏng điện môi. Nhờ sự sắp xếp các điện cực như vậy mà cảm biến điện dung có thể phát hiện được hai thành phần góc nghiêng. Kích thước của các điện cực cảm biến đã được tối ưu hóa theo hai hướng x và y để cho phạm vi hoạt động là lớn nhất.

- Cấu trúc cảm biến điện dung trước khi được tối ưu kích thước có phạm vi tuyến tính theo trục x là $[-60^\circ \div +60^\circ]$, độ nhạy đạt được khoảng

16 $mV/^\circ$; theo trục y là $[-25^\circ \div +25^\circ]$, độ nhạy đạt được khoảng 39,6 $mV/^\circ$.

- Sau khi thực hiện tối ưu kích thước, phạm vi tuyến tính hoạt động theo trục x đạt được là $[-70^\circ \div +70^\circ]$, độ nhạy của cấu trúc đạt khoảng 12,4 $mV/^\circ$ và độ phân giải đạt khoảng $\pm 0,4^\circ$; theo trục y đạt được là $[-30^\circ \div +30^\circ]$. Độ nhạy của cấu trúc đạt khoảng 34,8 $mV/^\circ$ và độ phân giải đạt khoảng $\pm 0,14^\circ$.

2. Thiết kế, mô phỏng, chế tạo và khảo sát hoạt động của cấu trúc cảm biến nghiêng đối xứng hình cầu (sử dụng công nghệ in 3D) hai trục sử dụng hỗn hợp điện môi hai pha lỏng/khí. Phạm vi hoạt động của cấu trúc này đạt được tuyến tính trong khoảng $[-70^\circ \div +70^\circ]$, độ nhạy của cấu trúc đạt khoảng 115 $mV/^\circ$ và độ phân giải đạt khoảng $\pm 0,5^\circ$.
3. Thiết kế, mô phỏng, chế tạo và khảo sát hoạt động của cấu trúc cảm biến vi sai phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc ($CD - C^4D$) và thao tác điện di môi (DEP) nhằm phát hiện hạt vi sinh học. Cụ thể trong luận án sử dụng cấu trúc này để phát hiện tế bào ung thư cổ tử cung - tế bào HeLa. Sự thay đổi của điện dung vi sai lên đến 3,4 pF , đủ khả năng để phát hiện sự hiện diện của các tế bào.

Với các kết quả đạt được, cấu trúc cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng và vi hạt được đề xuất có thể ứng dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp ô tô, công trình dân sự và quân sự, công nghệ sinh học, y học và chẩn đoán bệnh sớm...

Nghiên cứu sinh và nhóm nghiên cứu đề xuất một số định hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

1. Mở rộng phạm vi tuyến tính và tăng độ nhạy của các cấu trúc cảm biến đề xuất.

2. Nghiên cứu để đưa các cảm biến này vào một số ứng dụng cụ thể như trong các hệ tự động cân bằng, hệ thống đo nghiêng, và các bộ phát hiện vi hạt dùng trong các xét nghiệm y sinh học.

Các công trình khoa học

- [1]. (2018), "A Robust Two-axis Tilt Angle Sensor based on Air/Liquid Two-phase Dielectric Capacitive Sensing Structure", IETE Journal of Research, Doi.org/10.1080/03772063.2008.1518732 Nanotechnology, ISSN: 0377-2063. (SCIE)
- [2]. (2019), "Study on design optimization of a capacitive tilt angle sensor", IETE Journal of Research, doi.org/10.1080/03772063.2019.1649214. (SCIE)
- [3]. (2019), "Symmetry Two-axis Tilt Angle Capacitive Sensor System", Tạp chí Khoa học (VNU Journal of Science), VNU Journal of Science: Mathematics – Physics, Vol. 35, No. 2 (2019) 60-66
- [4]. (2018), "Thiết kế, mô phỏng cảm biến hình trụ kiểu tụ điện đo góc nghiêng hai chiều", Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Trường Đại học Công nghiệp, ISSN: 1859-3585, pp.22-27.
- [5]. (2018), "A 3D Printed Two-axis Tilt Angle Capacitive Sensor", 2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics, pp 191-195.
- [6]. (2016), "Biological Microparticles Detection based on Differential Capacitive Sensing and Dielectrophoresis Manipulation", ATC 16, Hà nội, pp. 297-301.

