

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

**NGUYỄN MINH NGỌC**

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO CẢM BIẾN  
TỰ PHẪNG**

**Ngành : Công nghệ Kỹ thuật Điện tử Truyền thông**

**Chuyên ngành: Kỹ thuật Điện tử**

**Mã số : 60520203**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ  
CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ TRUYỀN THÔNG**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: PGS. TS. CHỦ ĐỨC TRÌNH**

**Hà Nội - 2016**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan:

Bản luận văn tốt nghiệp này là công trình nghiên cứu của cá nhân tôi, được thực hiện dựa trên cơ sở nghiên cứu lý thuyết, thực tế dưới sự hướng dẫn của PGS. TS. Chử Đức Trình.

Các số liệu, kết luận của luận văn là trung thực, dựa trên sự nghiên cứu những mô hình, kết quả đã đạt được của các nước trên thế giới và trải nghiệm của bản thân, chưa từng được công bố dưới bất kỳ hình thức nào trước khi trình bày bảo vệ trước “Hội đồng đánh giá luận văn thạc sỹ kỹ thuật”.

Hà Nội, Ngày tháng năm 2016

Người cam đoan

## LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, cho phép em được gửi lời cảm ơn sâu sắc đến thầy PGS. TS. Chủ Đức Trình. Thầy là người luôn theo sát em trong quá trình làm luận văn, Thầy đã tận tình chỉ bảo, đưa ra những vấn đề cốt lõi giúp em củng cố lại kiến thức và có định hướng đúng đắn để hoàn thành luận văn này.

Tiếp đến, em xin được gửi lời cảm ơn đến tất cả quý Thầy/Cô đã và đang giảng dạy tại Khoa Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ đã giúp em có được những kiến thức cơ bản để thực hiện luận văn này. Kính chúc Thầy/Cô dồi dào sức khỏe, thành đạt và ngày càng thành công hơn trong sự nghiệp trồng người của mình.

Cuối cùng, em cũng xin cảm ơn gia đình, các anh chị, bạn bè đã luôn quan tâm, động viên và giúp đỡ em trong thời gian thực hiện luận văn tốt nghiệp.

Xin chân thành cảm ơn!

## MỤC LỤC

<b>LỜI CAM ĐOAN</b> .....	<b>i</b>
<b>LỜI CẢM ƠN</b> .....	<b>ii</b>
<b>MỤC LỤC</b> .....	<b>iii</b>
<b>DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ</b> .....	<b>v</b>
<b>LỜI MỞ ĐẦU</b> .....	<b>1</b>
1. Lý do chọn đề tài .....	1
2. Mục tiêu đề tài .....	2
2.1. Về lý thuyết: .....	2
2.2. Về thực tiễn: .....	4
3. Phương pháp nghiên cứu .....	4
4. Cấu trúc luận văn .....	5
<b>CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ THUYẾT CẢM BIẾN ĐIỆN DUNG</b> .....	<b>6</b>
1.1. Điện dung .....	6
1.2. Hằng số điện môi .....	7
1.3. Các ứng dụng của cảm biến điện dung .....	8
1.3.1. Cảm biến khoảng cách .....	9
1.3.2. Cảm biến vị trí .....	10
1.3.3. Cảm biến độ ẩm .....	11
1.3.4. Cảm biến áp suất .....	12
1.3.5. Cảm biến độ nghiêng .....	14
<b>CHƯƠNG 2: CẤU TRÚC C<sup>4</sup>D VÀ PHƯƠNG PHÁP PHÁT HIỆN VẬT THỂ TRÊN KÊNH CHẤT LỎNG</b> .....	<b>15</b>
2.1. Nguyên tắc cơ bản của cấu trúc C <sup>4</sup> D.....	15
2.2. Thiết kế và vận hành cảm biến DC <sup>4</sup> D thông thường .....	20
2.3. Nguyên lý hoạt động cảm biến C <sup>4</sup> D phát hiện vật thể trong kênh chất lỏng .....	22
2.4. Thiết lập hệ thống và đo lường .....	25
<b>CHƯƠNG 3: CẢM BIẾN TỰ PHẪNG VỚI VI KÊNH CHẤT LỎNG</b> .....	<b>27</b>
3.1. Cơ sở lý thuyết .....	27
3.2. Nghiên cứu thiết kế cảm biến tự phẳng .....	29

3.3. Chế tạo cảm biến tụ phẳng vi điện cực .....	32
3.4. Thiết lập hệ thống đo lường .....	33
<b>CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN .....</b>	<b>37</b>
4.1. Yêu cầu.....	37
4.2. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc trên phần mềm COMSOL .....	37
4.3. Kết quả mô phỏng với kênh chất lỏng không dẫn điện.....	38
4.4. Kết quả mô phỏng với kênh chất lỏng dẫn điện.....	40
4.5. Kết quả mô phỏng điện thế trong tụ phẳng. ....	43
<b>KẾT LUẬN .....</b>	<b>45</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO.....</b>	<b>47</b>

## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Các tấm điện tích song song cách nhau bằng một lớp điện môi [13].....	6
Hình 1.2. Cảm biến khoảng cách và ứng dụng thực tế, (a) Đếm số lượng hộp trên dây chuyên, (b) Phát hiện lỗi “read only” trên đĩa mềm [23].....	9
Hình 1.3. Cảm biến vị trí với một bánh mã hóa quang [23].....	10
Hình 1.4. Cảm biến độ ẩm [49].....	12
Hình 1.5. Một số loại cảm biến áp suất, (a) Loại duỗi thẳng, (b) Dạng xoắn [23].....	13
Hình 2.1. Ví dụ về $C^4D$ những thiết kế sử dụng chủ yếu để phát hiện conductometric [34]. .....	15
Hình 2.2. Thiết kế của một cấu trúc $C^4D$ đơn: (a) điện cực kích thích và điện cực cảm biến; (b) Các mạch tương đương.....	16
Hình 2.3. Trường điện được hình thành giữa các điện cực âm và dương với độ dài rãnh khác nhau ( $l_1$ , $l_2$ và $l_3$ ) [30]. .....	18
Hình 2.4. Khả năng cảm biến phát hiện đặc điểm khác nhau của mẫu [30]: (a) Mật độ cảm biến, (b) Khoảng cách cảm biến, (c) kết cấu cảm biến, (d) độ ẩm cảm biến. 18	18
Hình 2.5. Một sơ đồ đơn giản của cảm biến điện dung dựa theo LoC [8]. .....	19
Hình 2.6. Sơ đồ khối thiết kế của bộ cảm biến $DC^4D$ [19]. .....	20
Hình 2.7. (a) Các $DC^4D$ dựa trên cấu hình ba điện cực; (b) Các sơ đồ tương đương[19]. .....	21
Hình 2.8. Sự thay đổi điện dung ngược với vị trí các hạt bên trong cấu trúc $C^4D$ đơn [19]. .....	22
Hình 2.9. Mạch tương đương của bộ cảm biến thể lỏng $DC^4D$ [19]. .....	23
Hình 2.10. Độ dẫn nạp của cấu trúc $C^4D$ đơn khi một hạt di chuyển bên trong điện cực [19]. .....	25
Hình 2.11. Sự thay đổi điện dung trái ngược với vị trí các hạt bên trong cấu trúc $C^4D$ đơn[19]. .....	26
Hình 3.1. Bản vẽ sơ đồ mạch và mạch điện tương đương với: a) Cấu trúc $C^4D$ thường; b,c,d) Cấu trúc $C^4D$ vi sai [21]. .....	27
Hình 3.2. Cấu trúc được đề xuất: a) Cấu tạo tổng thể; b) Các lớp của cảm biến với cấu trúc $C^4D$ [21]. .....	29
Hình 3.3. Mô hình tụ đồng phẳng.....	30
Hình 3.4. Mô tả cấu trúc của chip cảm biến tụ phẳng: a) Mặt bên trên; b) Mặt cắt ngang; c) Kích thước của các vi điện cực và vi kênh [21]. .....	31
Hình 3.5. Quá trình chế tạo[21]. .....	33
Hình 3.6. Thiết lập hệ thống đo lường thực nghiệm[21]. .....	34
Hình 3.7. Chip cảm biến tụ phẳng với cấu trúc $DC^4D$ [21]. .....	35
Hình 3.8. Hình ảnh của a) Bột khí, b) Tế bào sống đi qua kênh dẫn [21]. .....	35
Hình 4.1. Các thông số cơ bản được thiết lập trong phần mềm COMSOL .....	37
Hình 4.2. Cảm biến tụ phẳng với cấu trúc $DC^4D$ được xây dựng trong phần mềm COMSOL .....	38

<i>Hình 4.3. Sự thay đổi điện dung của cảm biến với ba vật liệu khác nhau theo vị trí của một vật thể với đường kính 25 <math>\mu\text{m}</math>.</i> .....	39
<i>Hình 4.4. Điện dung vi sai đầu ra với thể tích vật thể.</i> .....	39
<i>Hình 4.5. Điện dung vi sai theo kết quả đo và mô phỏng với phần mềm COMSOL.</i> ...	40
<i>Hình 4.6. Sự thay đổi điện dung của cảm biến với ba vật liệu khác nhau theo vị trí của một vật thể với đường kính 25 <math>\mu\text{m}</math>.</i> .....	41
<i>Hình 4.7. Điện dung vi sai đầu ra với thể tích vật thể.</i> .....	41
<i>Hình 4.8. Điện dung vi sai với vị trí hạt thiếc trong kênh nước muối và dầu máy.</i> .....	42
<i>Hình 4.9. Sự thay đổi điện dung của tụ theo kích thước hạt Tin trong môi trường nước muối và dầu máy.</i> .....	42
<i>Hình 4.10. Sự thay đổi điện thế khi có hạt Tin chạy qua kênh dẫn chất lỏng.</i> .....	43
<i>Hình 4.11. Sự thay đổi điện thế khi có hạt <math>\text{SiO}_2</math> chạy qua kênh dẫn chất lỏng.</i> .....	43

## LỜI MỞ ĐẦU

### 1. Lý do chọn đề tài

Thế giới đang ngày càng phát triển các công nghệ tiên tiến theo hướng thu nhỏ kích thước của sản phẩm, nó dẫn đến sự phát triển nhanh chóng của một công nghệ mới gọi là MEMS (Microelectromechanical Systems – Hệ thống vi cơ điện tử). MEMS là một công nghệ được tích hợp các yếu tố cơ khí, điện tử, cảm biến và cơ cấu chấp hành trên một chất nền silicon sử dụng công nghệ chế tạo vi mô [22]. Các quá trình này là kết quả của việc kết hợp giữa vi cơ điện tử tiên tiến và công nghệ mạch tích hợp. Kích thước và tính năng tích hợp của các linh kiện MEMS là lợi thế lớn nhất của công nghệ này. Kích thước nhỏ cũng thể hiện ưu điểm sử dụng ít nguyên liệu và năng lượng được tiêu thụ thấp. Kích thước nhỏ của chúng cho phép xây dựng các dãy hàng trăm hệ thống trên một con chip duy nhất. Bên cạnh đó, lợi thế nổi bật của MEMS chính là yếu tố tài chính. Chi phí cho mỗi đơn vị có thể được điều chỉnh xuống mức giá phải chăng bằng cách chế tạo ra hàng nghìn linh kiện trên mỗi phiến silicon. Thiết bị MEMS đang nhanh chóng tiếp cận vào mọi khía cạnh trong đời sống hiện đại. Trong tương lai, thiết bị này đang trở nên ngày càng nhỏ hơn, chính xác hơn và nhanh hơn, và công nghệ MEMS được hỗ trợ trong sự phát triển của công nghệ NEMS (Hệ thống Nano cơ điện tử). MEMS đã được tạo ra ngày càng nhiều lợi ích và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực cuộc sống. Các cấu trúc vi mô được ứng dụng trong các hệ thống quang học, truyền thông, thiết bị RF, phân tích, và sinh học.

Trên thực tế, những ứng dụng phổ biến nhất của MEMS là các chip vi cảm biến. Chúng trở nên đa dạng trong các ứng dụng và có thể tìm ra ở hầu hết khắp nơi trong cuộc sống thường ngày. Sự phổ biến của các cảm biến này chủ yếu từ những ưu điểm mà chúng sở hữu. Ngoài việc chúng có kích thước nhỏ, cảm biến MEMS tiêu thụ rất ít năng lượng và có khả năng đo rất chính xác. Nguyên lý hoạt động của cảm biến MEMS là khác nhau tùy thuộc vào mục đích sử dụng. Tất cả các cảm biến đo lường sự thay đổi và các thiết bị MEMS thực hiện nhiệm vụ đó với một hoặc sự kết hợp của các phương pháp phát hiện sau đây: cơ khí, quang học, điện, từ trường, nhiệt và hóa học.

Các cảm biến khác nhau được xây dựng bởi các cơ chế khác nhau, chẳng hạn như cấu trúc cơ học dựa trên các vi gập cho các vi thao tác và vi cảm biến [11], từ trường dựa trên các vòng hạt từ tính được gắn vào việc phát hiện hạt sinh học [35], cũng như ở khía cạnh quang học dựa vào chùm ánh sáng cho huỳnh quang được gắn với việc phát hiện hạt sinh học [7], điện trường dựa vào thao tác DEP và điện trở gắn với việc phát hiện điện dung [15, 31]. Trong khi các thiết bị khác rất tốn kém, có độ tiêu hao năng lượng cao và hầu như không thể di chuyển được, việc ứng dụng phương pháp áp



điện trở/điện dung trong việc phát hiện hạt sinh học đã và đang thu hút sự chú ý rất lớn trong nhiều ứng dụng môi trường và sức khỏe. Trong những năm gần đây, các cảm biến điện dung MEMS đã trở thành một trong những thành phần ứng dụng quan trọng nhất. Các nghiên cứu về cảm biến điện dung đã thu được nhiều kết quả bởi vì sự đơn giản của nó cả trong thiết kế và chế tạo, dễ dàng để đo đạc và không tốn kém. Chúng bao gồm nhiều cảm biến có khả năng phát hiện sự hiện diện của các hạt, các mô hoặc tế bào trong kênh dẫn chất lỏng.

Triển khai nghiên cứu thiết kế chế tạo cảm biến tụ phẳng là nội dung có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao. Chính vì vậy luận văn “*Nghiên cứu thiết kế và chế tạo cảm biến tụ phẳng*” sẽ trình bày và làm rõ hơn các nguyên lý thiết kế, mô phỏng, cách thức chế tạo và thiết lập hệ thống trong thực tế với cảm biến tụ phẳng.

## 2. Mục tiêu đề tài

Đề tài luận văn “*Nghiên cứu thiết kế và chế tạo cảm biến tụ phẳng*” có hai mục tiêu lý thuyết và thực tiễn:

### 2.1. Về lý thuyết:

- ***Nghiên cứu về cảm biến với vi kênh chất lỏng:***

Sự phát hiện hạt trong dòng chảy chất lỏng đã được phát triển cho nhiều ứng dụng thực tế trong các lĩnh vực khác nhau, chẳng hạn như trong ngành dược, MEMS, sinh học, hóa học phân tích, phân tích thực phẩm, kiểm soát chất lượng nước và đặc biệt là trong y tế [32, 33, 37]. Ví dụ, sự xuất hiện của bọt khí trong mạch máu của bệnh nhân là rất nguy hiểm, trong trường hợp không thể đoán trước việc tắc mạch máu não của bệnh nhân có thể dẫn đến đột tử. Những bọt khí này có thể xuất hiện trong máu của thân ông khi ông lọc máu hoặc bọt khí có thể được tạo ra khi tiêm truyền tĩnh mạch của cơ thể bệnh nhân, vì vậy việc phát hiện các bọt khí trong máu hoặc trong các đường ống dẫn dịch trong cơ thể là việc rất cần thiết. Một ví dụ điển hình là để phát hiện sớm bệnh ung thư và đưa ra chẩn đoán chính là phát hiện ra các tế bào khối u tuần hoàn (CTCs) trong máu. CTCs là những tế bào ung thư lưu thông qua các tĩnh mạch và mao mạch.

Di căn là kết quả của các tế bào khối u di chuyển từ các vị trí khối u ban đầu đến các cơ quan khác trong cơ thể, và ảnh hưởng trực tiếp đến hầu hết các trường hợp tử vong do bị mắc bệnh ung thư. Tỷ lệ phát hiện CTCs đã tăng đáng kể trong thập kỷ qua. Trong MEMS, sự xuất hiện của một hạt trong vi kênh chất lỏng có thể ảnh hưởng đáng kể đến các phản ứng của dòng chảy như vận tốc dòng chảy, chất lượng tinh khiết của dịch lỏng. Nhiều phương pháp cơ bản đã được áp dụng để phát hiện dòng chảy như quang học, siêu âm, cảm biến điện dựa trên cơ chế tiếp xúc và không tiếp xúc.

Cảm biến vi kênh chất lỏng có thể sử dụng tham số dẫn điện của vật liệu và kênh hình học dựa trên các kỹ thuật tiếp xúc trực tiếp [16]. Trong kỹ thuật này,

các điện cực được trực tiếp tiếp xúc với các chất dịch, chất lỏng hoặc dung dịch điện phân. Các hiệu ứng phân cực và hiệu quả xói mòn điện hóa trong dung dịch hoặc các điện cực không thể tránh được bằng cách này. Bên cạnh đó, sự ô nhiễm của các điện cực thường gây ra lỗi trong phép đo tính dẫn điện. Những nhược điểm gây ra hạn chế với các ứng dụng thực tế của các kỹ thuật phát hiện dẫn tiếp xúc [17].

Các cấu trúc cảm biến không tiếp xúc điện dung được phát triển để tránh các vấn đề kỹ thuật tiếp xúc trực tiếp [16, 34, 45, 46]. Cấu trúc cảm biến điện dung giống như cơ chế không tiếp xúc thường được sử dụng để đo lường sự phát hiện độ pha như nước-không khí-dầu [6, 42, 44]. Tuy nhiên, độ nhạy cảm ứng của các cấu hình điện dung ở mức thấp trong trường hợp chất lỏng có dẫn xuất cao do giá trị điện trở nhỏ nhiều của kênh chất lỏng dẫn điện so với các điện dung cảm biến [42]. Jaworek cùng cộng sự đã trình bày một cảm biến điện dung tần số cao để giải quyết các tác động dẫn điện của nước sử dụng một bộ dao động 80 MHz. Tuy nhiên, thiết bị yêu cầu một điện cực rất gần cho một phép đo và một mạch khá phức tạp [20].

- ***Tìm hiểu, nghiên cứu cấu trúc cảm biến sử dụng cấu trúc C<sup>4</sup>D (Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detector):***

Cấu trúc C<sup>4</sup>D được đề xuất độc lập bởi Fracassi da Silva cùng cộng sự, và Zemann cùng cộng sự vào năm 1998 [1, 19], như một kỹ thuật dò tìm cho các hệ thống điện di mao dẫn [5, 18]. Đây là loại kỹ thuật được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực và đã mang lại một lợi thế không thể phủ nhận vào phát hiện và lĩnh vực đo lường. Cấu trúc C<sup>4</sup>D gồm hai điện cực cách nhau một khoảng. Căn cứ vào tính dẫn điện của chất lỏng, dòng chảy sẽ truyền tín hiệu từ một điện cực đang bị kích thích thông qua hằng số điện môi của một ống dẫn và mang lại các thông tin về tính dẫn của chất lỏng đến điện cực cảm biến [1, 17, 26, 27, 29, 37, 45, 47, 48]. Cấu trúc C<sup>4</sup>D có thể được sử dụng để tìm ra dầu trong nước và các tạp chất trong nước máy (chất lỏng dẫn điện). Do đó, ứng dụng này có thể trở thành một phương pháp rất tốt trong việc giải quyết các vấn đề trong ngành công nghiệp dầu khí [6]. Hơn nữa, đến nay, các kỹ thuật C<sup>4</sup>D được nghiên cứu và sử dụng trong các lĩnh vực nghiên cứu Hóa học phân tích để phát hiện nồng độ ion/dẫn điện trong các mao mạch và độ dẫn của kênh chất lỏng [17]. Một ứng dụng hữu ích khác của kỹ thuật này là ước tính được vận tốc dòng chảy chất lỏng và đo vận tốc bọt khí trong dòng chảy hai pha khí-lỏng trong ống kích cỡ milimet, một vấn đề cơ bản hiện có trong nhiều ngành công nghiệp, chẳng hạn như hóa chất, dược phẩm, dầu khí, năng lượng và kỹ thuật điện [42]. Ứng dụng dựa trên kỹ thuật C<sup>4</sup>D trong việc phát hiện tạp chất và ước lượng vận tốc của nó trong kênh chất lỏng được nghiên cứu và phát triển bởi nhiều nhóm nghiên cứu bất chấp những khó khăn và hạn chế [26, 27, 41] của nó. Có một số phương pháp đo lường được phát triển để khắc phục những khó khăn và hạn chế của các kỹ thuật C<sup>4</sup>D thông thường. Một lá chắn được đặt giữa

các điện cực kích thích và điện cực pick-up có thể được sử dụng để ngăn chặn điện dung dò [12, 24, 25, 26] hoặc tận dụng hiệu ứng cộng hưởng song song để loại bỏ ảnh hưởng của điện dung dò [40]. Một số mẫu thiết kế sử dụng phương pháp cộng hưởng này để đo độ dẫn và phát hiện vật thể trong dòng chảy [17, 28], nhưng trong trường hợp đó, hằng số điện môi không thể nhận dạng, ví dụ như trường hợp dầu hoặc không khí bên trong đường ống.