[7]. (2017), "Coplanar differential capacitively coupled contactless conductivity detection (CD-C4D) sensor for micro object inside fluidic flow recognition", Electronic ISSN: 2167-0021, INSPEC Accession Number: 17088783, DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994250.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. B. A. Manaf, K. Nakamura, and Y. Matsumoto (2008), “Characterization of miniaturized one-side-electrode-type fluid-based inclinometer,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 144, no. 1, pp. 74–82.
- [2] A. Jaworek, A. Krupa, and M. Trela (2004), “Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 15(5-6), pp. 317-324.
- [3] A. M. Torres, R. J. Michniewicz, B. E. Chapman, G. A. R. Young, and P. W. Kuchel (1998), “Characterisation of erythrocyte shapes and sizes by NMR diffusion–diffraction of water: correlations with electron micrographs”, *Magn Reson Imaging*, vol. 16, pp. 423–434.
- [4] B. Gas, M. Demjanenko, J. Vacik (1980), “High-frequency contactless detection in isotachopheresis”, *J. Chromatography*, vol. 192, pp. 253–257. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9673\(80\)80001-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9673(80)80001-X).
- [5] B. S. Panwar and S. Panwar (2011), “High sensitivity MEMS capacitive tilt sensor using multi-resonant cylindrical waveguide structure,” *Proc. IEEE Int. Freq. Control Symp. Expo.*

-
- [6] B. Salvador, A. Luque, and J. M. Quero (2015), “Microfluidic capacitive tilt sensor using PCB-MEMS,” *Ind. Technol. (ICIT)*, 2015 IEEE Int. Conf., pp. 3356–3360.
- [7] B. Yafouz, N. A. Kadri, and F. Ibrahim (2014), “Dielectrophoretic Manipulation and Separation of Microparticles Using Microarray Dot Electrodes,” *Sensors*, vol.14, pp. 6356-6369.
- [8] B. Cetin and D. Li (2011), “Review: Dielectrophoresis in microfluidics technology,” *Electrophoresis*, vol. 32, pp. 2410–2427.
- [9] C. H. Lee and S. S. Lee (2014), “Study of capacitive tilt sensor with metallic ball,” *ETRI J.*, vol. 36, no. 3, pp. 361–366.
- [10] C. H. Lin and S. M. Kuo (2008), “Micro-impedance inclinometer with wide-angle measuring capability and no damping effect,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 143, no. 1, pp. 113–119.
- [11] C. P. Jen and H. H. Chang (2011), “A handheld preconcentrator for the rapid collection of cancerous cells using dielectrophoresis generated by circular microelectrodes in stepping electric fields,” *Biomicrofluidics*, vol. 5, 034101.
- [12] C. P. Jen, and T.W. Chen (2009), “Selective trapping of live and dead mammalian cells using insulator-based dielectrophoresis within open-top microstructures.”, *Biomed Microdevices*, vol. 11, pp. 597–607.
- [13] C. P. Jen, C. T. Huang and H. H. Chang (2011), “A Cellular Preconcentrator Utilizing Dielectrophoresis Generated by Curvy Electrodes in Stepping Electric Fields,” *Microelectron. Eng.*, vol. 88, pp. 1764-1767.