## 2.2. Về thực tiễn:

- ***Nghiên cứu thiết kế cảm biến tụ phẳng dựa trên cấu trúc C<sup>4</sup>D:***

Kỹ thuật C<sup>4</sup>D mang đến nhiều hứa hẹn cho các hệ thống vi lỏng, với các tính năng bao gồm độ nhạy cao, khả năng thu nhỏ, các yêu cầu công suất thấp, khả năng tương thích với các công nghệ vi chế tạo tiên tiến và chi phí thấp. Trong luận văn này, một cảm biến tụ phẳng sử dụng cấu trúc C<sup>4</sup>D được thiết kế và xây dựng phù hợp với hệ thống phát hiện vật thể trong kênh chất lỏng. Nghiên cứu này sử dụng một bộ khuếch đại vi sai để làm giảm đi điện dung dò và làm tăng độ nhạy không chỉ trong chất lỏng dẫn điện mà còn trong các chất lỏng không dẫn điện.

Cấu trúc này bao gồm ba điện cực phẳng được đặt trên một bảng mạch in PCB, bao gồm hai điện cực cảm biến và một điện cực kích thích. Các điện cực được bố trí tạo thành hai cảm biến tụ phẳng. Một kênh dẫn chất lỏng được bố trí bên trên mặt ba điện cực.

- ***Thực thi chế tạo, thiết lập hệ thống tích hợp cảm biến tụ phẳng.***

Trong số các kỹ thuật vật lý khác nhau để phát hiện các vật thể trong vi kênh chất lỏng, cảm biến điện dung nổi lên như kỹ thuật tốt nhất trong việc chế tạo và thiết lập đo lường, cũng như khả năng đơn giản hóa hệ thống [18, 44]. Một thiết kế tối ưu sử dụng điện dung vi sai giữa các điện cực đồng phẳng trong vi kênh lỏng được đề xuất. Cấu trúc C<sup>4</sup>D vi sai bao gồm ba vi điện cực liền kề được đặt trên đế thủy tinh và sắp xếp gần nhau trong cặp để tạo thành cấu trúc phẳng vi sai. Cấu trúc vi kênh được chế tạo bên trong chất nền PDMS. Chúng tôi tận dụng khả năng tự liên kết của các nguyên liệu hai bề mặt của chúng để dính kèm các chất nền PDMS trên bề mặt kính. Khi một đối tượng đi qua các khu vực hoạt động của cảm biến trong các kênh, các điện dung vi sai sẽ thay đổi, dẫn đến sự thay đổi trong tín hiệu đầu ra của thiết bị đo lường.

## 3. Phương pháp nghiên cứu

Để thực hiện đề tài trên, phương pháp nghiên cứu được sử dụng gồm:

- Phương pháp nghiên cứu lý thuyết: Sử dụng phương pháp phân tích và tổng hợp lý thuyết; cập nhật và xử lý tài liệu liên quan đến các lý thuyết về cảm biến điện dung, các mô hình cảm biến  $C^4D$  và các cách chế tạo.
- Phương pháp mô phỏng: Trên cơ sở thiết kế đã có thực hiện mô phỏng trên phần mềm chuyên dụng COMSOL.
- Phương pháp nghiên cứu thực tiễn: nghiên cứu thiết kế tích hợp cảm biến tụ phẳng trong hệ thống phát hiện vật thể với vi kênh chất lỏng.

#### **4. Cấu trúc luận văn**

Nội dung luận văn bao gồm 4 chương:

Chương 1: Tổng quan về thuyết cảm biến điện dung.

Chương 2: Cấu trúc  $C^4D$  và phương pháp phát hiện vật thể trên kênh chất lỏng.

Chương 3: Cảm biến tụ phẳng với vi kênh chất lỏng.

Chương 4: Kết quả và thảo luận.

## CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ THUYẾT CẢM BIẾN ĐIỆN DUNG

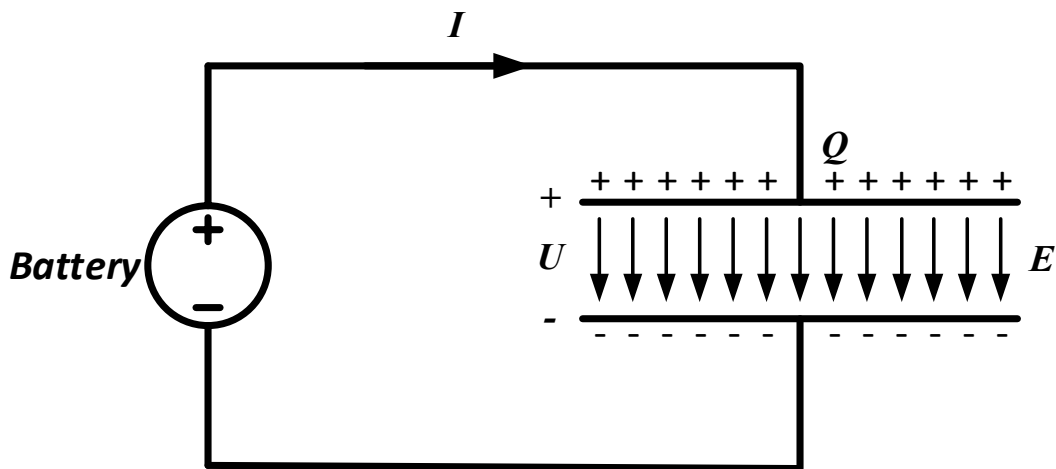
### 1.1. Điện dung

Điện dung là sức chứa điện quan trọng của tụ điện. Điện dung được đo bằng Farad (F), và nó được tính toán như sau:

$$C = \frac{\Phi}{\int E \cdot dl} \quad (1.1)$$

Trong đó,  $E$  là cường độ điện trường,  $\Phi$  là tổng điện tích trên các điện cực và điện tích di dời trong các phân tử cực điện môi trong điện trường, với  $dl$  là chiều dài tối thiểu cùng một dòng thông lượng.

Hình 1.1 cho thấy hai tấm dẫn điện song song kết nối bằng dây với một pin, cách nhau bằng một chất cách điện (ví dụ như không khí) và các đường điện trường. Đối với cấu trúc hai điện cực song song, điện dung là thước đo của số điện tích mà một tụ điện có thể lưu trữ với một điện áp cho trước [39].



Hình 1.1. Các tấm điện tích song song cách nhau bằng một lớp điện môi [13].

Điện dung có thể được xác định bằng đơn vị Cu lông/volt như sau:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.2)$$

Trong đó,  $Q$  là độ lớn của điện tích lưu trữ trên mỗi tấm (culông),  $U$  là điện áp áp dụng cho các tấm điện tích (volt).

Một tụ điện có điện dung với đơn vị farad có thể lưu trữ một coulông điện tích khi điện áp trên thiết bị đầu cuối của nó là 1 V. Giá trị điện dung điển hình dao động từ khoảng 1 fF ( $10^{-15}$  F) đến khoảng 1.000  $\mu$ F ( $10^{-3}$  F). Giữa hai tấm của một tụ điện sẽ xuất hiện điện trường nếu điện áp được áp dụng cho một trong các tấm điện tích. Điện trường tạo ra là do sự khác biệt giữa các điện tích được lưu trữ trên các bề mặt của mỗi tấm điện tích. Các điện dung mô tả các hiệu ứng ở điện trường do khoảng cách giữa hai tấm điện tích.

Khoảng cách giữa hai tấm điện tích của tụ điện được phủ bằng vật liệu điện môi. Nhìn chung, giá trị điện dung được xác định bởi các vật liệu điện môi, khoảng cách giữa các tấm, và điện tích mỗi tấm. Điện dung của một tụ điện có thể được biểu diễn dưới dạng hình học của nó và hằng số điện môi như sau:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1.3)$$

Trong đó,

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m, là hằng số điện môi tuyệt đối,

$\epsilon_r$  là hằng số điện môi tương đối tĩnh (hằng số điện môi) của vật liệu giữa các tấm điện tích,

$A$  là diện tích của mỗi tấm/ $m^2$ ,

$d$  là khoảng cách tách biệt (m) của hai tấm.

Hiện tượng điện dung có liên quan đến điện trường giữa hai bản cực của tụ điện. Cường độ điện trường giữa hai tấm giảm khi khoảng cách giữa hai bản điện cực tăng. Cường độ điện trường thấp hơn hoặc khoảng cách tách biệt lớn hơn sẽ làm giảm giá trị điện dung. Các bản dẫn điện với diện tích bề mặt lớn hơn có thể lưu trữ điện lớn hơn; do đó, một giá trị điện dung lớn hơn thu được là do các bản cực có diện tích bề mặt lớn hơn.

Ngoài ra, các điện cực cảm biến của cảm biến điện dung có thể được hình thành với các hình dạng và cấu trúc khác nhau. Cấu trúc hình học của các điện cực cảm biến ảnh hưởng đến điện trường giữa chúng. Trong thực tế, một vài loại điện cực cảm biến được thiết kế và chế tạo, chẳng hạn như thanh hình trụ, ống hình trụ, tấm hình chữ nhật, dây helixical, tấm đồng phẳng và hình ống trụ.

## 1.2. Hằng số điện môi

Khoảng cách giữa hai bề mặt của một tụ điện được lấp đầy bằng chất liệu không dẫn điện như kính, nhựa hoặc chất lỏng tách được hai điện cực của tụ điện [21]. Chất

liệu này là một hằng số điện môi cố định. Hằng số điện môi là thước đo sự ảnh hưởng của chất liệu trong điện trường. Điện dung tụ tăng lên hoặc giảm xuống phụ thuộc vào loại chất liệu điện môi. Hằng số điện môi liên quan tới khả năng chuyển hóa trong điện trường của chất liệu. Trong các tụ điện, một hằng số điện môi tăng cho phép lượng điện tích tương đồng được lưu trữ với một lượng điện trường nhỏ, điều này dẫn đến điện dung tăng.

Theo phương trình 1.3, điện dung tương ứng với hằng số điện môi. Do hằng số điện môi của vật liệu giữa các bản cực của tụ điện tăng nên điện dung sẽ theo đó mà tăng theo. Điện dung có thể được biểu thị bằng các thuật ngữ về hằng số điện môi như sau:

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (1.4)$$

Trong đó,  $C$  là điện dung tính bằng đơn vị Farad, là hằng số điện môi và  $C_0$  là điện dung mà không có hằng số điện môi.

Các chất liệu khác nhau đều có một hằng số điện môi khác nhau. Ví dụ, không khí có hằng số điện môi danh định tương đương với 1, một số loại dầu phổ biến như xăng có hằng số điện môi danh định là 2,2 và nước có hằng số điện môi danh định là 80. Nếu nước được sử dụng như một chất cách điện thay vì sử dụng không khí thì giá trị điện dung sử dụng nước như một chất cách điện sẽ tăng lên bằng hệ số 80. Hệ số này được gọi là *hằng số điện môi tương đối*.

### 1.3. Các ứng dụng của cảm biến điện dung

Một cảm biến điện dung điển hình dựa trên sự thay đổi của các thông số trong tụ điện dẫn đến sự thay đổi điện dung của nó trong thời gian cảm biến. Nó chuyển đổi một sự thay đổi về vị trí, hoặc các đặc tính của vật liệu điện môi thành tín hiệu điện [10]. Theo phương trình 1.3, cảm biến điện dung được thực hiện bằng cách thay đổi bất kỳ ba thông số của một tụ điện: khoảng cách ( $d$ ), diện tích các tấm điện dung ( $A$ ), và hằng số điện môi ( $\epsilon_r$ ); vì thế:

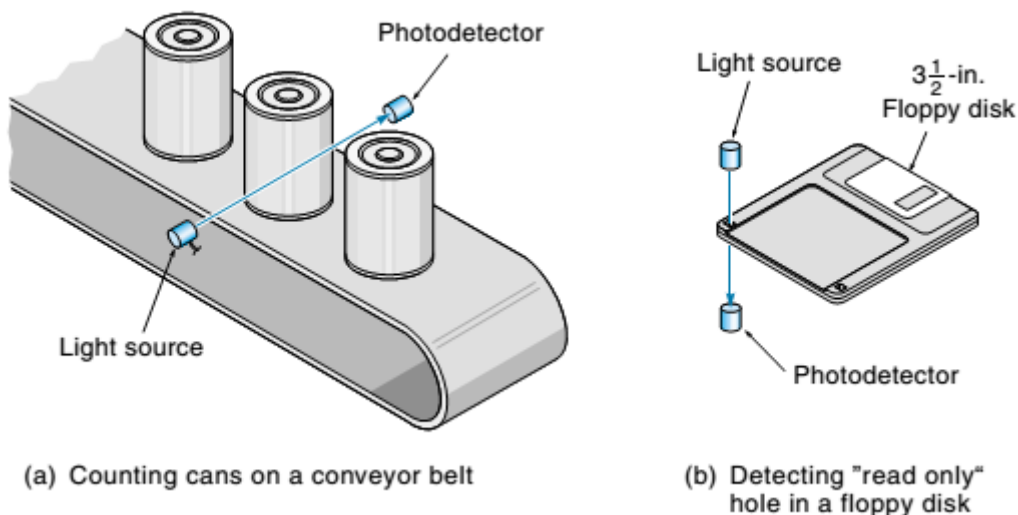
$$C = f(d, A, \epsilon_r) \quad (1.5)$$

Một loạt các loại khác nhau của cảm biến đã được phát triển chủ yếu dựa trên các nguyên tắc điện dung mô tả trong phương trình 1.3. Chức năng các bộ cảm biến được tính từ cảm biến độ ẩm, thông qua cấp độ cảm biến, đến cảm biến dịch chuyển [9]. Một số loại khác nhau của cảm biến điện dung dựa được sử dụng trong nhiều ứng

dụng công nghiệp và ô tô, chẳng hạn như cảm biến khoảng cách, cảm biến vị trí, cảm biến độ ẩm, và cảm biến áp lực [43].

### 1.3.1. Cảm biến khoảng cách

Một cảm biến khoảng cách có thể phát hiện sự hiện diện của các đối tượng gần đó mà không có bất kỳ mối qua hệ vật lý nào. Thông thường, một cảm biến khoảng cách phát ra một trường điện từ hoặc trường tĩnh điện, và phát hiện bất kỳ thay đổi trong trường điện hoặc phản hồi lại tín hiệu. Loại điện dung cảm biến khoảng cách bao gồm một bộ dao động có tần số được xác định bởi một mạch LC mà một tấm kim loại được kết nối. Khi một vật liệu dẫn điện hoặc dẫn điện một phần đến gần tấm dẫn điện, điện dung chung sẽ thay đổi tần số dao động. Sự thay đổi này được phát hiện và chuyển đến các đơn vị điều khiển. Các đối tượng cảm biến này thường được xem như là mục tiêu của cảm biến khoảng cách. Khi khoảng cách giữa các cảm biến khoảng cách và đối tượng mục tiêu nhỏ hơn, điện trường phân bố xung quanh tụ cũng thay đổi, và được phát hiện bởi các đơn vị điều khiển.



Hình 1.2. Cảm biến khoảng cách và ứng dụng thực tế, (a) Đếm số lượng hộp trên dây chuyền, (b) Phát hiện lỗ "read only" trên đĩa mềm [23].

Khoảng cách tối đa mà một bộ cảm biến khoảng cách có thể phát hiện được định nghĩa là 'phạm vi danh nghĩa'. Một số cảm biến có điều chỉnh phạm vi danh nghĩa hoặc cách thức báo cáo một khoảng cách phát hiện đã chia độ. Một cảm biến khoảng cách điều chỉnh trong phạm vi rất ngắn thường được sử dụng như một công tắc cảm ứng. Máy cảm biến khoảng cách điện dung có biên độ gấp đôi so với các cảm biến cảm ứng, trong khi chúng không chỉ phát hiện ra vật liệu bằng kim loại mà còn phát hiện ra các chất điện môi như giấy, thủy tinh, gỗ, nhựa các loại. Chúng thậm chí có thể phát hiện qua một bức tường hoặc hộp các tông. Bởi vì cơ thể con người vận hành như một chất dẫn điện với tần số thấp, cảm biến điện dung đã được sử dụng để đo



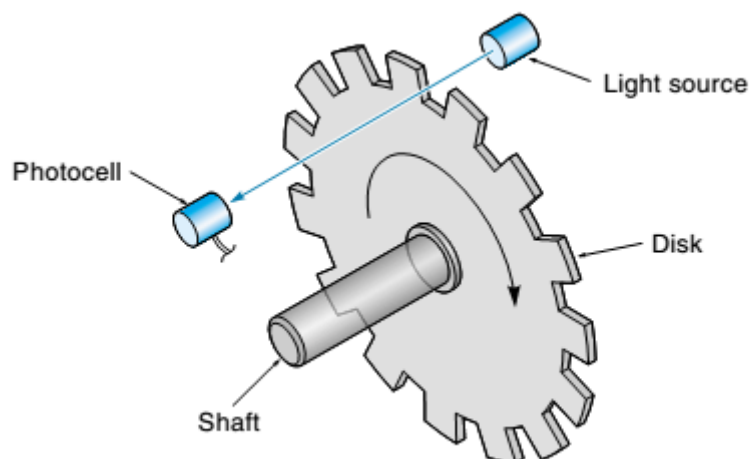
chấn động của con người và trong báo động xâm nhập. Điện dung cảm biến khoảng cách có độ tin cậy cao và tuổi thọ dài vì không chứa các bộ phận cơ khí và không có tiếp xúc vật lý giữa cảm biến và đối tượng cảm nhận.

Ví dụ, cảm biến khoảng cách không chỉ là một công tắc bị giới hạn [23], mà còn là một công tắc theo cơ chế nút bấm được thiết lập bằng cách kích hoạt khi một phần cánh tay cơ khí hoặc đòn bẩy đạt đến cuối quá trình đi trước định của nó. Nó có thể được thực hiện trong hệ thống mở cửa nhà để xe tự động; nơi người điều khiển cần phải biết nếu tất cả các cánh đều mở hoặc đều đóng. Các ứng dụng khác của điện dung cảm biến là [2]:

- + Khoảng cách: Nếu một vật kim loại là gần một điện cực tụ điện, điện dung lẫn nhau là một phép đo rất nhạy của cảm biến khoảng cách.
- + Đo độ dày: Hai tấm tiếp xúc với một chất cách điện sẽ đo độ dày chất cách điện nếu hằng số điện môi của nó xác định, hoặc hằng số điện môi nếu độ dày được xác định.
- + Áp lực cảm biến: Màng chắn với các đặc tính lệch ổn định có thể đo áp lực với một máy dò khoảng cách nhạy.

### 1.3.2. Cảm biến vị trí

Một cảm biến vị trí là một thiết bị cho phép thực hiện các phép đo vị trí và dịch chuyển. Vị trí có thể là một vị trí cố định hoặc một điểm tương tự [38]. Tuyến tính cũng như vị trí góc có thể được đo bằng cảm biến vị trí. Cảm biến vị trí được sử dụng trong nhiều ứng dụng công nghiệp như đo lường kênh chất lỏng, đo góc trục, cảm biến vị trí truyền động, mã hóa kỹ thuật số và số đếm, và hệ thống kết hợp với màn hình cảm ứng.



Hình 1.3. Cảm biến vị trí với một bánh mã hóa quang [23].

Theo truyền thống, chiết áp loại điện trở được sử dụng để xác định vị trí quay và tuyến tính. Tuy nhiên, vòng đời là chức năng hạn chế của các cảm biến này xảy ra là do hao mòn cơ khí đã làm cho các cảm biến điện trở nên kém hấp dẫn đối với các ứng dụng công nghiệp. Thông thường, Cảm biến vị trí điện dung không có thiết bị cơ khí để xác định vị trí dựa trên các thông số vật lý của các tụ điện. Đo lường vị trí sử dụng một cảm biến vị trí điện dung có thể được thực hiện bằng cách thay đổi ba thông số điện dung: Diện tích của các tấm điện dung, hằng số điện môi, và khoảng cách giữa các tấm. Các ứng dụng sau đây là một số ví dụ về việc sử dụng các cảm biến vị trí điện dung:

+ Cảm biến kênh lỏng: máy dò mức chất lỏng điện dung cảm nhận được mức chất lỏng trong một bể chứa bằng cách đo những thay đổi trong dung kháng giữa các tấm dẫn điện cực được ngâm trong chất lỏng, hoặc áp dụng cho bên ngoài của một bể chứa không dẫn điện.

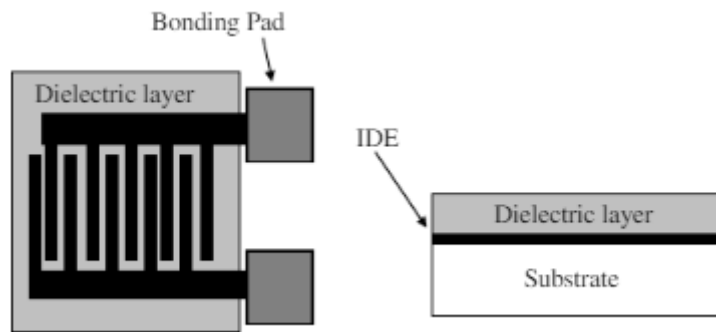
+ Góc trục hoặc vị trí tuyến tính: Cảm biến điện dung có thể đo góc trục hoặc vị trí với một sơ đồ gồm nhiều tấm kim loại cho độ chính xác cao và đầu ra kỹ thuật số, hoặc với một đầu ra tương tự với độ chính xác tuyệt đối ít nhưng phản ứng nhanh hơn và mạch điện đơn giản.