- [14] C. P. Jen, H. H. Chang, C. T. Huang and K. H. Chen (2012), “A microfabricated module for isolating cervical carcinoma cells from peripheral blood utilizing dielectrophoresis in stepping electric fields,” *Microsyst. Technol.*, vol. 18, pp. 1887-1896.
- [15] C. P. Jen, Y. H. Chen, H. H. Chang, G. H. Chen, T. G. Amstislavskaya and C. T. Huang (2012), “Selectively Concentrating Cervical Carcinoma Cells from Red Blood Cells Utilizing Dielectrophoresis with Circular ITO Electrodes in Stepping Electric Fields,” *Medical and Biological Eng.*, vol. 33(1), pp. 51-58.
- [16] C. Yi, C. Bo-Ting, and H.-C. Hong (2015), “Integrated Cmos Mems Liquid Capacitive Inclinometer,” in *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, pp. 1152–1155.
- [17] Carlo S. Effenhauser*, Gerard J.M.B., Aran Paulus, and Markus Ehrat, (1997) ‘Integrated Capillary Electrophoresis on Flexible Silicone Microdevices: Analysis of DNA Restriction Fragments and Detection of Single DNA Molecules on Microchips’, *Anal. Chem*, Vol. 69, No. 17, pp. 3451 -3457.
- [18] Chang Hwa Lee, Seung Seob Lee, (2014), "Study of Capacitive Tilt Sensor with Metallic Ball", *ETRI Journal* 2014; 36(3): 361-366. DOI: <https://doi.org/10.4218/etrij.14.0113.0671>.
- [19] Chen J.Z., et al., (2004) ‘Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation’, *Lab Chip.*, Vol. 4, No. 5, pp. 473-480.
- [20] Coltro W.K.T., et al., (2012) ‘Capacitively coupled contactless conductivity detection on microfluidic systems—ten years of development’, *Anal. Methods.*, Vol. 4, No. 1, pp. 25-33.

- [21] D. Benz, T. Botzelmann, H. Kück, and D. Warkentin (2005), “On low cost inclination sensors made from selectively metallized polymer,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 123–124, pp. 18–22.
- [22] D. D. Tiep et al., “Tilt Sensor Based on Three Electrodes Dielectric Liquid Capacitive Sensor,” in *2016 IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics*, 2016, pp. 4–7.
- [23] D. Welch, J. Georgiou, and J. Blain, “Physical Fully differential current-mode MEMS dual-axis optical inclination sensor,” *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 192, pp. 133–139, 2013.
- [24] Du L., et al., (2012) ‘A method of water pretreatment to improve the thermal bonding rate of PMMA microfluidic chip’, *Microsystem Technologies*, Vol. 18, No. 4, pp. 423-428.
- [25] Elbuken C., et al., (2011) ‘Detection of microdroplet size and speed using capacitive sensors’, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 171, No. 2, pp. 55-62.
- [26] F. F. Becker, X. B. Wang, Y. Huang, R. Pethig, J. Vykoukal, and P. R. C. Gascoyne (1995), “Separation of human breast cancer cells from blood by differential dielectric affinity”, *Proc Natl Acad Sci USA*, vol. 92, pp. 860–864.
- [27] Fracassi da Silva, J.A. and do Lago, C.L. (1998) ‘An oscillometric detector for capillary electrophoresis’, *Anal. Chem.*, Vol. 70, No. 20, pp.4339–4343
- [28] G. H. Chen, C. T. Huang, H. H. Wu, T. N. Zamay, A. S. Zamay and C. P. Jen, (2014) “Isolating and concentrating rare cancerous cells in large sample volumes of blood by using dielectrophoresis and stepping electric fields”, *BioChip J.*, vol. 8(2), pp. 67-74.

- [29] G. M. Whitesides (2006), “The origins and the future of microfluidics”, *Nature*, vol. 442, pp. 368-373.
- [30] Gas B Z.J., Coufal P, van de Goor T, (2002) ‘Optimization of the high-frequency contactless conductivity detector for capillary electrophoresis’, *Electrophoresis*, Vol. 23, No. 20, pp. 3520-3527.
- [31] H. Jung, C. J. Kim, and S. H. Kong (2006), “An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor,” *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 139, no. October 2006, pp. 23–30.
- [32] H. P. Lang, F. Huber, J. Zhang, and C. Gerber (2013), “MEMS technologies in life sciences,” in 2013 *Transducers Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXVII)*, pp. 1–4.
- [33] (2018), “A Robust Two-axis Tilt Angle Sensor Based on Air/Liquid Two-phase Dielectric Capacitive Sensing Structure”, *IETE Journal of Research*.
- [34] Hadi Esmaeilsabzali, Timothy V. Beischlag, Michael E. Cox, Ash M. Parameswaran, Edward J. Park (2013), "Detection and isolation of circulating tumor cells: Principles and methods", *Biotechnology Advances* 31, pp. 1063–1084.
- [35] Hai N.D., et al., (2015) ‘Differential C4D sensor for conductive and non-conductive fluidic channel’, *Microsystem Technologies*.
- [36] Hoàng Minh Công, (2007), "Giáo trình Cảm biến Công nghiệp", Nhà xuất bản xây dựng.