+ Bảng X-Y: Bảng đồ thị điện dung đầu của các kích cỡ khác nhau có thể thay thế cho chuột máy tính như là một thiết bị đầu vào kết hợp với trục x-y. Thiết bị cảm ứng chạm như iPhone [38] thì có sẵn các thiết bị cảm ứng trục z và thiết bị hoạt tính đầu dò.

+ Dòng chảy mét: Nhiều loại đo lưu lượng chuyển đổi dòng chảy gây áp lực hoặc thay thế, sử dụng một lỗ cho lưu lượng dòng chảy hoặc Hiệu ứng Coriolis cho lưu lượng lớn. Sau đó các cảm biến điện dung có thể đo được sự dịch chuyển.

### ***1.3.3. Cảm biến độ ẩm***

Hằng số điện môi của không khí hoặc một số tài liệu bị ảnh hưởng bởi độ ẩm. Khi độ ẩm tăng, điện môi tăng. Các hằng số điện môi của không khí trong khí quyển, của một số chất khí, và nhiều vật liệu rắn có hàm lượng độ ẩm và nhiệt độ. Thiết bị độ ẩm điện dung dựa trên những thay đổi trong hằng số điện môi của vật liệu điện môi giữa các tấm của tụ điện. Cảm biến độ ẩm điện dung thường chứa các lớp oxit vô cơ ưa nước hoạt động như một chất cách điện [14]. Sự hấp thụ của các phân tử nước phân cực có tác động mạnh đến các hằng số điện môi của vật liệu. Độ lớn của hiệu ứng này tăng lên cùng với một bề mặt bên trong lớn mà có thể chứa một lượng lớn nước.



Hình 1.4. Cảm biến độ ẩm [49].

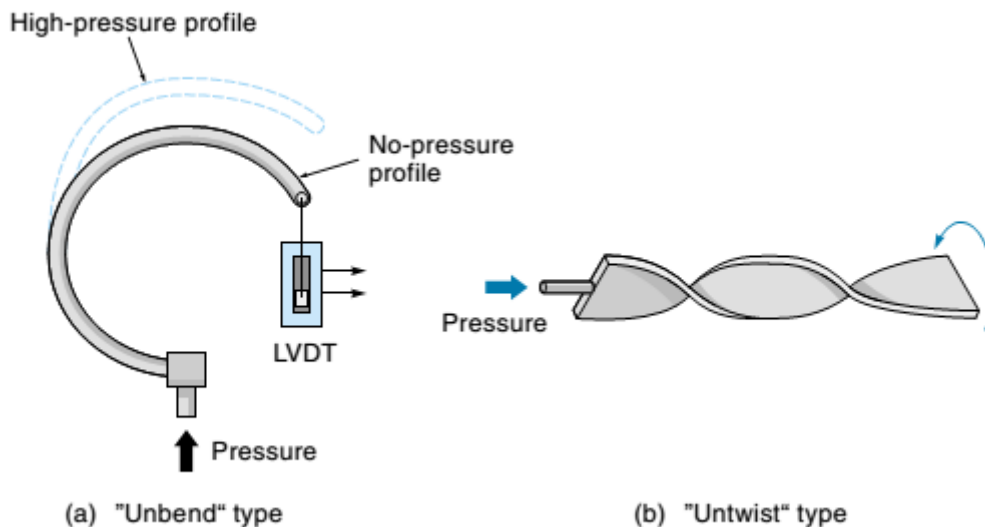
Khả năng của các bộ cảm biến độ ẩm điện dung hoạt động chính xác và đáng tin cậy kéo dài trên một phạm vi rộng của nhiệt độ và áp suất. Chúng còn có độ trễ thấp và có tính ổn định cao với các yêu cầu bảo trì tối thiểu. Những tính năng này làm cho cảm biến độ ẩm điện dung trở nên hữu hiệu cho nhiều điều kiện hoạt động cụ thể và lý tưởng thích hợp cho một hệ thống mà không chắc chắn trong các điều kiện không hiện diện tồn tại trong quá trình hoạt động. Nhiều loại cảm biến độ ẩm điện dung, mà chủ yếu được hình thành với nhôm, tantali, silic, và các loại polymer.

#### 1.3.4. Cảm biến áp suất

Một cảm biến áp suất đo lường áp suất, đặc biệt là áp suất của khí hoặc chất lỏng. Áp suất là một biểu hiện của các nguồn năng lượng cần thiết để ngăn chặn một chất lỏng khỏi hiện tượng bị nở ra, và thường được tính bằng áp lực trên một đơn vị diện tích. Một cảm biến áp suất thường đóng vai trò như một bộ chuyển đổi; nó tạo ra một tín hiệu như một chức năng của các áp lực được đặt vào. Cảm biến áp suất điện dung đang thay thế cảm biến áp suất áp điện do các yêu cầu công suất thấp hơn, phụ thuộc nhiệt độ ít hơn, và trôi dạt thấp hơn.

Cảm biến áp suất có thể được phân loại theo nhiều cách khác nhau:

- Theo hình dạng của cảm biến:



Hình 1.5. Một số loại cảm biến áp suất, (a) Loại duỗi thẳng, (b) Dạng xoắn [23].

- Phân loại dựa trên phạm vi áp lực mà họ đo lường, phạm vi nhiệt độ hoạt động, và quan trọng nhất là các loại áp lực chúng đo được. Cảm biến áp suất được đặt tên khác nhau theo mục đích của chúng, như sau:
  - + Cảm biến áp suất tuyệt đối: Đo lường áp lực tương đối so với môi trường chân không tuyệt đối.
  - + Cảm biến áp suất máy đo: đo áp suất tương đối so với áp suất khí quyển. Một máy đo áp suất lớp là một ví dụ về đo lường áp suất máy đo; khi nó chỉ vào vạch không, thì áp lực nó đo được là giống như các áp lực xung quanh.
  - + Cảm biến áp suất chân không: Đo lường áp suất dưới áp suất khí quyển, cho thấy sự khác biệt giữa các áp suất thấp và áp suất khí quyển (nghĩa là áp lực đo âm); hoặc các biện pháp áp thấp so với chân không tuyệt đối (nghĩa là áp suất tuyệt đối).
  - + Cảm biến áp suất vi sai: Đo lường sự khác nhau giữa hai áp suất, mỗi áp suất kết nối với mỗi bên của cảm biến. Cảm biến áp suất vi sai được sử dụng để đo nhiều hệ thống, chẳng hạn như áp suất giảm qua các bộ lọc dầu hoặc bộ lọc không khí, nồng độ chất lỏng (bằng cách so sánh các áp lực trên và dưới dạng lỏng) hoặc tốc độ dòng chảy (bằng cách đo sự thay đổi áp suất qua một hạn chế).
  - + Cảm biến áp suất kín: tương tự như một cảm biến áp suất máy đo ngoại trừ việc nó đo áp suất liên quan đến một số áp suất nhất định chứ không phải là áp suất khí quyển xung quanh (mà thay đổi tùy theo vị trí và thời tiết).

### ***1.3.5. Cảm biến độ nghiêng***

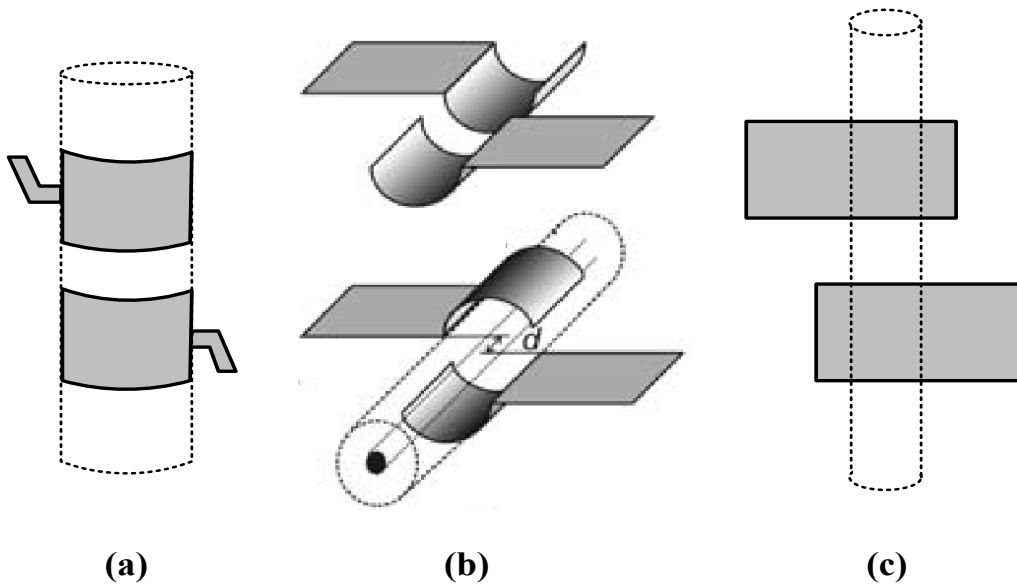
Trong những năm gần đây, gia tốc kế điện dung loại mini đang được phổ biến. Những gia tốc kế này sử dụng khối lượng kiểm chứng là một tấm của tụ điện và sử dụng tấm khác như là tấm cơ sở. Khi cảm biến được tăng tốc, khối lượng kiểm chứng có xu hướng di chuyển; do đó, điện áp của tụ điện thay đổi. Thay đổi điện áp này tương ứng với gia tốc. Gia tốc kế loại nhỏ đã được tìm ra để chúnng vào túi khí ô tô, hệ thống treo ô tô, hệ thống ổn định cho các thiết bị video, ghi âm số giao thông, và các hoạt động máy tạo nhịp đáp ứng [36].

Gia tốc kế điện dung silicon có sẵn trong một loạt các chi tiết kỹ thuật. Một cảm biến trọng lượng nhẹ điển hình sẽ có một dải tần số 0-1000 Hz, và một phạm vi hoạt động của gia tốc là  $\pm 2$  đến  $\pm 500$  g. Analogue Devices, Inc đã giới thiệu mạch gia tốc tích hợp với độ nhạy hơn 1,5 g. Với cảm biến này, các thiết bị có thể được sử dụng như một máy đo độ nghiêng.

## CHƯƠNG 2 CẤU TRÚC C<sup>4</sup>D VÀ PHƯƠNG PHÁP PHÁT HIỆN VẬT THỂ TRÊN KÊNH CHẤT LỎNG

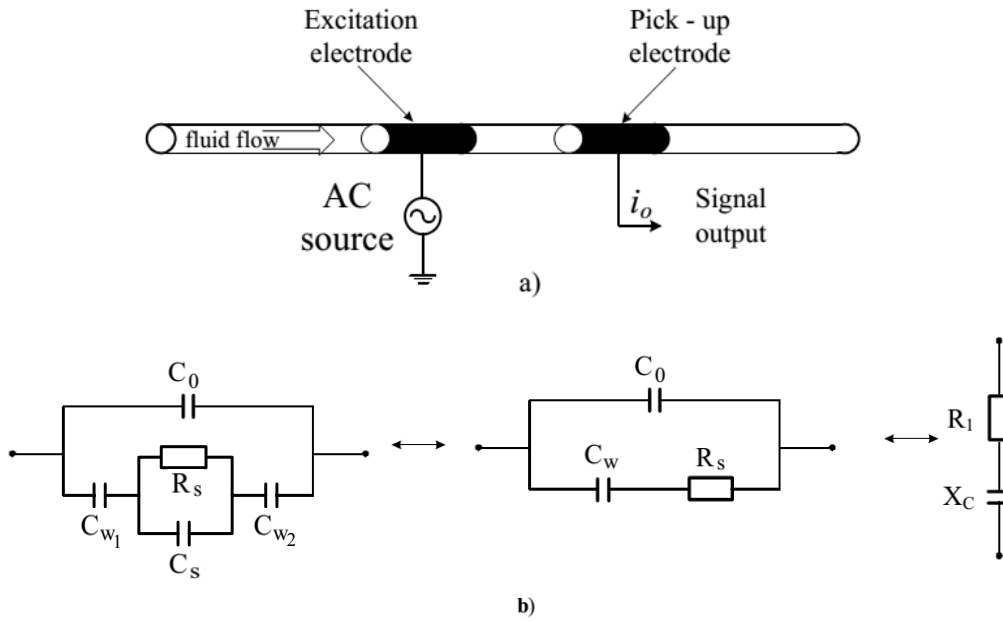
### 2.1. Nguyên tắc cơ bản của cấu trúc C<sup>4</sup>D

Hiện nay, C<sup>4</sup>D chủ yếu là nghiên cứu và áp dụng trong những nghiên cứu của BioMEMS để phát hiện nồng độ/độ dẫn điện trong kênh lỏng hoặc mao mạch [45]. Ví dụ điển hình của cấu trúc C<sup>4</sup>D được thể hiện trong hình 2.1. Ống và các điện cực bán ống (hình 2.1a, b) là cấu trúc phổ biến trong các ứng dụng về dòng chảy qua, sắc ký lỏng và điện dịch mao dẫn. Cấu trúc hình học phẳng (Hình 2.1c) rất hữu ích trong các hệ thống vi lỏng, chip điện, hoặc các hệ thống lab-on-chip.



Hình 2.1. Ví dụ về C<sup>4</sup>D những thiết kế sử dụng chủ yếu cho việc phát hiện vật thể [34].

Hình 2.2 (a) minh họa thiết kế của một bộ cảm biến thể lỏng C<sup>4</sup>D đơn, trong đó bao gồm hai điện cực. Một tín hiệu hình sin được áp dụng cho điện cực trái như là điện cực kích thích và thường ở dạng của một tín hiệu dòng xoay chiều. Cả hai điện cực ba lớp kênh lỏng tạo ra hai bản tụ qua lớp điện môi của vỏ của kênh ( $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$ ).



Hình 2.2. Thiết kế của một cấu trúc  $C^4D$  đơn: (a) điện cực kích thích và điện cực cảm biến; (b) Các mạch tương đương.

Một mạch điện đơn giản hóa tương đương của một cấu trúc  $C^4D$  đơn được thể hiện trong Hình 2.2 (b). Điện trở kháng của dung dịch dẫn điện bên trong kênh là  $R_s$  và điện dung giải pháp là  $C_s$ . Các tụ tường  $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$  phụ thuộc vào độ dày và hằng số điện môi của lớp điện môi và kích thước của điện cực. Hai điện cực này cũng khiến một điện dung  $C_0$  song song sinh ra dọc theo kênh lỏng. Các hiệu ứng ký sinh của điện dung rò đôi khi được loại bỏ bằng cách lấy bản cực nối đất [12, 24-26] hoặc đặt một bản giữa các điện cực [3, 12].

Các trở kháng của mạch tương đương điện đầu tiên có thể được tính toán như sau:

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.1)$$

trong đó,  $Z_1 = \frac{R_s \cdot (1/j\omega C_s)}{R_s + 1/j\omega C_s} + \frac{1}{j\omega C_{w1}} + \frac{1}{j\omega C_{w2}}$  là trở kháng của các nhánh phía dưới của mạch, và  $Z_2 = \frac{1}{j\omega C_0}$  là trở kháng xác định bởi điện dung rò  $C_0$ .

Bởi vì  $R_s$  cảm biến chủ yếu hoạt động như một máy dò độ dẫn điện, các hiệu ứng của điện dung dung dịch có thể được bỏ qua, và  $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$  được đơn giản hóa đến  $C_w$ . Các mẫu phân tích trở kháng từng phần,  $Z$  được xác định bởi phương trình quen thuộc:

$$Z = R_1 + jX_C = \frac{R_s C_w^2 \omega^2 - j[\omega(C_w + C_0) + R_s^2 C_w^2 C_0 \omega^3]}{(R_s C_w C_0 \omega^2)^2 + [\omega(C_w + C_0)]^2} \quad (2.2)$$

Với  $R_1$  và  $X_C$  là những thành phần thực và ảo của trở kháng của C<sup>4</sup>D,  $R_s$  là điện trở kháng, là tần số góc, với là tần số thông thường, và là đơn vị ảo tương ứng.

Khi một điện áp xoay chiều truyền động được áp dụng cho một C<sup>4</sup>D, dòng điện phát hiện tỷ lệ thuận với độ lớn của độ dẫn nạp được thể hiện như sau:

$$|Y| = \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}} = \sqrt{\frac{(C_0 + C_w)^2 \omega^2 G_s^2 + C_0^2 C_w^2 \omega^4 G_s^2}{G_s^2 + C_w^2 \omega^2}} \quad (2.3)$$

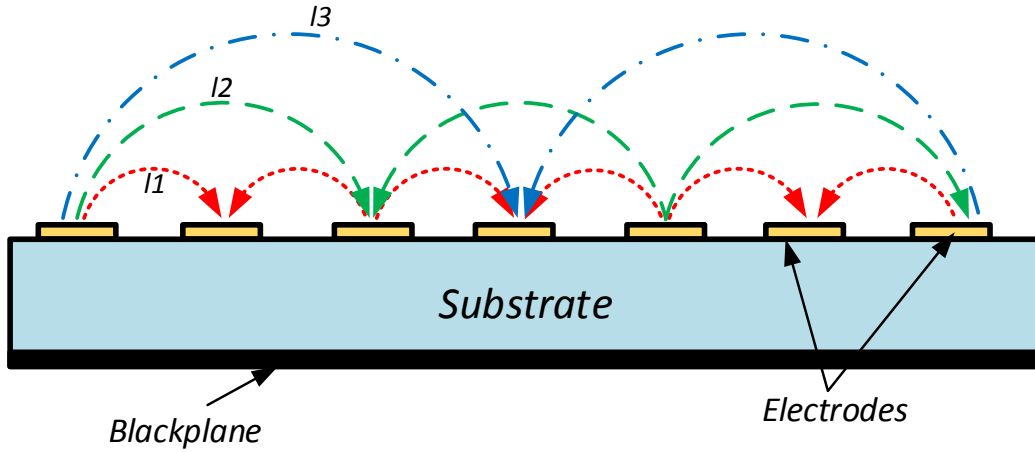
trong đó,  $G_s = 1/R_s$  là độ dẫn dung dịch. Có thể thấy rằng trong trường hợp dung dịch dẫn điện,  $G_s \square$  cao thì phương trình (2.3) có thể được đơn giản hóa như sau:

$$|Y| = \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}} = \sqrt{\frac{(C_0 + C_w)^2 \omega^2 G_s^2 + C_0^2 C_w^2 \omega^4 G_s^2}{G_s^2 + C_w^2 \omega^2}} \quad (2.4)$$

Trong trường hợp này chúng ta có thể bỏ qua  $G_s$ . Do đó, phương trình (2.4) cho thấy rằng giá trị chủ yếu phụ thuộc vào giá trị của điện dung tương và điện dung rò ở một tần số cụ thể. Để tăng độ nhạy của phép đo, giá trị của  $R_s$  trở kháng và điện dung tương  $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$  phải ở cùng cấp tương đương với nhau. Điều này có thể được thực hiện bằng cách tăng  $R_s$  hoặc giảm. Tuy nhiên, trong dung dịch dẫn điện cao,  $R_s$  có thể không tăng và  $G_s$  không thể giảm. Do đó, phải giảm đi bằng cách làm cho khoảng cách giữa hai điện cực trở nên dài hơn, hoặc tăng  $C_w$  bằng cách tăng chiều dài của điện cực.

Hình 2.4 cho thấy giao diện bên trong một cảm biến tụ phẳng cho thấy cách điện trường được hình thành giữa các điện cực dương và âm. Vàng (Au) được sử dụng rộng rãi như các điện cực cảm biến cho các ứng dụng y sinh học do có tính tương thích sinh học. Vàng cũng là một chất dẫn điện tử tốt hơn nhiều so với nhôm, đồng hoặc thậm chí bạc. Điều này đã được xác định và bề mặt dẫn điện của vàng có thể là lý tưởng cho nhiều ứng dụng cảm ứng sinh học bao gồm giám sát sự tăng trưởng của vi khuẩn, phát hiện virus, và phát hiện DNA. Các lớp vàng dễ dàng có thể được chế tạo bằng công nghệ in thạch bản thương mại có sẵn trên chip CMOS sử dụng phương pháp vi cơ tương thích ở nhiệt độ thấp.