- [37] Huang Z., et al., (2012) ‘Design of capacitively coupled contactless conductivity detection sensor’, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 27, pp. 67-70.
- [38] J. A. F da Silva, d.Lago, (1998) ‘An Oscillometric Detector for Capillary Electrophoresis’, *Anal. Chem.*, Vol. 70, No. 20, pp. 4339–4343.
- [39] J. A. Westphal, M. A. Carr, W. F. Miller, and D. Dzurisin (1983), “Expendable bubble tiltmeter for geophysical monitoring,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 54, no. 4, pp. 415–418.
- [40] J. C. Choi, Y. C. Choi, J. K. Lee, and S. H. Kong (2012), “Miniaturized dual-axis electrolytic tilt sensor,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 6 PART 2.
- [41] J. Guo, P. Hu, and J. Tan, “Analysis of a Segmented Annular Coplanar Capacitive Tilt Sensor with Increased Sensitivity,” *Sensors*, vol. 16, no. 2, p. 133, 2016.
- [42] J. Z. Chen, A. A. Darhuber, S. M. Troian, and S. Wagner (2004), “Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation,” *Lab Chip*, vol. 4(5), pp. 473-80.
- [43] Jing Wu and Min Gu (2011), " Microfluidic sensing: state of the art fabrication and detection techniques", *Journal of Biomedical Optics* 16(8), 080901.
- [44] K. Khoshmanesh, S. Nahavandi, S. Baratchi, A. Mitchell, K. Kalantar-Zadeh (2011), “Dielectrophoretic platforms for bio-microfluidic systems”, *Biosens. Bioelectron.*, vol. 26, pp. 1800–1814.
- [45] Kuban P, Hauser P.C., (2004) ‘Fundamental aspects of contactless conductivity detection for capillary electrophoresis, part I: frequency

- behavior and cell geometry', *Electrophoresis*, Vol. 25, No. 20, pp. 3387-3397.
- [46] Kuban P. and P.C. Hauser, (2008) 'A review of the recent achievements in capacitively coupled contactless conductivity detection', *Anal Chim Acta.*, Vol. 607, No. 1, pp. 15-29.
- [47] Kuo-Kang Liu, Ren-Guei Wu, Yun-Ju Chuang, Hwa Seng Khoo, Shih-Hao Huang, and Fan-Gang Tseng (2010), " Microfluidic Systems for Biosensing", *Sensors (Basel).*, pp 6623–6661.
- [48] L. Zhao and E. Yeatman (2007), "Micro capacitive tilt sensor for human body movement detection," in *Body Sensor Networks 2007*, Proceedings, pp. 195–200.
- [49] Lei Wang, Z.H., Baoliang Wang, Haifeng Ji, and Haiqing Li, (2012) 'Flow Pattern Identification of Gas–Liquid Two-Phase Flow Based on Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection' *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, p. 1466-1474.
- [50] Li H., et al., (2011) 'Fabrication of polystyrene microfluidic devices using a pulsed CO2 laser system. *Microsystem Technologies*', Vol. 18, No. 3, pp. 373-379.
- [51] Liu J., et al., (2013) 'Modeling of capacitively coupled contactless conductivity detection on microfluidic chips', *Microsystem Technologies*, Vol. 19, No. 12, pp. 1991-1996.
- [52] Liu, J., et al., (2009) 'Plasma assisted thermal bonding for PMMA microfluidic chips with integrated metal microelectrodes', *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 141, No. 2, pp. 646-651.