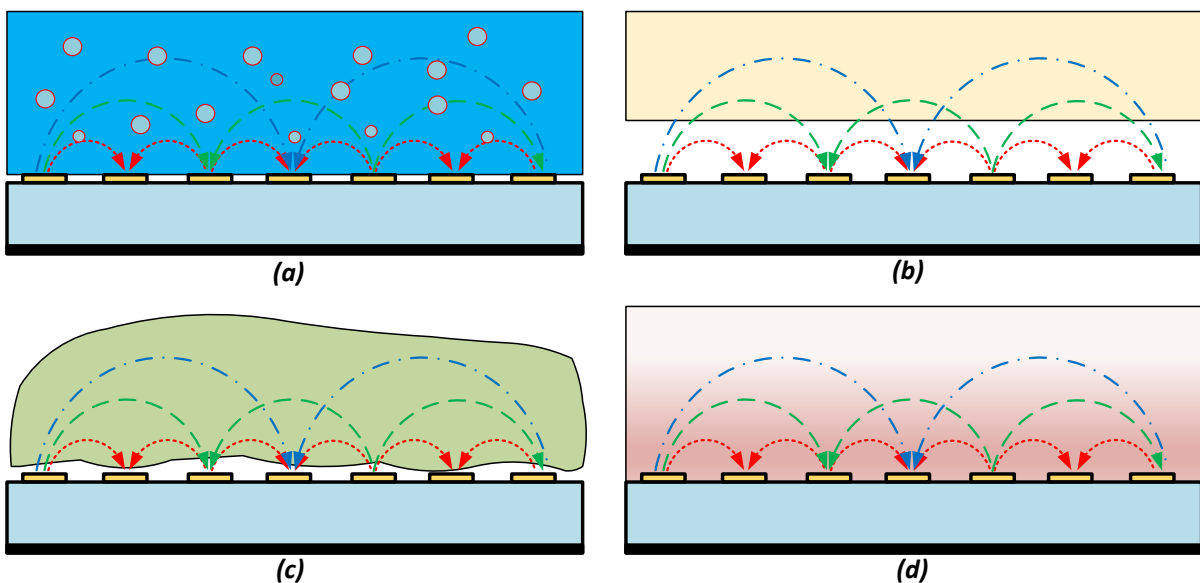




Hình 2.3. Trường điện được hình thành giữa các điện cực âm và dương với độ dài rãnh khác nhau ( $l_1$ ,  $l_2$  và  $l_3$ ) [30].

Nó được thể hiện rõ ràng trong Hình. 2.3 rằng độ sâu thâm nhập của các đường sức điện trường là khác nhau đối với chiều dài rãnh khác nhau. Chiều dài rãnh của các cảm biến điện dung thông thường là khoảng cách giữa hai điện cực liên tiếp của cùng cực. Cũng trong Hình. 2.3, có ba chiều dài rãnh ( $l_1$ ,  $l_2$  và  $l_3$ ) cho thấy độ sâu thâm nhập khác nhau tương ứng với các chiều dài rãnh của bộ cảm biến. Độ sâu thâm nhập có thể được tăng lên bằng cách tăng chiều dài rãnh, nhưng cường độ điện trường tạo ra ở các điện cực lân cận sẽ bị yếu. Cảm biến điện dung phẳng có thể được sử dụng cho các ứng dụng cảm biến khác nhau.

Hình 2.5 minh họa về khả năng cảm biến của cảm biến điện dung phẳng. Những khả năng cảm nhận cho đặc trưng khác nhau của mẫu đã cho chúng tôi cơ hội để thiết kế và chế tạo loại mới của cảm biến điện dung phẳng.



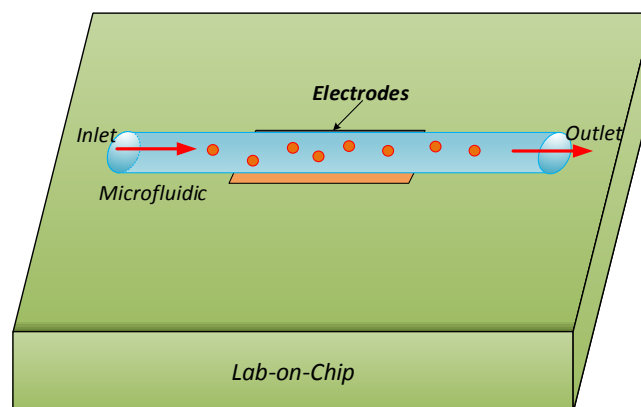
Hình 2.4. Khả năng cảm biến phát hiện đặc điểm khác nhau của mẫu [30]: (a) Mật độ cảm biến, (b) Khoảng cách cảm biến, (c) kết cấu cảm biến, (d) độ ẩm cảm biến.

Các cảm biến điện dung thông thường làm việc thường dựa vào sự thay đổi các tham số trong cấu trúc tụ, mà kết quả trong việc thay đổi điện dung của nó. Có nhiều cấu trúc cảm biến điện dung phát triển dựa trên hai cấu trúc điện cực song song. Trong chế tạo vi mô, cấu trúc cảm biến điện dung là cấu trúc chủ yếu là đồng phẳng. Điện dung của hai song song, đồng phẳng và bán vô hạn đĩa dẫn điện cách nhau bởi một khoảng cách khoảng cách của  $2a$  được nhúng vào trong một môi trường điện môi đồng nhất của hằng số điện môi  $\epsilon_r$  là:

$$C = \frac{2\epsilon_0\epsilon_r l}{\pi} \ln \left[ \left( 1 + \frac{w}{a} \right) + \sqrt{\left( 1 + \frac{w}{a} \right)^2 - 1} \right] \quad (2.5)$$

Trường  $\epsilon_0$  là hằng số điện môi chân không,  $l$  và  $w$  là chiều dài và chiều rộng của các cặp điện cực tương ứng [43]. Gần đây, hầu hết các cảm biến điện dung thể lỏng dựa trên cơ chế: một sự thay đổi của điện dung gây ra bởi sự thay đổi của hằng số điện môi và tính dẫn điện của vật liệu giữa các điện cực, có thể được gây ra bởi một sự thay đổi trong kênh chất lỏng. Các điện môi là khác nhau cho mỗi chất liệu hoặc các chất lỏng khác nhau. Do đó, sự thay đổi của vật liệu bên trong kênh có thể dẫn đến sự thay đổi của điện dung của cảm biến. Do đó, một đối tượng trong một dòng chảy chất lỏng đồng nhất có thể dễ dàng phát hiện

Đến nay, một số kỹ thuật hiển thị điện dung với độ phức tạp khác nhau được báo cáo cho các hệ thống tự cảm biến điện dung dựa trên MEMS (MBCS) nhưng có một tài liệu cơ sở ít được công bố trên thiết kế tùy chỉnh của một bộ cảm biến điện dung trên chip cho các ứng dụng LoC. Các điện cực cảm biến này thường được thực hiện trên cùng một chip của mạch giao diện điện dung và một vi kênh chất lỏng được sử dụng để chỉ đạo các chất lỏng sinh học đối với mạng lưới các cảm biến như trong Hình 2.5. Tuy nhiên, một số phương pháp tạo mẫu nhanh đã cũ đã được báo cáo để phát hiện các hạt sinh học thông qua các cảm biến điện dung tạo ra ở giữa một điện cực trên chip và một điện cực giữa chip và một điện cực nổi đất trên chip.

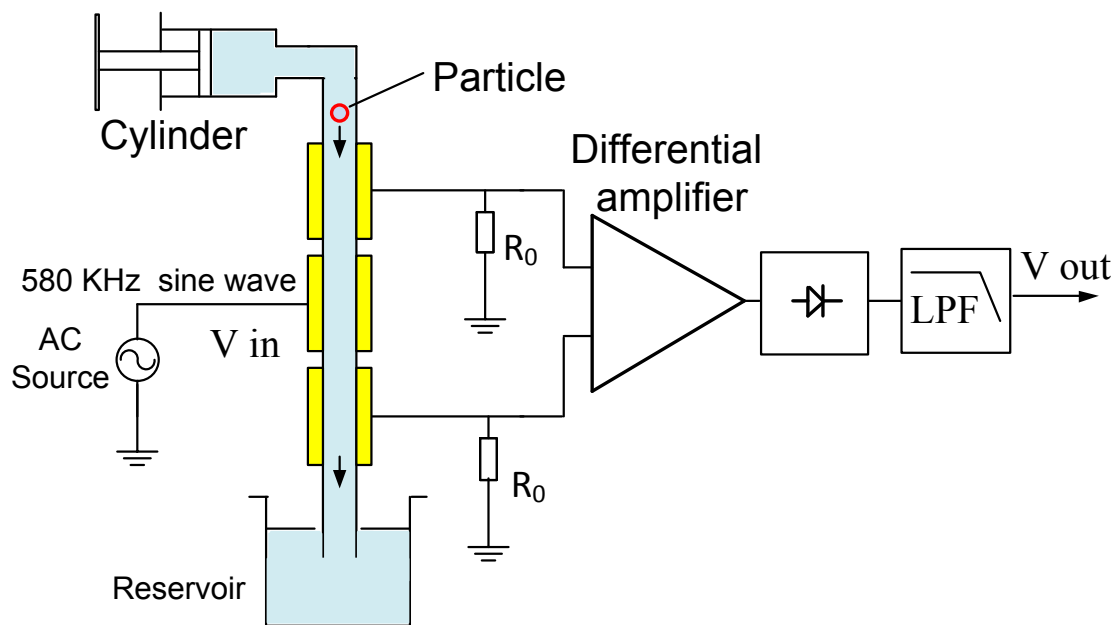


Hình 2.5. Một sơ đồ đơn giản của cảm biến điện dung dựa theo LoC [8].

Một loạt các cảm biến điện dung trên-chip đã được chế tạo cho nhiều ứng dụng sinh học và hóa học, bao gồm phát hiện DNA, kháng thể kháng nguyên, giám sát di động, phát hiện dung môi, theo dõi tăng trưởng vi khuẩn, phát hiện lớp polyelectrolyte siêu mỏng và phát hiện các cấu tạo protein, khí hóa chất độc hại.

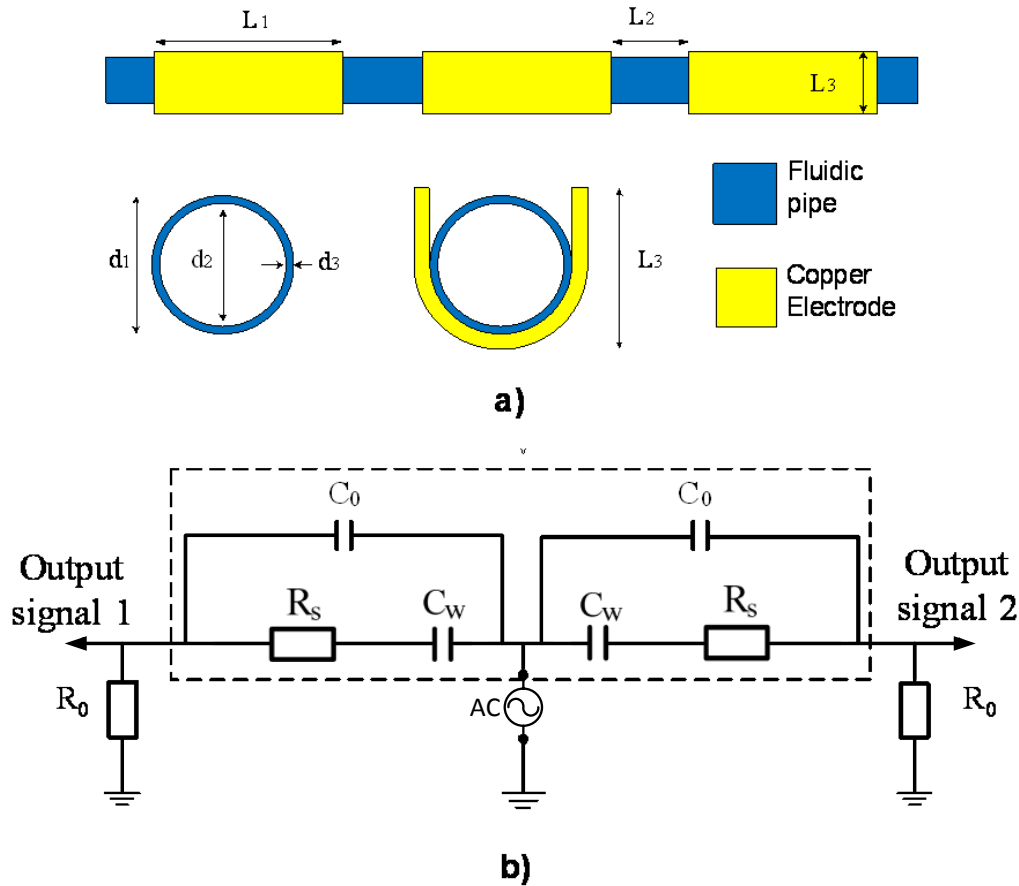
## 2.2. Thiết kế và vận hành cảm biến $DC^4D$ thông thường

Hình 3.1 cho thấy một của bộ cảm biến thể lỏng  $DC^4D$  dựa trên ba điện cực để phát hiện các hạt bên trong kênh lỏng cả ở dẫn điện và không dẫn điện. Cảm biến này là tương đương với hai cấu trúc  $C^4D$  đơn với một sóng mang hình Sin ứng dụng vào điện cực trung thiết kế sơ đồ khối tâm như các điện cực kích thích. Các tín hiệu khác biệt giữa các điện cực trên và dưới sau đó được khuếch đại và giải điều chế để loại bỏ các thành phần sóng mang. Các tín hiệu đầu ra chỉ ra những phản ứng khác nhau giữa hai cấu trúc  $C^4D$  đơn. Cảm biến được nêu ra này có thể phát hiện một hạt giống như hạt nhựa, bọt khí, hạt kim loại bên trong kênh khi nó chạy qua các điện cực.



Hình 2.6. Sơ đồ khối thiết kế của bộ cảm biến  $DC^4D$ [19].

Trong thiết kế này, có hai điện cực cảm biến đều là các điện cực bên ngoài. Điện cực trung tâm là điện cực kích thích (xem Hình 2.7). Các tín hiệu vi sai giữa hai điện cực cảm biến chỉ ra thay đổi trong kênh chất lỏng.



Hình 2.7. (a) Các DC<sup>4</sup>D dựa trên cấu hình ba điện cực; (b) Các sơ đồ tương đương[19].

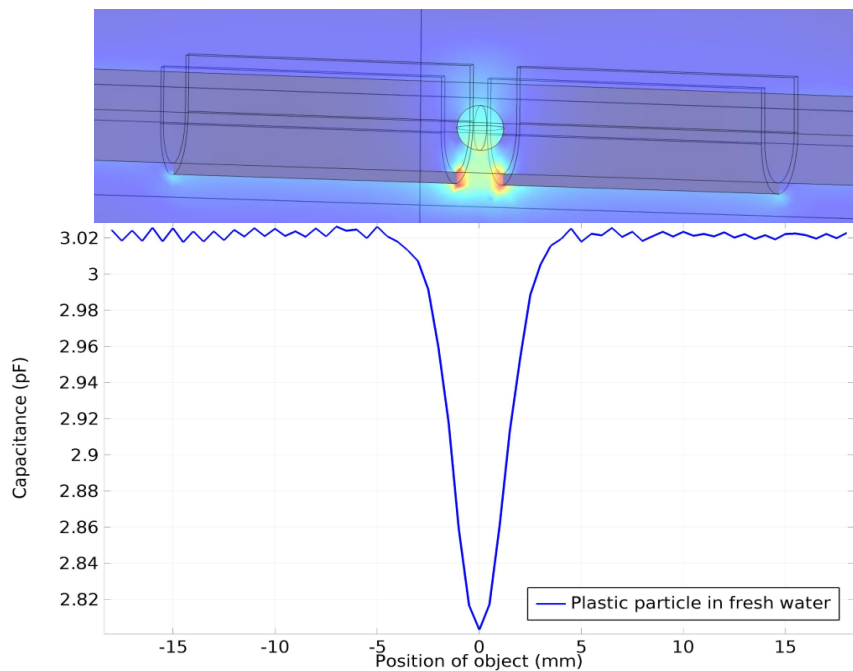
Khoảng cách giữa hai điện cực là  $L_2$  để làm một vật gọi là tụ phẳng tại điểm này.  $L_1$  và  $L_3$  là chiều dài và chiều cao của mỗi điện cực tương ứng. Các hình chữ U tổ chức chặt chẽ các kênh lỏng cùng các cảm biến. Hình chữ U được đề xuất tạo điều kiện để thiết lập và có thể được sử dụng cho các kích thước khác nhau của kênh lỏng. Một ống dẫn có đường kính  $d_1$  được đặt bên trong ba điện cực như thể hiện trong Hình 2.7 (a). Hệ thống được mô hình hóa, mô phỏng và chế tạo với một số thông số cần thiết. Các thông số hình học của DC<sup>4</sup>D được liệt kê trong Bảng 2.1. Hình 2.7 (b) cho thấy các mạch tương đương của cảm biến.  $R_s$  và  $C_w$  là sự kháng của dung dịch dẫn điện và tường điện dung tương ứng với mỗi đoạn C<sup>4</sup>D đơn.  $C_0$  là điện dung rò giữa hai điện cực liền kề. Cấu trúc DC<sup>4</sup>D này làm giảm ảnh hưởng của nhiễu thông thường bên trong các kênh lỏng và bộ khuếch đại các tín hiệu khác biệt giữa hai cấu trúc C<sup>4</sup>D đơn [19].

Thông số	Giá trị (mm)
Đường kính ống xả (d1)	4
Đường kính ống hút (d2)	3,6
Độ dày của ống (d3)	0,2
Độ rộng điện cực (L1)	12
Khoảng cách giữa hai điện cực (L2)	2
Độ cao điện cực (L3)	5

Bảng 2.1. Các thông số hình học của cấu trúc DC<sup>4</sup>D

### 2.3. Nguyên lý hoạt động cảm biến C<sup>4</sup>D phát hiện vật thể trong kênh chất lỏng

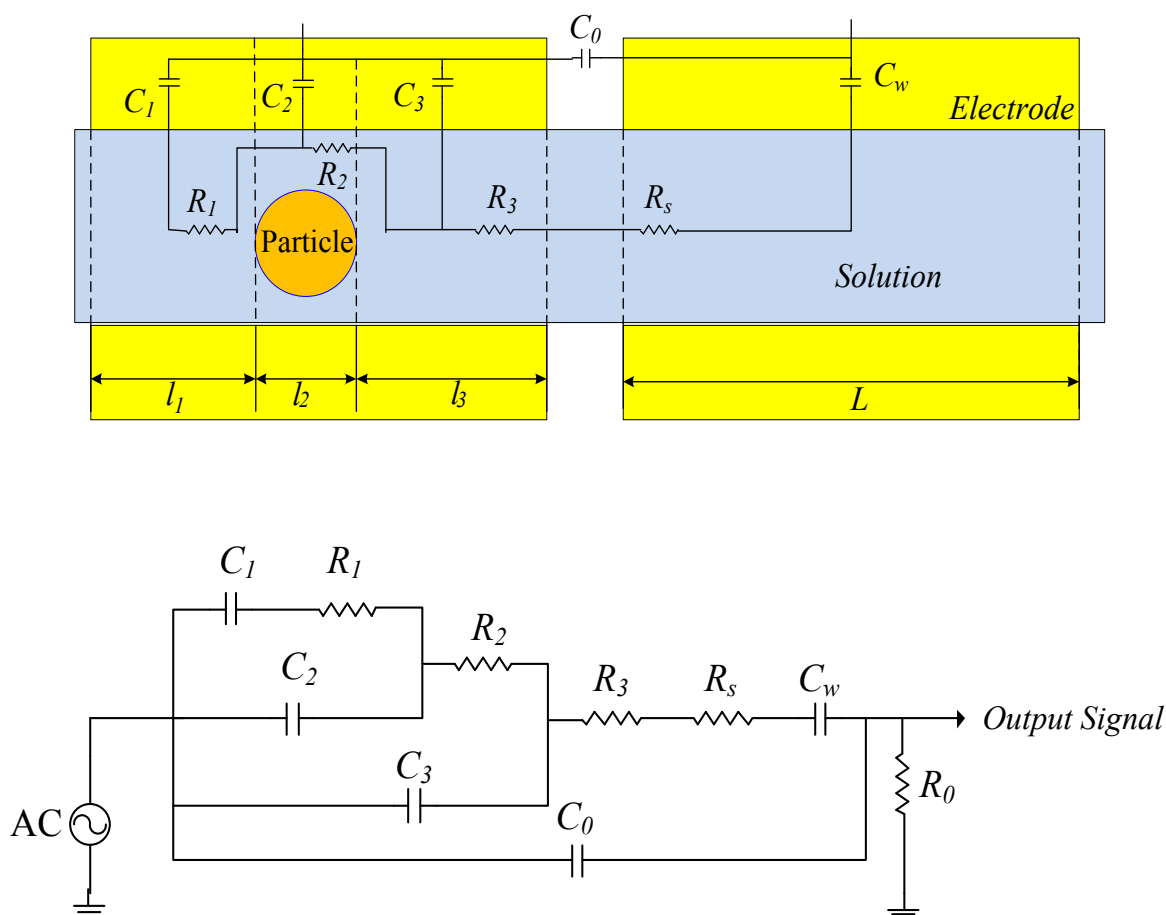
Hình 2.8 cho thấy sự phân bố của tĩnh điện bên trong tụ cảm biến bên trong trường hợp một hạt nhựa đường kính 2mm ở trung tâm của cấu trúc đơn. Hình 2.8 cũng cho thấy kết quả mô phỏng điện dung giữa điện cực kích thích và điện cực cảm biến của một cấu trúc C<sup>4</sup>D đơn khi các hạt chuyển động qua các cảm biến. Thể tích của hạt nhựa xấp xỉ 4,18  $\mu\text{l}$ . Ta có thể thấy rằng sự thay đổi điện dung tối đa đạt nằm giữa hai điện cực. Hơn nữa, điện dung thay đổi lên đến 200 fF khi hạt nhựa có khối lượng là 4,18  $\mu\text{l}$  [19]. Hạt chuyển động trong kênh nước là một chất lỏng không dẫn điện.



Hình 2.8. Sự thay đổi điện dung ngược với vị trí các hạt bên trong cấu trúc C<sup>4</sup>D đơn [19].