- [53] M. Han et al., “Sensitivity improvement of a thermal convection-based tilt sensor using carbon nanotube,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 56, no. 6S1, p. 06GF05, Jun. 2017.
- [54] Marian Liberko a, Katarina Kolostova a, Vladimir Bobek (2013), "Essentials of circulating tumor cells for clinical research and practice", *Critical Reviews in Oncology/Hematology* 88 (2013) 338–356.
- [55] P. Fernando, C. Antunes, C. A. Marques, H. Varum, and P. S. André (2012), “Biaxial Optical Accelerometer and High-Angle Inclinometer With Temperature and Cross-Axis Insensitivity,” *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 7, pp. 2399–2406.12
- [56] P. Hu, J. Guo, and J. Tan (2016), “An Annular Planar-capacitive Tilt Sensor with a 360amp;x00B0; Measurement Range,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, pp. 1–1.
- [57] P. M. Moubarak and P. Ben-Tzvi (2011), “Design and analysis of a new piezoelectric MEMS tilt sensor,” *ROSE 2011 - IEEE Int. Symp. Robot. Sensors Environ. Proc.*, pp. 83–88.
- [58] P. M. Moubarak and P. Ben-Tzvi (2011), “Design and analysis of a new piezoelectric MEMS tilt sensor,” *ROSE 2011 - IEEE Int. Symp. Robot. Sensors Environ. Proc.*, pp. 83–88.
- [59] P. M. Moubarak, S. Member, P. Ben-tzvi, and M. E. Zaghoul, “A Self-Calibrating Mathematical Model for the Direct Piezoelectric Effect of a New MEMS Tilt Sensor,” *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 5, pp. 1033–1042, 2012.
- [60] P. Paterlini-Brechot, and N. L. Benali, “Circulating tumor cells (CTC) detection: Clinical impact and future directions”, *Cancer Lett.*, vol. 253, pp. 180-204, 2007.

- [61] (2015), “Differential capacitively coupled contactless conductivity detection (DC4D) sensor for detection of object in microfluidic channel,” in 2015 IEEE SENSORS, pp. 1–4.
- [62] R. M. Guijt et al. (2001), “Capillary electrophoresis with on-chip four-electrode capacitively coupled conductivity detection for application in bioanalysis,” *Electrophoresis*, vol. 22, no. 12, pp. 2537–2541.
- [63] R. Pethig, “Review Article—Dielectrophoresis: Status of the theory, technology, and applications”, *Biomicrofluidics*, vol. 4, 022811, 2010.
- [64] R. Yang, H. Bao, S. Zhang, K. Ni, Y. Zheng, and X. Dong (2015), “Simultaneous Measurement of Tilt Angle and Temperature With Pendulum-Based Fiber Bragg Grating Sensor,” *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 11, pp. 6381–6384.
- [65] Rosanne M. Guijt, E.B., Gert van der Steen, Hans Frank, Hugo Billeliet, Thomas Schalkhammer, Frederic Laugere, Michiel Vellekoop, Axel Berthold, Lina Sarro, Gijs W. K. van Dedem, (2001) ‘Capillary electrophoresis with on-chip four-electrode capacitively coupled conductivity detection for application in bioanalysis’, *Electrophoresis*, Vol. 22, No. 12, pp. 2537–2541.
- [66] S. Billat et al., “Micromachined inclinometer with high sensitivity and very good stability,” *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 97–98, pp. 125–130, 2002.
- [67] S. Das (2014), “A Simple, Low Cost Optical Tilt Sensor,” *Int. J. Electron. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 235–241.
- [68] S. Park, Y. Zhang, T. H. Wang, and S. Yang (2011), “Continuous dielectrophoretic bacterial separation and concentration from physiological media of high conductivity”, *Supplementary information, Lab on a chip*, vol. 11, pp. 2893-2900.