Bên cạnh đó, việc này cũng mô phỏng sự thay đổi điện dung khi sự khác nhau của các hạt thể hiện ở các điện cực trong các kênh lỏng không dẫn điện khác, chẳng hạn tương ứng với hạt thối và bọt khí bên trong kênh dầu. Hơn nữa, các hạt có kích thước khác nhau và vị trí để bên trong các cảm biến điện dung thể lỏng được mô hình hóa để đọc ra các điện dung của bộ cảm biến.

Khi độ dẫn của các dung dịch bên trong kênh dẫn là đủ cao ( $\sigma > 0.1 \text{ S/m}$ ), ảnh hưởng của điện dung bên trong điện cực hình chữ U trong trở kháng tổng là nhỏ, dung kháng trong phương trình tương đương là chủ yếu phụ thuộc vào điện dung rò giữa mỗi cặp điện cực của cấu trúc đơn (xem Hình 2.9). Tuy nhiên,  $C_0$  là tham số không thay đổi, do đó, các yếu tố cảm biến chính là độ dẫn điện của chất lỏng do mặt cắt ngang của sự thay đổi dòng chảy chất lỏng khi hạt chuyển động. Mạch tương đương của cấu hình này được thể hiện trong hình 2.9. Trong luận văn này, các hạt di chuyển bên trong dung dịch NaCl có nồng độ khác nhau được điều tra. Các điện dung  $C_w$  được tạo ra bởi các vỏ của ống.  $R_s$  là điện trở của dung dịch giữa hai điện.



Hình 2.9. Mạch tương đương của bộ cảm biến thể lỏng  $DC^4D$  [19].

Hạt điều tra được giả định như hình cầu với đường kính của  $l_2$ .  $L$  là chiều dài của các điện cực. Khi hạt bên trong điện cực hình chữ U kênh có thể được chia thành ba

phần tương ứng với L1, L2, L3 và khu vực (xem Hình 2.9). Phần đầu tiên (L1) và phần thứ ba (L3) chỉ chứa dung dịch muối. Phần thứ hai (L2) chứa dung dịch muối với hạt nhựa trong đó. Các tụ điện tương ứng cũng có thể được chia thành ba thành phần  $C_1$ ,  $C_2$  và  $C_3$  như thể hiện trong hình 2.9.

Các điện dung tương và điện dung rò được chiết xuất từ các kết quả mô phỏng khi không có hạt bên trong kênh.

Các dung dịch và tổng trở kháng của bộ cảm biến thể lỏng DC<sup>4</sup>D được cho bởi:

$$Z_{solution} = R_3 + R_s - \frac{i}{C_w \omega} + \frac{A}{B};$$

$$A = i - [C_2 R_2 + C_1 (R_1 + R_2)] \omega - i C_1 C_2 R_1 R_2 \omega^2;$$

$$B = -(C_1 + C_2 + C_3) \omega - i [C_1 R_1 (C_2 + C_3) + (C_1 + C_2) C_3 R_2] \omega^2 + C_1 C_2 C_3 R_1 R_2 \omega^3.$$
(2.6)

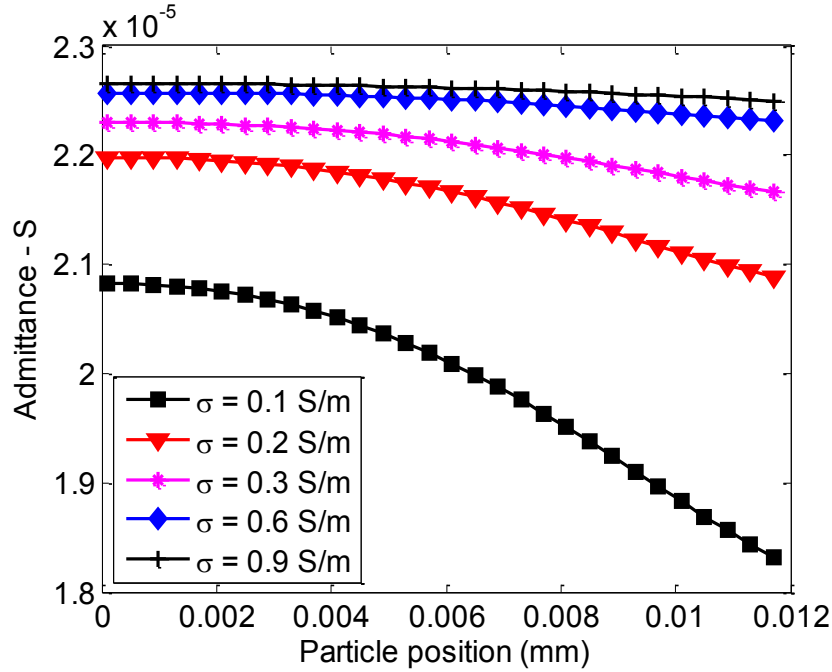
$$Z_{total} = \frac{Z_{solution} Z_{C_0}}{Z_{solution} + Z_{C_0}} + R_0;$$
(2.7)

Với thành phần của điện trở và điện dung được tính như sau:

$$R_1 = \frac{1}{\sigma_{sol}} \frac{l_1}{\pi R^2}; R_2 = \frac{1}{\sigma_{sol}} \frac{l_2}{\pi R^2 - l_2}; R_3 = \frac{1}{\sigma_{sol}} \frac{l_3}{\pi R^2}; R_s = \frac{1}{\sigma_{sol}} \frac{L}{\pi R^2};$$

$$C_1 = \frac{l_1}{L} C_w; C_2 = \frac{l_2}{L} C_w; C_3 = \frac{l_3}{L} C_w.$$

Hình 2.10 cho thấy sự thay đổi độ dẫn nạp của một C<sup>4</sup>D đơn khi một hạt nhựa chuyển động qua điện cực bên trong dung dịch muối với nhiều nồng độ. Hình 2.10 cũng cho thấy rằng các dẫn nạp của một C<sup>4</sup>D tăng khi độ dẫn dẫn  $\sigma$  của chất lỏng giảm.

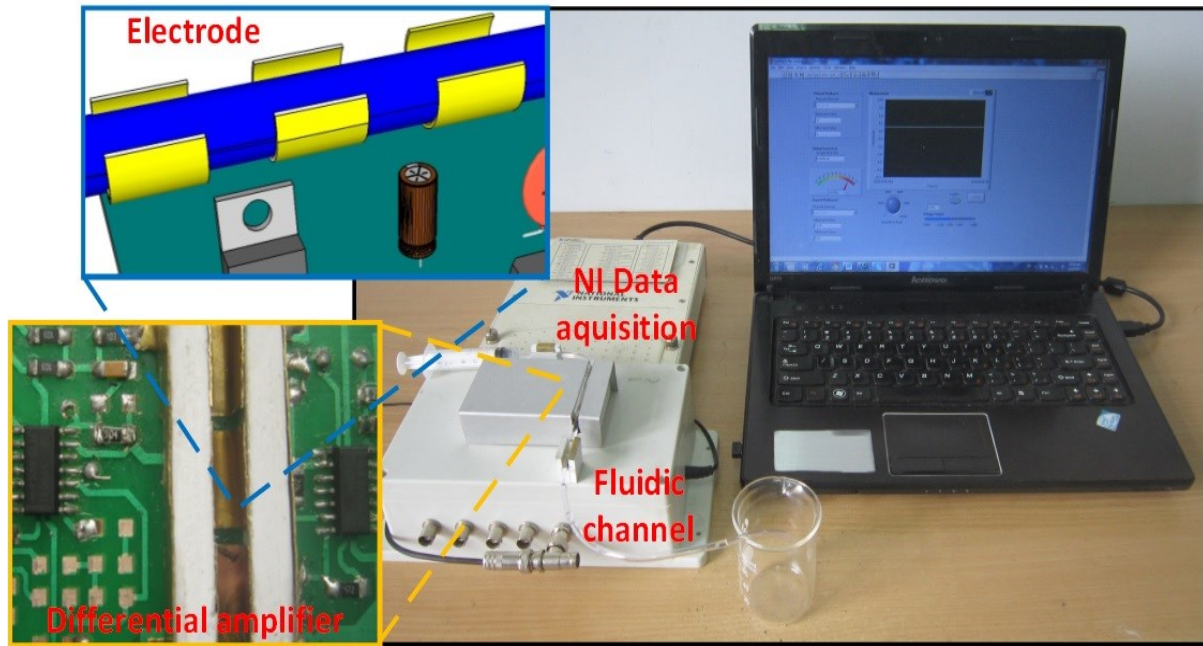


Hình 2.10. Độ dẫn nạp của cấu trúc  $C^4D$  đơn khi một hạt di chuyển bên trong điện cực [19].

#### 2.4. Thiết lập hệ thống và đo lường

Các điện cực chữ U này được gắn trực tiếp trên PCB với bộ khuếch đại được thiết lập chuyên biệt và mạch xử lý tín hiệu để giảm các thành phần ký sinh trùng và tiếng ồn thông thường. Sau đó, ống nhựa được đặt bên trong điện cực chữ U. Các thông số của cảm biến này sẽ được trình bày trong Bảng 2.1. Hình 2.11 cho thấy hình ảnh thiết lập đo lường của cảm biến thể lỏng  $DC^4D$ . Trong luận án này, một tín hiệu hình sin với cường độ 3V và tần số 580 kHz được áp dụng cho các điện cực kích thích. Hai điện áp của điện cực cảm biến là tín hiệu đầu vào của một bộ khuếch đại chuyên biệt, giải điều chế, và mạch qua bộ lọc thấp. Điện áp đầu ra được phản hồi lại với máy tính bằng cách sử dụng một thẻ thu nhận dữ liệu NI và sau đó được xử lý bằng cách sử dụng phần mềm LabVIEW.





Hình 2.11. Sự thay đổi điện dung trái ngược với vị trí các hạt bên trong cấu trúc  $C^4D$  đơn[19].

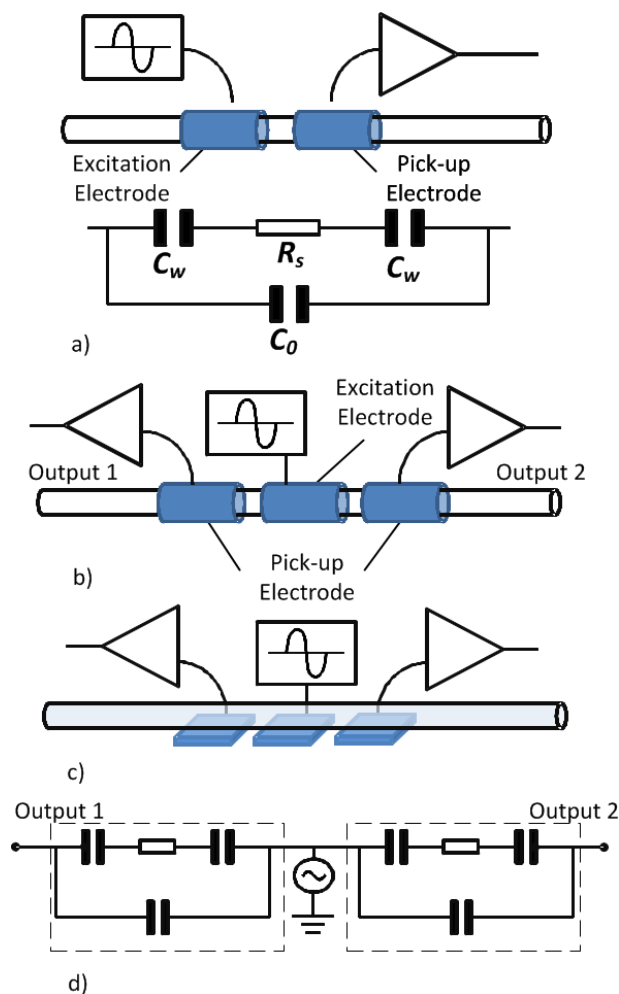
Hạt nhựa và thiếc các hạt có kích cỡ khác nhau được trộn lẫn bên trong buồng chất lỏng trước khi bơm vào kênh cho đặc trưng của phản ứng đầu ra của cảm biến khi một thập hạt. Một T-connector, được cấu hình của hai cửa hút gió của điều tra kênh lỏng và không khí và một ổ cắm, được sử dụng để thêm một bong bóng khí bên trong kênh lỏng. Thể tích của các bọt khí có thể được thay đổi bằng cách kiểm soát thời gian mở của van nạp không khí và tốc độ của ống tiêm bơm chất lỏng.

## CHƯƠNG 3 CẢM BIẾN TỤ PHẪNG VỚI VI KÊNH CHẤT LỎNG

### 3.1. Cơ sở lý thuyết

Như đã nghiên cứu ở chương 2, nguyên lý làm việc của cảm biến phát hiện dẫn điện không tiếp xúc ghép điện dung được dựa trên kỹ thuật phát hiện sự dẫn điện. Một  $C^4D$  thông thường được trình bày trong Hình 2.a. Cấu trúc này bao gồm hai điện cực, được phân cách bởi một khoảng cách, tách biệt với dòng dịch điện phân. Một điện áp AC được kết nối với một trong các điện cực và dòng đầu ra AC có thể được đo tại các điện cực thứ hai.

Cấu trúc bao gồm các điện cực, lớp cách điện và điện giải, tạo thành tụ điện rõ ràng cho tín hiệu AC. Bởi vì sự xuất hiện của lớp cách điện trong cấu trúc không tiếp xúc, điện dung thấp hơn so với cấu trúc tiếp xúc trực tiếp. Do đó, tần số áp dụng phải cao hơn đối với việc vận hành của cấu trúc không tiếp xúc.

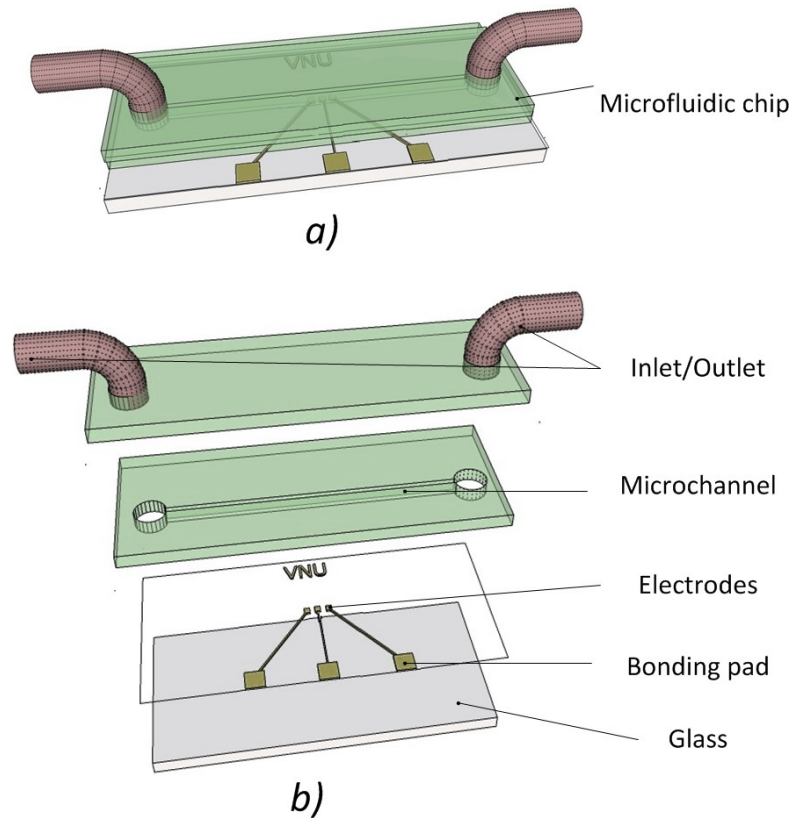


Hình 3.1. Bản vẽ sơ đồ mạch và mạch điện tương đương với: a) Cấu trúc  $C^4D$  thường; b,c,d) Cấu trúc  $C^4D$  vi sai [21].

Các mạch điện tương đương với một bộ cảm biến  $C^4D$  thông thường bao gồm các thành phần chính sau đây (Hình 3.1a): điện trở của chất lỏng ( $R_s$ ), điện dung liên quan đến điện môi của lớp cách điện giữa các điện cực và chất điện phân ( $C_w$ ), điện dung hình thành bởi các khớp nối điện dung trực tiếp giữa các điện cực (điện dung phân tán:  $C_0$ ). Hai  $C_w$  được nối nối tiếp với  $R_s$ , và sau đó mạch nối tiếp này được nối song song với tụ phân tán  $C_0$ .  $R_s$  đóng một vai trò rất quan trọng trong kỹ thuật phát hiện dẫn điện này và đã luôn luôn được xem xét trong mô hình mạch điện tương đương [27, 50, 51]. Điện dung phân tán ( $C_0$ ) bị ảnh hưởng bởi những nguyên nhân khác nhau và cũng ảnh hưởng đáng kể đến độ nhạy của đầu ra của các cấu trúc  $C^4D$ , ngay cả khi có sự xuất hiện của lá chắn Faraday trong máy dò [50, 52]. Cấu trúc  $C^4D$  vi sai ( $DC^4D$ ) được đề xuất như trong Hình 3.1b để tránh những hạn chế nêu trên và tăng cường độ nhạy của cơ cấu  $C^4D$  thông thường. Thiết kế của  $DC^4D$  bao gồm hai  $C^4D$  duy nhất với một sóng mang hình sin áp dụng vào điện cực trung tâm như là điện cực kích thích.

Sự khác biệt của vật liệu giữa hai cặp điện cực dẫn tới sự khác nhau về trở kháng giữa hai tụ điện, sau đó là sự khác biệt giữa hai tín hiệu đầu ra. Các tín hiệu đầu ra từ hai điện cực cảm biến được khuếch đại và sau đó giải điều chế để loại bỏ các thành phần sóng mang. Các tín hiệu đầu ra của hệ thống  $C^4D$  toàn bộ trình bày các đáp ứng khác nhau giữa hai cấu trúc  $C^4D$  đơn. Do đó, nền tảng này có thể có được độ nhạy cao ngay cả trong trường hợp phát hiện đối tượng cỡ micro mét.

Trong luận văn, tác giả trình bày một thiết kế với vi kênh chất lỏng cho việc phát hiện hạt ở mức micro. Cảm biến này được cấu tạo từ ba bản vi điện cực, 1 lớp bảo vệ  $SiO_2$  mỏng ở trên mặt. Các điện cực được làm từ vàng, đặt cạnh nhau trên một mặt phẳng, cách nhau một khoảng nhỏ. Các thành phần được chế tạo trên một tấm wafer thủy tinh. Vi kênh dẫn chất lỏng được chế tạo từ PDMS (Polydimethylsiloxane). Cấu trúc này có khả năng phát hiện các vật thể nhỏ với độ nhạy cao.



Hình 3.2. Cấu trúc được đề xuất: a) Cấu tạo tổng thể; b) Các lớp của cảm biến với cấu trúc  $C^4D$ [21].

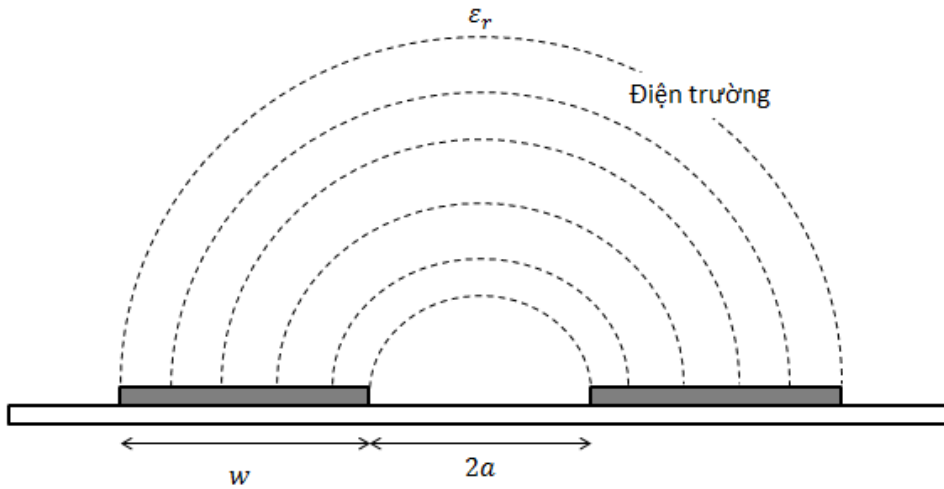
Khi một vi vật thể (bọt khí, hạt thiếc, tế bào) trong vi kênh lỏng đi qua vùng điện trường của tụ, điện dung giữa hai cặp điện cực sẽ bị mất cân bằng và tạo ra sự thay đổi trong tín hiệu đầu ra.

### 3.2. Nghiên cứu thiết kế cảm biến tụ phẳng

Trong luận văn này, một cảm biến tụ phẳng dựa theo cấu trúc  $DC^4D$  đề xuất bao gồm ba vi điện cực vuông và nó được sử dụng để gắn vào các kênh vi lỏng để phát hiện các đối tượng bên trong kênh. Hình 3.2 cho thấy cấu trúc đề xuất được phát triển dựa trên chất nền thủy tinh với một lớp kim loại, lớp bảo vệ lớp kênh và đầu vào, lớp đầu ra bao phủ phần đầu của cấu trúc. Ở quy mô thường, các điện cực có nhiều hình dạng và bố trí sắp xếp giống như kiểu sắp xếp theo trục và theo hình chữ U [1, 10, 19, 26, 44]. Tuy nhiên, tại quy mô nhỏ hơn, do có sự phức tạp trong chế tạo, cấu trúc cảm biến điện dung chủ yếu là cấu trúc đồng phẳng. Cấu trúc 3 điện cực được đề xuất được chế tạo trên mặt kính có thể hình thành hai tụ điện phẳng giống y hệt nhau. Mô hình phân tích cho cấu trúc cảm biến điện dung đồng phẳng được trình bày bởi Chen và các cộng sự của ông [53]. Bằng cách áp dụng các kỹ thuật ánh xạ bảo giác sử dụng chuyển đổi đảo nghịch cosine, điện dung của hai tấm dẫn điện đồng phẳng và song song nhau trong miền nửa vô hạn được đưa ra bởi:

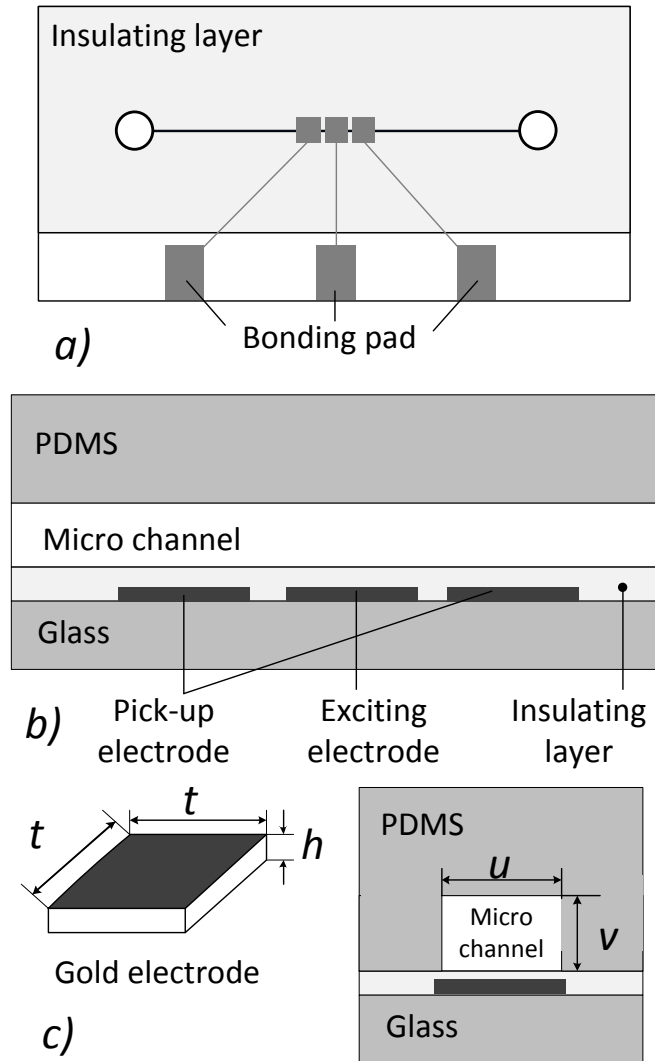
$$C = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\pi} \ln \left[ \left(1 + \frac{w}{a}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{w}{a}\right)^2 - 1} \right] \quad (3.1)$$

Trong đó  $\varepsilon_0$  hằng số điện môi chân không,  $\varepsilon_r$  hằng số điện môi của môi trường điện môi đồng nhất,  $w$  là độ rộng của điện cực,  $a$  một nửa khoảng cách giữa các điện cực và  $l$  là chiều rộng của một cặp điện cực (Hình 3.3). Mặc dù phương trình này có nguồn gốc giả định là  $w/a \gg 1$ , thì nó vẫn có mức xấp xỉ khả quan khi  $w \approx a$ . [54]



Hình 3.3. Mô hình tụ đồng phẳng.

Một cảm biến thể lỏng điện dung loại  $\varepsilon$  là cấu trúc hoạt động dựa trên sự thay đổi của điện dung tương ứng với sự thay đổi của hằng số điện môi hoặc dẫn suất chất lỏng giữa các điện cực. Tầng loại chất liệu cũng như tầng loại chất lỏng đều có một hằng số điện môi khác nhau. Vì vậy, điện dung cảm biến có thể bị thay đổi tương ứng với sự xuất hiện của các vật liệu khác nhau hoặc các vật thể lạ trong liên kết đồng nhất giữa các điện cực.



Hình 3.4. Mô tả cấu trúc của chip cảm biến tụ phẳng: a) Mặt bên trên; b) Mặt cắt ngang; c) Kích thước của các vi điện cực và vi kênh [21].

Nghiên cứu tập trung vào cấu trúc điện dung khác biệt giữa hai cặp điện cực trong cùng một kênh. Cấu trúc vi sai có thể tránh được sự hạn chế của cấu trúc  $C^4D$  thông thường và nâng cao độ nhạy của hệ thống. Trong thiết kế được đề xuất, các điện cực, dây dẫn và liên kết pad được chế tạo trên mặt kính trong khi các vi kênh được chế tạo trên PDMS (Polydimethylsiloxane). Điện cực và dây dẫn điện được phủ một lớp  $SiO_2$  mỏng để cô lập các phần kim loại từ các chất lỏng điện phân.

Để phân tích các nguyên lý làm việc của thiết kế được đề xuất, một mô hình được xây dựng và mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng Ansoft Maxwell. Các kích thước của chip thể lỏng được chỉ định trong Bảng 3.1 và tính chất của vật liệu cho các mô phỏng (hằng số điện môi và dẫn số lượng lớn) được chỉ định trong Bảng 3.2. Sự thay đổi điện dung của tụ điện phẳng được nghiên cứu khi có sự xuất hiện của các đối tượng di chuyển trong khu vực hoạt động của cảm biến.

Do các đối tượng với hằng số điện môi khác nhau và dẫn số lượng lớn di chuyển qua các kênh, các mối tương quan của điện dung giữa hai tụ giống hệt nhau cũng được mô phỏng. Bên cạnh đó, sự ảnh hưởng chất liệu của lớp bảo vệ và độ dày trên các điện dung của tụ điện phẳng cũng được tính toán. Trong thực tế, do tính phức tạp của việc chế tạo các loại chip ở mức micro, độ dày của lớp bảo vệ SiO<sub>2</sub> hầu như không vượt quá 1 mm với kỹ thuật phun.

Biểu tượng	Số lượng	Đơn vị
$u$	Chiều rộng kênh cỡ micro	30 $\mu\text{m}$
$v$	Chiều dài kênh cỡ micro	50 $\mu\text{m}$
$t$	Độ rộng điện cực	40 $\mu\text{m}$
$h$	Độ cao điện cực	150 nm
$a$	Khoảng cách các điện cực	10 $\mu\text{m}$

*Bảng 3.1: Thông số cảm biến chất lỏng điện dung*

Chất liệu	Thông số	Suất dẫn(S/m)
Vàng	1	$41 \times 10^6$
PDMS	2.7	$3 \times 10^{-12}$
Kính	5.5	0
Không khí	1.0006	0
Thiếc	1	$8.67 \times 10^6$
Nước ngọt	81	0.01
SiO <sub>2</sub>	4	0

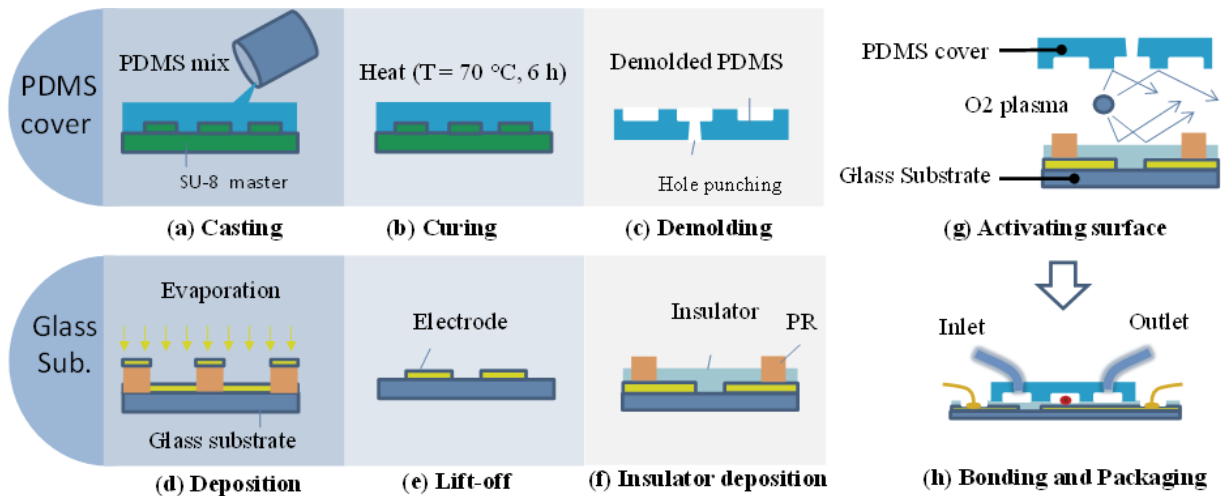
*Bảng 3.2: Thông số chất liệu bị kích thích*

Do đó, các mô phỏng được thực hiện với độ dày của SiO<sub>2</sub> lớp từ 200 nm đến 1  $\mu\text{m}$ . Hơn nữa, các mô phỏng cho thấy mức độ thay đổi của điện dung phụ thuộc vào khối lượng và nguyên vật liệu của các đối tượng di chuyển trong kênh, cùng với các vị trí khác nhau của các đối tượng trong kênh.

### 3.3. Chế tạo cảm biến tụ phẳng vi điện cực

Chế tạo chip vi lỏng chế tạo chủ yếu sử dụng polymer do chi phí của nó thấp và dễ chế tạo [2, 55]. Chip vi lỏng đề xuất bao gồm một tấm kính và chất nền PDMS. Các điện cực vàng và liên kết pad được mạ trên miếng kính và bao phủ bởi một màng

SiO<sub>2</sub> mỏng để tránh tiếp xúc trực tiếp giữa điện trong kênh thể lỏng và các điện cực. Các PDMS chất nền bao gồm các vi kênh đặt bên trong.



Hình 3.5. Quá trình chế tạo[21].

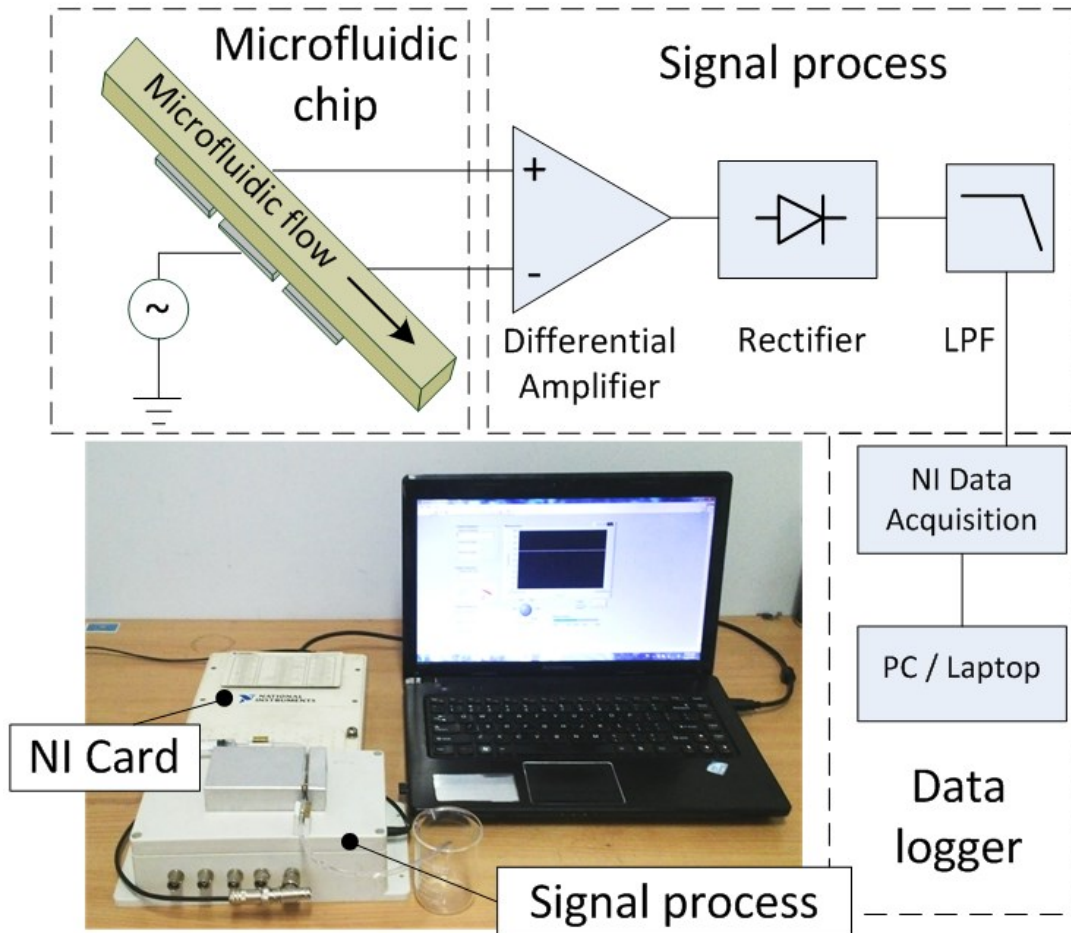
Quá trình chế tạo được thể hiện trong Hình 3.3. Vi kênh PDMS được chế tạo bằng cách sử dụng khuôn đúc kỹ thuật [4]. PDMS prepolymer và chất bảo dưỡng (PDMS phần A và phần B - Sylgard 184, Dow Corning Corp) đầu tiên được pha trộn theo tỷ lệ trọng lượng 10:1 và khuấy đều trước khi đổ vào khuôn mẫu của SU-8 trên màng mỏng silicon.

Hỗn hợp PDMS được khử khí cho đến khi không có bọt còn trên bề mặt sau bằng cách nung ở nhiệt độ 70°C trong hơn 6 giờ. Sau đó, nó được đưa ra từ khuôn SU-8 sau khi được làm lạnh tới nhiệt độ phòng. Các đầu vào và đầu ra trên các chất nền PDMS được tạo ra bằng phương pháp dập lỗ. Các vi điện cực và miếng dán được chế tạo dựa trên kỹ thuật bốc hơi trên màng mỏng kính. Một quang điện trở âm (ZPN-1150) được đặt trên màng mỏng kính 3". Sau đó, một lớp vàng Au/Ti dày bị bốc hơi tiếp theo đó là quá trình nhấc ra để loại bỏ những mảnh vàng không mong muốn. Các lớp cách điện SiO<sub>2</sub> trên bề mặt cảm biến điện cực được tạo ra bằng kỹ thuật phun. Một buồng plasma oxy để xử lý bề mặt 27 (30 giây, 50W cho PDMS chất nền; 6 phút, 50W cho tấm kính này) trước khi gắn với nhau bằng một con chip Bonder độ chính xác cao (CA-300ss, Bondtech Co., Ltd.) để làm cho toàn bộ chip.

### 3.4. Thiết lập hệ thống đo lường

Hình 3.6 trình bày một thiết lập đo lường thử nghiệm của con chip vi kênh chất lỏng DC<sup>4</sup>D với ba khối chính: chip vi cảm biến tụ phẳng, khối xử lý tín hiệu và ghi dữ liệu. Một tín hiệu hình sin được đặt vào điện cực kích thích sau đó các tín hiệu đầu ra từ hai điện cực pick-up sẽ được thu thập vào đầu vào của khối xử lý tín hiệu.





Hình 3.6. Thiết lập hệ thống đo lường thực nghiệm[21].

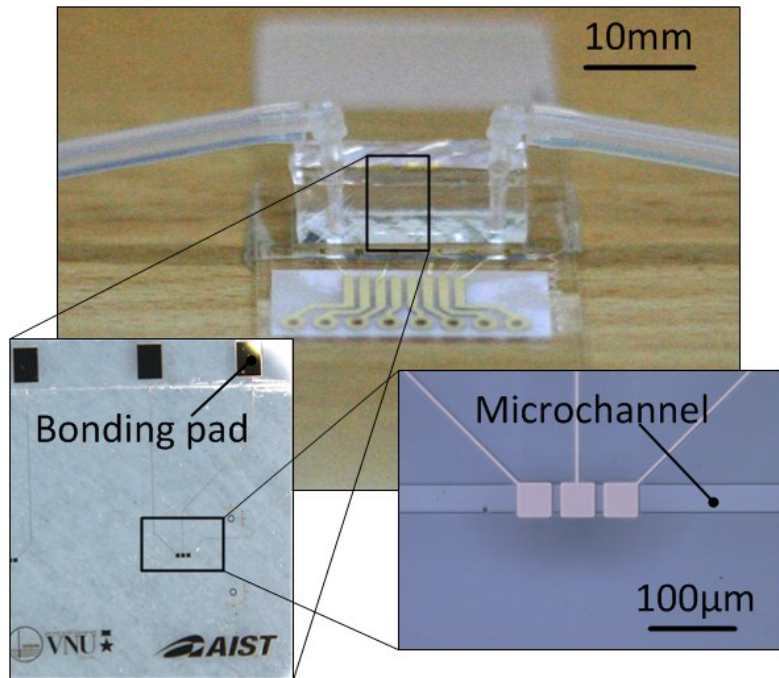
Hình 3.6 mô tả về hệ thống với chip cảm biến tụ phẳng theo thiết DC<sup>4</sup>D. Hệ thống gồm có ba khối chính:

- + Chip cảm biến tụ phẳng.
- + Xử lý tín hiệu.
- + Lấy và lưu trữ dữ liệu.

Khi một tín hiệu điện được đặt vào điện cực kích thích, tín hiệu ở hai điện cực pick-up sẽ được đi vào khối Xử lý tín hiệu. Tín hiệu sẽ được khuếch đại vì sai trước khi đưa qua bộ chỉnh lưu và bộ lọc thông thấp. Sau đó, tín hiệu đầu ra từ bộ Xử lý dữ liệu sẽ được đưa vào PC/Laptop thông qua thẻ NI (DAQPad-6016) và cuối cùng được xử lý bằng phần mềm LabView. Một camera tốc độ cao được sử dụng để ghi lại sự chuyển động của vật thể trong vi kênh chất lỏng.

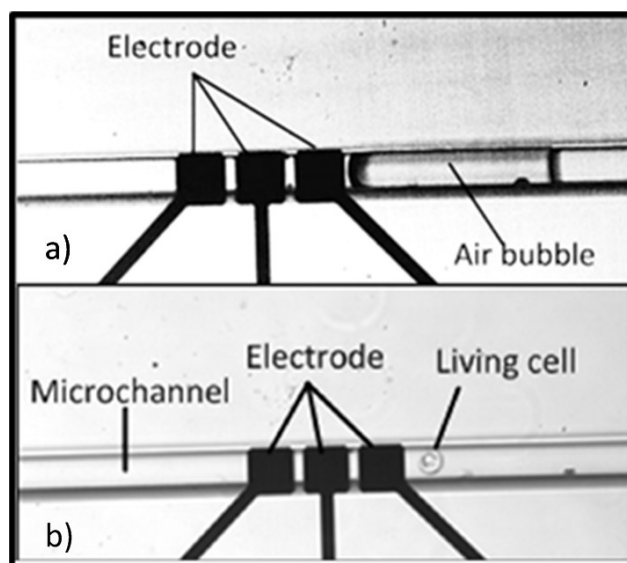
Cảm biến tụ phẳng DC<sup>4</sup>D được đề xuất được chế tạo theo thiết kế ở trên với kích thước toàn bộ chỉ vào khoảng 10 x 20 x 6 mm. Hình 3.7 cho thấy hình ảnh thực tế của

cảm biến đã được đóng gói, bao gồm cả đầu vào và đầu ra. Hình ảnh được ghi lại bằng máy hiển vi. Hình ảnh cho thấy rằng các vi điện cực trên tấm thủy tinh và trên kênh trong đế PDMS được đặt cùng nhau và nối với nhau với độ chính xác cao.



Hình 3.7. Chip cảm biến tự phẳng với cấu trúc  $DC^4D$  [21].

Hình 3.8a và 3.8b là hình ảnh khi một bọt khí và một tế bào sống (Sarcoma-180) di chuyển qua cùng hoạt động của cảm biến. Đường kính của tế bào khoảng  $25\ \mu\text{m}$  trong khi độ rộng của vi kênh vào khoảng  $30\ \mu\text{m}$ . Vì vậy, cấu trúc này có thể phát hiện được tế bào S-180.



Hình 3.8. Hình ảnh của a) Bọt khí, b) Tế bào sống đi qua kênh dẫn [21].

Để hình thành một liên kết không thể đảo ngược, các chất nền PDMS và các tấm kính được đặt trong một buồng plasma ôxy để xử lý bề mặt [56] (30 giây, 50W cho PDMS chất nền; 6 phút, 50W cho tấm kính này) trước khi liên kết với nhau bằng một con chip nối có độ chính xác cao (CA-300ss, Bondtech Co., Ltd.) để tạo ra toàn bộ chip hoàn chỉnh.