- [69] Stephen D. Senturia (2001), "*Microsystem Design*", eBook ISBN: 0-306-47601-0.4, Print ISBN: 0-7923-7246-8.
- [70] (2016), "Biological microparticles detection based on differential capacitive sensing and dielectrophoresis manipulation," 2016 Int. Conf. Adv. Technol. Commun., pp. 297–301.
- [71] T. Vu Quoc, T. Pham Quoc, T. Chu Duc, T. T. Bui, K. Kikuchi, and M. Aoyagi, "Capacitive sensor based on PCB technology for air bubble inside fluidic flow detection," in IEEE SENSORS 2014 Proceedings, 2014, pp. 237–240.
- [72] Tae Yoon Lee Kyung-A Hyun Seung-II Kim Hyo-II Jung (2016), "An integrated microfluidic chip for one-step isolation of circulating tumor cells", Sensors and Actuators B, doi:10.1016/j.snb.2016.05.163.
- [73] V. T. Dau, D. V. Dao, M. Hayashida, T. X. Dinh, and S. Sugiyama (2006), "A Dual Axis Accelerometer Utilizing Low Doped Silicon Thermistor," IEEJ Trans. Sensors Micromachines, vol. 126, no. 5, pp. 190–194.
- [74] V. T. Dau, D. V. Dao, T. Shiozawa, H. Kumagai, and S. Sugiyama (2006), "Development of a dual-axis thermal convective gas gyroscope," J. Micromechanics Microengineering, vol. 16, no. 7, pp. 1301–1306.
- [75] Vu Quoc T., et al., (2014) 'A printed circuit board capacitive sensor for air bubble inside fluidic flow detection', *Microsystem Technologies*, Vol. 21, No. 4, pp. 911-918.
- [76] Wang B., et al., (2013) 'Measurement of bubble velocity using Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (C4D) technique', *Particuology*, Vol. 11, No. 2, pp. 198-203.

- [77] Wang Z. and J. Zhe, (2011) ‘Recent advances in particle and droplet manipulation for lab-on-a-chip devices based on surface acoustic waves’, *Lab Chip*, Vol. 11, No. 7, pp. 1280-5.
- [78] Weian Sheng, Tao Chen, Rahul Kamath, Xiangling Xiong, Weihong Tan, and Z. Hugh Fan (2012), "Aptamer-enabled Efficient Isolation of Cancer Cells from Whole Blood Using a Microfluidic Device", *Institutes health of national (NIH Public Access)*, doi:10.1021/ac3005633.
- [79] Wu J., Y. Ben, and H.-C. Chang, (2005) ‘Particle detection by electrical impedance spectroscopy with asymmetric-polarization AC electroosmotic trapping’, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 1, No. 2, pp. 161-167.
- [80] X. Zou, P. Thiruvengatanathan, and A. A. Seshia (2013), “Micro-electro-mechanical resonant tilt sensor with 250 nano-radian resolution,” in 2013 Joint European Frequency and Time Forum International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), pp. 54–57.
- [81] Y. Chiu, B.T. Chen, and H.-C. Hong (2015), “Integrated CMOS MEMS liquid capacitive inclinometer,” in 2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), pp. 1152–1155.14
- [82] Y. Huang, K. L. Ewalt, M. Tirado, R. Haigis, A. Forster, D. Ackley, M. J. Heller, J. P. O’Connell, and M. Krihak (2001), “Electric Manipulation of Bioparticles and Macromolecules on Microfabricated Electrodes,” *Anal. Chem.*, vol. 73, no. 7, pp. 1549–1559.
- [83] Y. Weng, S. Wang, H. Zhang, H. Gu, and X. Wei (2017), “A High Resolution Tilt Measurement System Based on Multi-accelerometers,” *Measurement*, vol. 109, no. October, pp. 215–222.

-
- [84] Y. Weng, S. Wang, H. Zhang, H. Gu, and X. Wei (2017), “A High Resolution Tilt Measurement System Based on Multi-accelerometers,” *Measurement*, vol. 109, no. October, pp. 215–222.
- [85] Zemmann AJ, S.E., Volgger D, Bonn GK., (1998) ‘Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis’, *Anal Chem*, Vol. 70, No. 3, pp. 563-567.
- [86] Zhang H., et al., (2009) ‘Methods for counting particles in microfluidic applications’, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 7, No. 6, pp. 739-749.