## CHƯƠNG 4 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

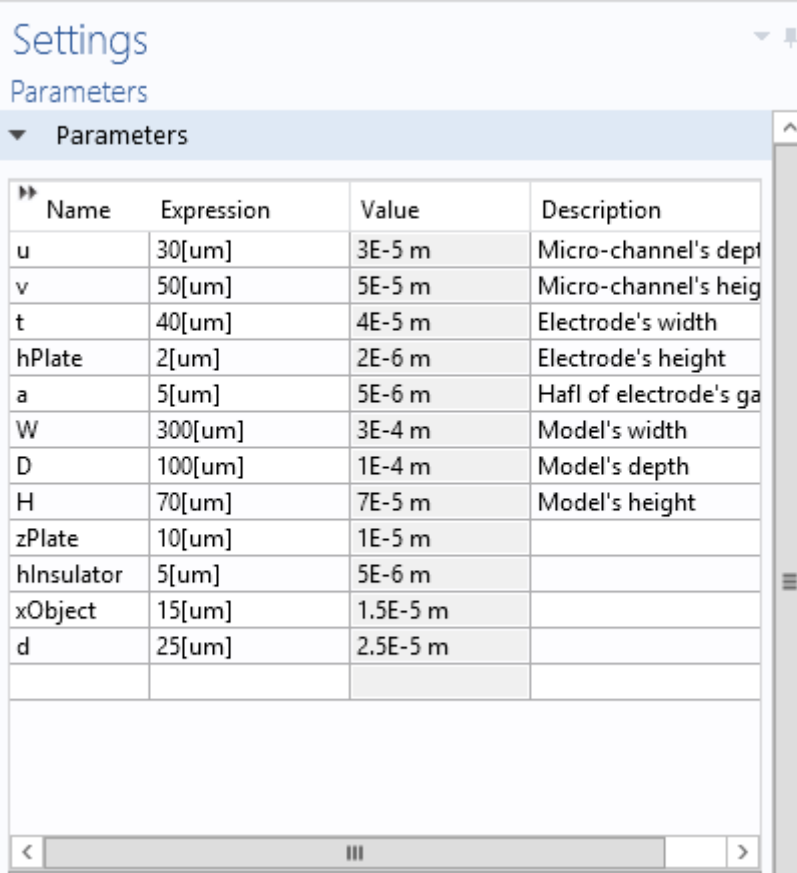
### 4.1. Yêu cầu

Xây dựng một mô hình cảm biến tụ phẳng với phần mềm chuyên dụng với các thông số phù hợp với thiết kế đã đề xuất. Từ đó đưa ra các kết quả và phân tích, so sánh để đánh giá khả năng phát hiện vật thể của cảm biến tụ phẳng được đề xuất dựa trên cấu trúc C<sup>4</sup>D vi sai.

### 4.2. Thiết kế và mô phỏng cấu trúc trên phần mềm COMSOL

Để mô phỏng cấu trúc và hoạt động cảm biến tụ phẳng, phần mềm mô phỏng chuyên dụng COMSOL (Comsol Inc.) được sử dụng. Phần mềm COMSOL được biết đến như là một phần mềm thiết kế, phân tích phần tử hữu hạn thông dụng hiện nay. Nó được sử dụng để mô hình hóa và mô phỏng các hệ thống vật lý.

Cấu trúc cảm biến tụ phẳng được xây dựng với phần mềm COMSOL. Các thông số về tính chất vật lý, cấu trúc và môi trường được thiết lập phù hợp với thiết kế được đề xuất.



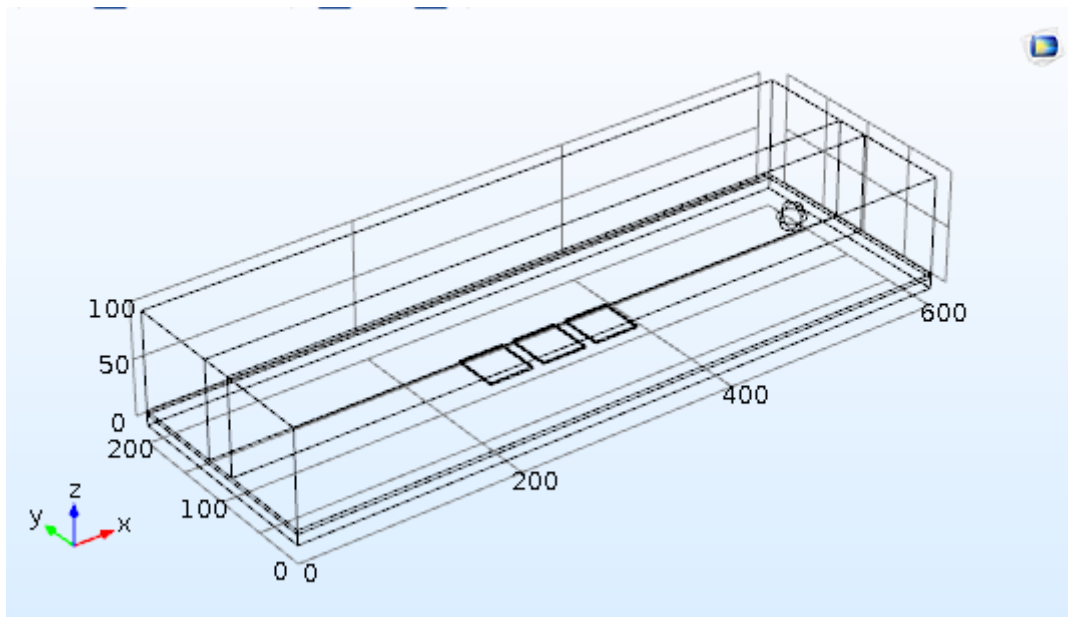
The screenshot shows the 'Settings' window in COMSOL, specifically the 'Parameters' section. It displays a table with columns for Name, Expression, Value, and Description. The parameters listed include u, v, t, hPlate, a, W, D, H, zPlate, hInsulator, xObject, and d, each with its corresponding expression and value in meters.

Name	Expression	Value	Description
u	30[um]	3E-5 m	Micro-channel's dept
v	50[um]	5E-5 m	Micro-channel's heig
t	40[um]	4E-5 m	Electrode's width
hPlate	2[um]	2E-6 m	Electrode's height
a	5[um]	5E-6 m	Hafl of electrode's ga
W	300[um]	3E-4 m	Model's width
D	100[um]	1E-4 m	Model's depth
H	70[um]	7E-5 m	Model's height
zPlate	10[um]	1E-5 m	
hInsulator	5[um]	5E-6 m	
xObject	15[um]	1.5E-5 m	
d	25[um]	2.5E-5 m	

Hình 4.1. Các thông số cơ bản được thiết lập trong phần mềm COMSOL

Từ các thông số cơ bản trên ta xây dựng mô hình cảm biến tụ phẳng với các vi điện cực như Hình 4.2. Trong mô hình này, một điện áp sẽ được đặt vào điện cực ở giữa như là điện cực kích thích. Hai điện cực còn lại là hai điện cực đầu ra. Ba bản tụ này sẽ tạo thành một cấu trúc  $C^4D$  vi sai với các vi điện cực.

Một vật thể sẽ di chuyển trong một vi kênh chất lỏng chạy dọc theo 3 điện cực tạo ra những sự thay đổi về điện dung tụ điện, điện áp đầu ra trên hai bản cực còn lại. Từ đó chúng ta sẽ phân tích những số liệu đầu ra để đánh giá khả năng phát hiện vật thể trên cấu trúc này.

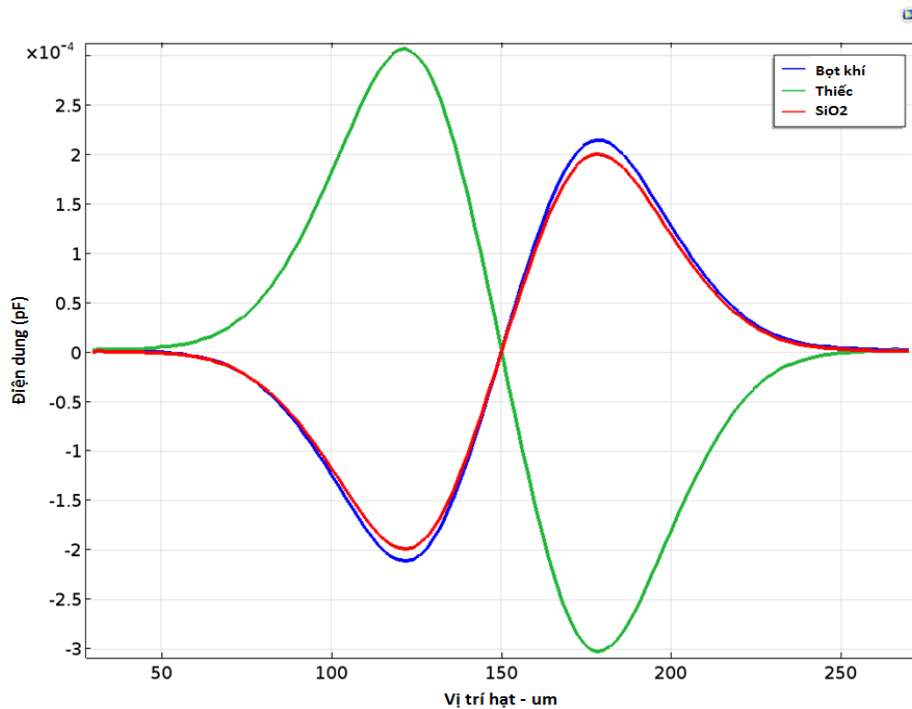


Hình 4.2. Cảm biến tụ phẳng với cấu trúc  $DC^4D$  được xây dựng trong phần mềm COMSOL

#### 4.3. Kết quả mô phỏng với kênh chất lỏng không dẫn điện

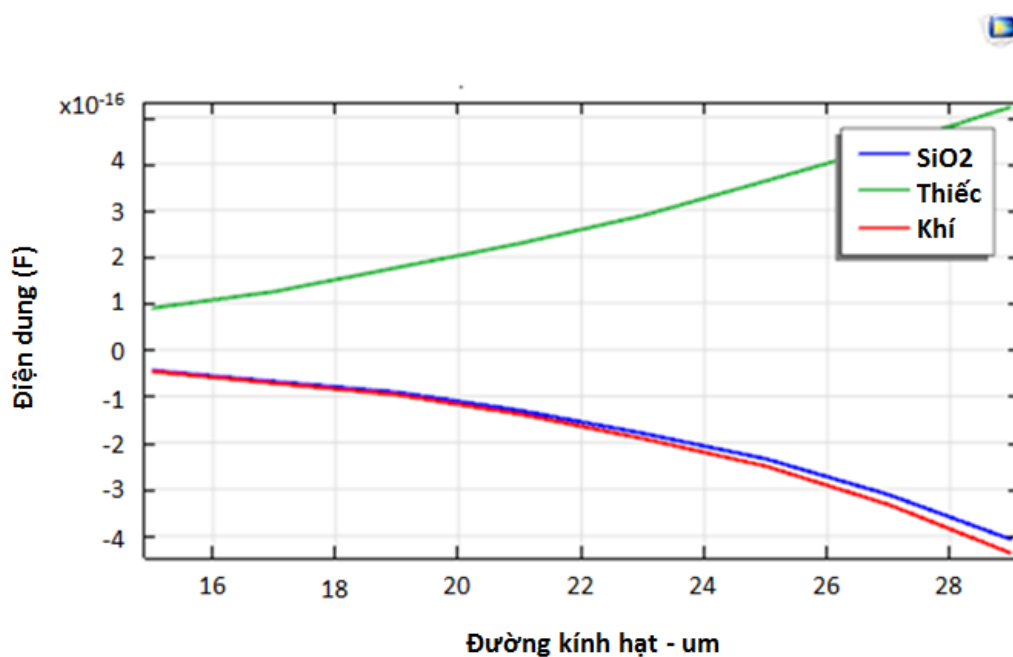
Kết quả mô phỏng thể hiện mối liên hệ giữa sự chênh lệch điện dung giữa hai tụ điện phẳng với vị trí của vật thể trong vi kênh dẫn lỏng. Hình 4.3 cho thấy sự chênh lệch lớn nhất vào khoảng  $3 \times 10^{-16}$  F với trường hợp đường kính vật thể (hạt thiếc) vào khoảng 25  $\mu\text{m}$  đang chuyển động trong kênh dẫn.

Trong khi đó sự chênh lệch này vào khoảng  $1.3 \times 10^{-16}$  F và  $1.2 \times 10^{-16}$  F đối với bột khí và hạt  $\text{SiO}_2$ . Như có thể thấy, điện dung tăng dần khi vật thể đi qua tụ điện là một vật thể dẫn. Ngược lại, điện dung của tụ sẽ giảm nếu như có vật thể không dẫn điện đi qua tụ. Vì vậy, những tính chất của vật thể chạy qua kênh dẫn có thể được xác định và phân tích dựa vào số liệu đầu ra.



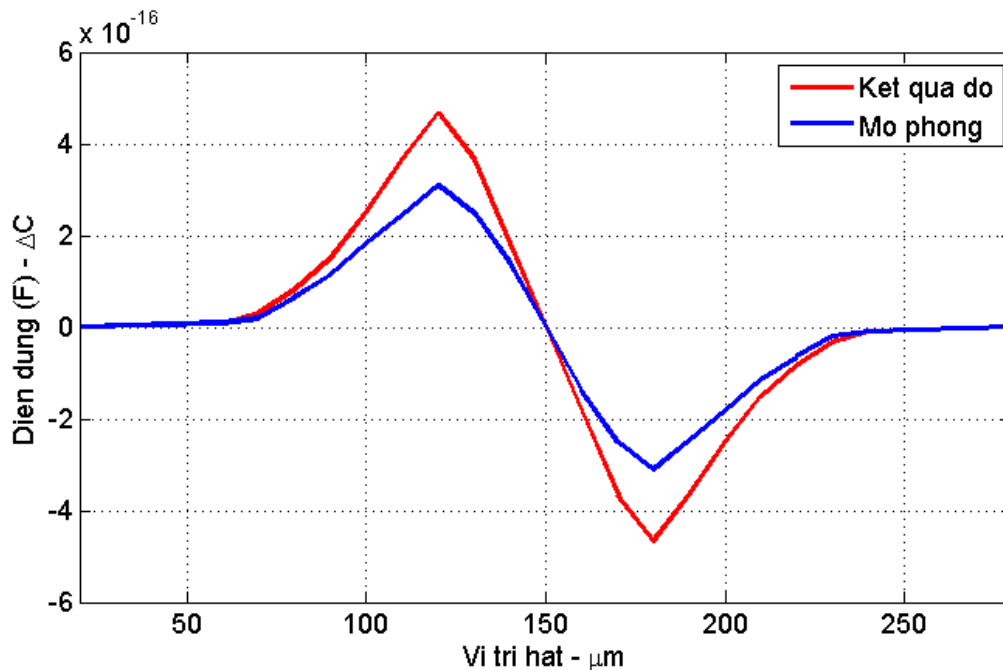
Hình 4.3. Sự thay đổi điện dung của cảm biến với ba vật liệu khác nhau theo vị trí của một vật thể với đường kính 25  $\mu\text{m}$ .

Trong Hình 4.4 thể hiện sự thay đổi điện dung theo thể tích hạt cả trong ba trường hợp với hạt thiếc, bọt khí và  $\text{SiO}_2$ . Từ biểu đồ có thể nhận xét rằng sự tăng điện dung gần như tuyến tính với thể tích của hạt. Ta cũng có thể thấy trường hợp thay đổi nhiều nhất là trường hợp hạt dẫn điện (hạt thiếc).



Hình 4.4. Điện dung vi sai đầu ra với thể tích vật thể.

Khi so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm ta thu được kết quả như hình 4.5 dưới đây:



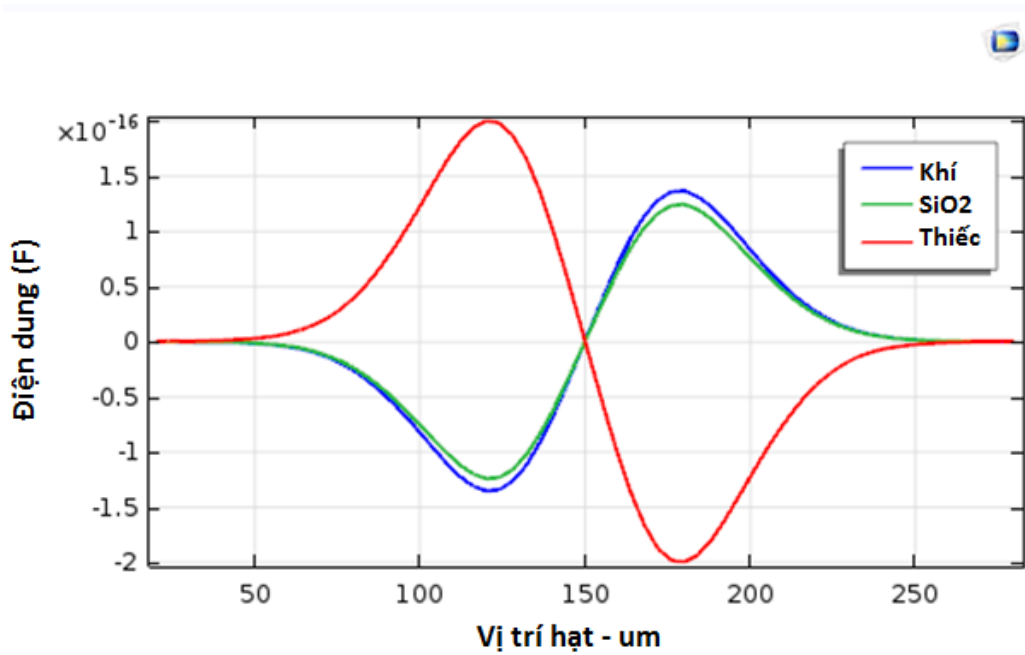
Hình 4.5. Điện dung vi sai theo kết quả đo và mô phỏng với phần mềm COMSOL.

Do chịu ảnh hưởng của các yếu tố từ môi trường dẫn tới sự khác biệt trong kết quả đo và mô phỏng. Trong thực tế, điện dung của một tụ phẳng sẽ chịu tác động bởi bản cực còn lại trong cấu trúc vi sai, dẫn đến sự sai khác trong mô phỏng và thực tế.

#### 4.4. Kết quả mô phỏng với kênh chất lỏng dẫn điện

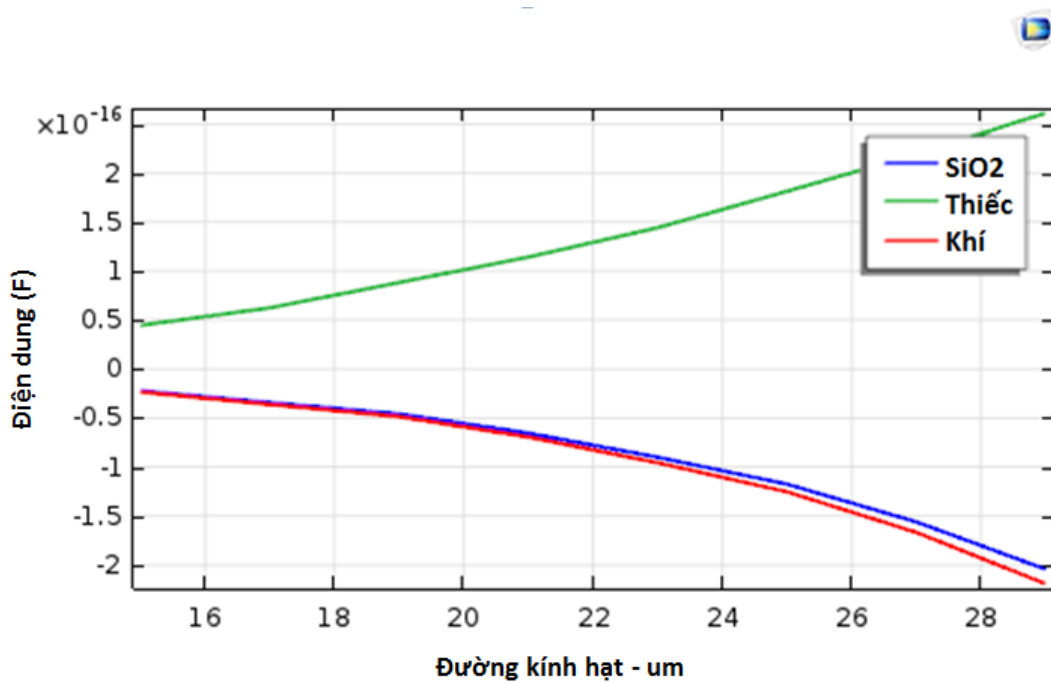
Với nhiều lĩnh vực khác nhau, chất lỏng trong kênh có thể là loại chất lỏng dẫn điện. Cảm biến tụ phẳng cho khả năng phát hiện được các vật thể trong kênh dẫn với loại chất lỏng đó. Trong luận văn này, chúng ta sẽ tìm hiểu khả năng phát hiện hạt của cảm biến tụ phẳng với kênh dẫn là các chất lỏng dẫn điện.

Trong mô hình này, ta sẽ chọn kênh dẫn với chất lỏng là dung dịch muối NaCl. Ba loại hạt thiếc, bột khí, và SiO<sub>2</sub> chuyển động trong kênh dẫn này. Ta sẽ nghiên cứu sự thay đổi về điện dung của tụ điện khi hạt này di chuyển trong kênh dẫn.



Hình 4.6. Sự thay đổi điện dung của cảm biến với ba vật liệu khác nhau theo vị trí của một vật thể với đường kính 25  $\mu\text{m}$ .

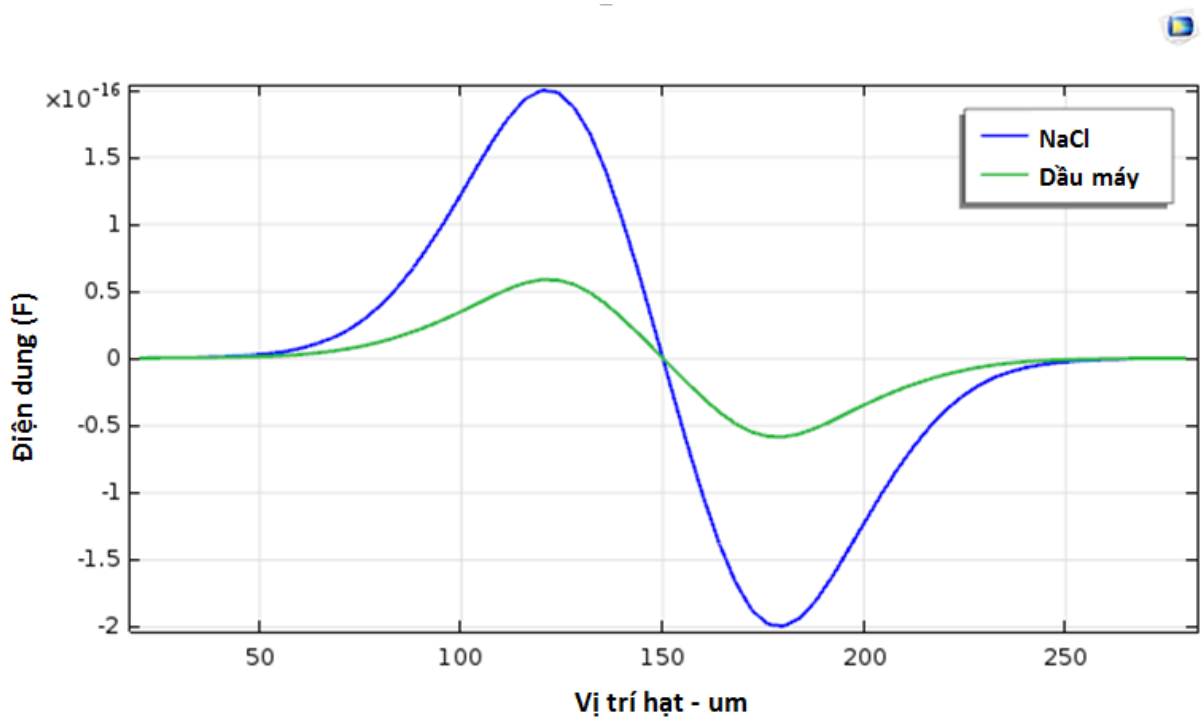
Hình 4.6 thể hiện sự thay đổi về điện dung của các loại hạt di chuyển trong kênh dẫn chất lỏng dẫn điện. Sự chênh lệch lớn nhất vào khoảng  $2 \times 10^{-16}$  F đối với hạt thiếc,  $1.4 \times 10^{-16}$  F và  $1.25 \times 10^{-16}$  F đối với bột khí và hạt  $\text{SiO}_2$ . Hình dạng đồ thị gần giống đối với kênh dẫn là chất lỏng không dẫn điện. Từ đó cho thấy rằng cảm biến cũng có thể phát hiện tốt các vật thể trong chất lỏng dẫn điện.



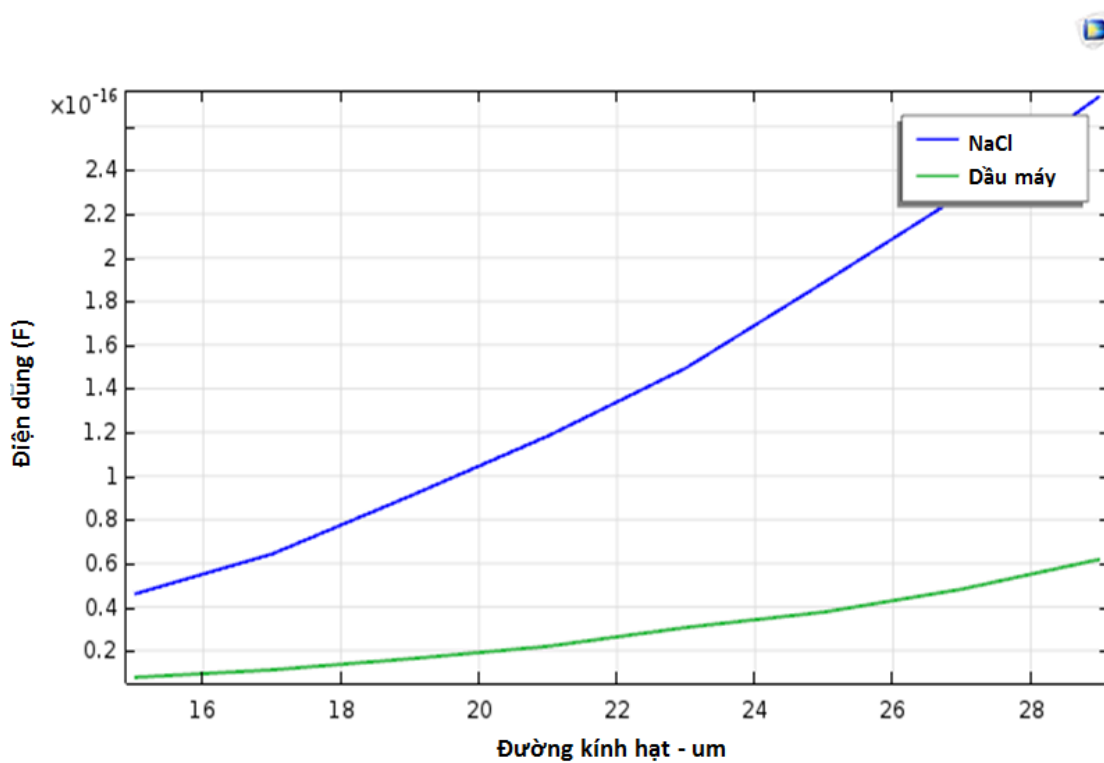
Hình 4.7. Điện dung vi sai đầu ra với thể tích vật thể.



Khi so sánh độ thay đổi điện dung của tụ với hai loại chất lỏng khác nhau, ta thu được kết quả như Hình 4.8 và 4.9.



Hình 4.8. Điện dung vi sai với vị trí hạt thiếc trong kênh nước muối và dầu máy.

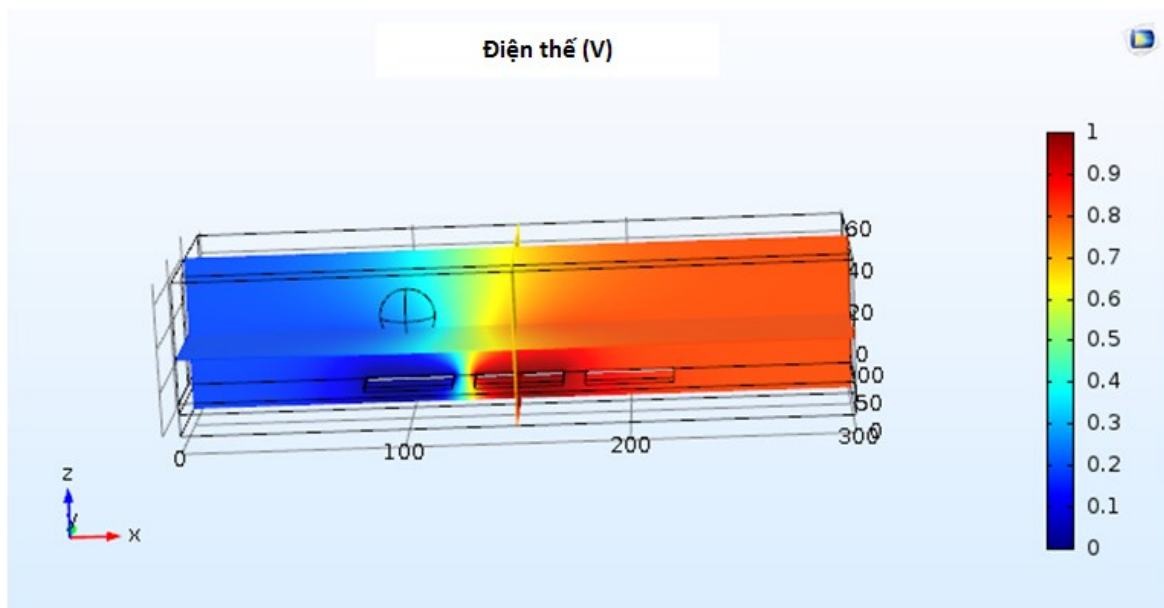


Hình 4.9. Sự thay đổi điện dung của tụ theo kích thước hạt Tin trong môi trường nước muối và dầu máy.

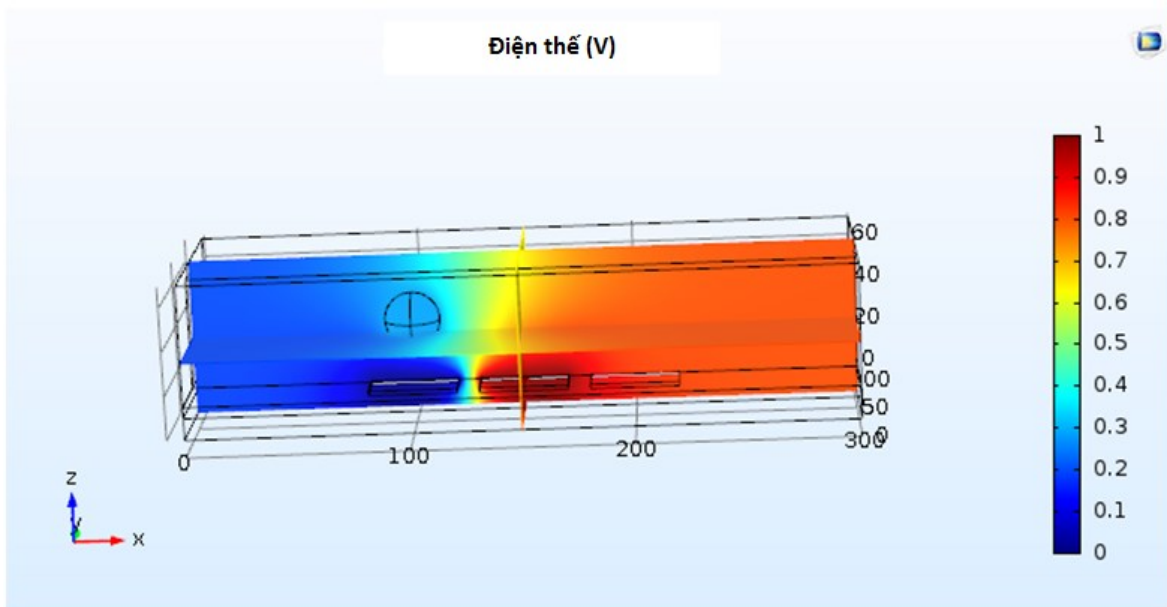
Từ kết quả trên cho thấy cấu trúc với kênh dẫn điện cho ra sự thay đổi về điện dung lớn hơn so với kênh dẫn không dẫn điện. Nó cho thấy sự phát hiện hạt nhạy hơn khi cho ra thay đổi điện dung lớn hơn. Điều này cho thấy cảm biến tụ phẳng này cũng phát hiện tốt các hạt trong chất lỏng dẫn điện.

#### 4.5. Kết quả mô phỏng điện thế trong tụ phẳng.

Hình 4.10 và 4.11 biểu diễn cấu hình điện thế của một vi kênh chất lỏng. Mô phỏng này sẽ dùng hai loại hạt  $\text{SiO}_2$  và thiếc với vị trí ở giữa kênh dẫn chất lỏng.



Hình 4.10. Sự thay đổi điện thế khi có hạt Tin chạy qua kênh dẫn chất lỏng.



Hình 4.11. Sự thay đổi điện thế khi có hạt  $\text{SiO}_2$  chạy qua kênh dẫn chất lỏng.

Khi  $\text{SiO}_2$  đi qua kênh dẫn, có thể thấy là điện trường phân bố không đều, trong khi đó với hạt thiếc, điện trường trong tụ là điện trường đều. Và hình 4.10 và 4.11 này cũng cho thấy rằng sự thay đổi về điện dung của hạt dẫn điện lúc nào cũng cao hơn trường hợp với hạt không dẫn điện với cùng một vị trí xác định.

## KẾT LUẬN

Trong thời gian tìm hiểu và nghiên cứu dưới sự giúp đỡ tận tình của thầy hướng dẫn PGS.TS. Chử Đức Trinh, đến nay toàn bộ nội dung của luận văn đã được hoàn thành đáp ứng đầy đủ các yêu cầu đã đặt ra. Quá trình thực hiện đề tài thực sự là khoảng thời gian vô cùng quý báu và hữu ích cho em khi nghiên cứu, tìm hiểu về vi điện tử và vi hệ thống, cũng như sự khó khăn khi triển khai ứng dụng lý thuyết vào thực tế. Hơn nữa, đây cũng sẽ là hành trang kiến thức rất quý giá cho em trong những công tác thực tiễn sau này.

Qua quá trình tìm hiểu thực hiện đề tài, em đã thu được những kết quả chính như sau:

Nghiên cứu việc thiết kế cấu trúc vi cảm biến tụ phẳng dựa trên cấu trúc  $C^4D$  vi sai. Cấu trúc được đề xuất có thể phát hiện được những vật thể có kích thước ở mức micro. Với thiết kế kênh dẫn độ rộng 30  $\mu\text{m}$ , cảm biến tụ phẳng có khả năng phát hiện những vật thể rất nhỏ ở mức tế bào dựa vào việc đánh giá những sự thay đổi về điện dung, điện áp đầu ra theo vị trí vật thể trên kênh, kích thước của vật thể. Cấu trúc được đề xuất gồm 3 bản vi điện cực nằm ngang trong một mặt phẳng với một kênh dẫn chất lỏng cũng với kích thước micro. Như vậy, thiết kế này có thể coi như cấu thành bởi hai tụ phẳng đơn. Một điện áp đặt vào bản cực giữa sẽ tạo thành cấu trúc vi sai. Cấu trúc này đưa ra một sự thay đổi lớn hơn về điện dung giúp cho việc phát hiện vật thể nhạy hơn, vì vậy nó có thể nhận thấy những vật thể khác nhau trong kênh dẫn (vật thể bằng vật liệu dẫn điện hoặc không dẫn điện).

Luận văn cũng trình bày phương pháp chế tạo và mô phỏng cảm biến tụ phẳng dựa trên cấu trúc  $C^4D$  vi sai. Từ kết quả mô phỏng, cảm biến này cho khả năng phát hiện vật thể với kích thước rất nhỏ (cỡ micro) với kênh dẫn độ rộng 30  $\mu\text{m}$ . Cảm biến cũng có thể nhận ra những vật thể có tính chất vật lý khác nhau (chất liệu dẫn điện hoặc không dẫn điện), trong những môi trường chất lỏng khác nhau (dẫn điện hoặc không dẫn điện).

Trong thực tế, cảm biến  $DC^4D$  đã được đề xuất được sử dụng để phát hiện các hạt lạ, bọt khí trong dòng chảy chất lỏng kích thước cỡ micro hoặc tế bào trong các thiết bị và hệ thống y tế.

Từ việc nghiên cứu, thiết kế và chế tạo cảm biến tụ phẳng với các vi điện cực. Trong tương lai, các bộ cảm biến thể lỏng  $DC^4D$  có thể được tiếp tục nghiên cứu và sử dụng để phát hiện dòng chảy hai pha trong ngành công nghiệp dầu khí, hạt trong phát hiện trong kênh chất lỏng và tế bào sống trong các ứng dụng y sinh học.

Một lần nữa em xin trân thành cảm ơn PGS.TS. Chử Đức Trình cùng các Thầy trong bộ môn Vi cơ điện tử và Vi hệ thống, Trường Đại học Công nghệ đã giúp đỡ em trong quá trình thực hiện đề tài này.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Andreas J. Zemann, Erhard Schnell, Dietmar Volgger, and Gunther K. Bonn (1998), "Contactless Conductivity Detection for Capillary Electrophoresis," *Anal. Chem.*
2. Li, H., et al., Fabrication of polystyrene microfluidic devices using a pulsed CO<sub>2</sub> laser system. *Microsystem Technologies*, 2011. 18(3): p. 373-379.
3. Brito-Neto J.G.A., da Silva J.A.F., Blanes L, do Lago C.L. (2005), "Understanding capacitively coupled contactless conductivity detection in capillary and microchip electrophoresis. Part 2. Peak shape, stray capacitance, noise, and actual electronics," *Electroanalysis*, 17, pp. 1207-1214.
4. Carlo S. Effenhauser\* , G.J.M.B., Aran Paulus, and Markus Ehrat, Integrated Capillary Electrophoresis on Flexible Silicone Microdevices: Analysis of DNA Restriction Fragments and Detection of Single DNA Molecules on Microchips. *Anal. Chem.* , 1997(69): p. 3451 -3457.
5. Chen R. S., Cheng H., Wu W. Z., Ai X. O., Huang W. H., Wang Z. L. and Cheng J. K. (2007), "Analysis of inorganic and small organic ions by capillary electrophoresis with amperometric detection," *Electrophoresis*, 28 (19), pp. 3347-3361.
6. Demori, Marco, Vittorio Ferrari, Domenico Strazza, and Pietro Poesio, A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010. 163(1): p. 172-179.
7. Dienerowitz M., Mazilu M., and Dholakia K. (2008), "Optical manipulation of nanoparticles: a review," *J. Nanophotonics*, vol. 2, no. 1, pp. 021875–021875–32.
8. Ebrahim G.Z., and Mohamad S. (2010), *CMOS Capacitive Sensors for Lab-on-Chip Applications*, Springer Science+Business Media B.V.
9. Eren H., and Kong W. L. (1999), Capacitive sensors-displacement, In J. G. Webster (Ed.), *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, Boca Raton: CRC Press.
10. Hai, N.D., et al., Differential C<sup>4</sup>D sensor for conductive and non-conductive fluidic channel. *Microsystem Technologies*, 2015.
11. Fuchiwaki O., Ito A., Misaki D., and Aoyama H. (2008), "Multi-axial micromanipulation organized by versatile micro robots and micro tweezers," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 893–898.
12. Gas B, Zuska J, Coufal P, van de Goor T (2002), "Optimization of the highfrequency contactless conductivity detector for capillary electrophoresis," *Electrophoresis*, 23, pp. 3520-7.
13. Glisson T.H. (2011), *Introduction to Circuit Analysis and Design*, Springer Science Business Media.
14. Gründler P. (2007), Conductivity sensors and capacitive sensors, *In Chemical sensors: An introduction for scientists and engineers*, Berlin: Springer.

15. Huang Y., Ewalt K. L., Tirado M., Haigis R., Forster A., Ackley D., Heller M. J., O'Connell J. P., and Krihak M. (2001), "Electric Manipulation of Bioparticles and Macromolecules on Microfabricated Electrodes," *Anal. Chem.*, vol. 73, no. 7, pp. 1549–1559.
16. Hauri, Hans-Peter (2008), *Applications of Capillary Electrophoresis with Contactless Conductivity Detection*. Review.
17. Huang, Zhiyao, Jun Long, Wenbo Xu, Haifeng Ji, Baoliang Wang, and Haiqing Li (2012), "Design of capacitively coupled contactless conductivity detection sensor," *Flow Measurement and Instrumentation*, 27: p. 67-70.
18. Huck C., A. Poghosian, M. Bäcker, S. Chaudhuri, W. Zander, J. Schubert, V. K. Begoyan, V. V. Buniatyan, P. Wagner, and M. J. Schöning (2014), "Capacitively coupled electrolyte-conductivity sensor based on high-k material of barium strontium titanate," *Sensors and Actuators B: Chemical*, 198, pp. 102-109.
19. Nguyen Ngoc Viet (2015), "Fluidic channel detection system using a differential C<sup>4</sup>D structure", Master thesis of Electronics and Telecommunication Technology.
20. Jaworek A., Krupa A., and Trela M. (2004), "Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(5-6), pp. 317-324.
21. Q.L. Do, T.T. Bui, T.T.H. Tran, K. Kikuchi, M. Aoyagi, T. Chu Duc, "Fluidic Platform with Embedded Differential Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detector for Micro-Object Sensing", *IJNT* (2015) (Accepted).
22. Judy J. W. (2001), *Microelectromechanical Systems (MEMS): Fabrication, Design and Applications*, Smart Materials and Structures, Vol. 10.
23. Kilian C. T. (2000), *Sensors, In Modern control technology: Components and systems*, Novato: Delmar Thomson Learning.
24. Kuban Pavel C., Hauser Peter (2004), "Fundamental aspects of contactless conductivity detection for capillary electrophoresis, part I: frequency behavior and cell geometry," *Electrophoresis*, 25, pp. 3387-97.
25. Kuban P.C., Hauser P. (2004), "Fundamental aspects of contactless conductivity detection for capillary electrophoresis, part II: signal-tonoise ratio and stray capacitance," *Electrophoresis*, 25, pp. 3398- 405.
26. Kuban Pavel and Hauser Peter C. (2008), "A review of the recent achievements in capacitively coupled contactless conductivity detection," *Anal Chim Acta*, 607(1), pp. 15-29.
27. Kuban Pavel C., Hauser Peter (2011), "Capacitively coupled contactless conductivity detection for micro separation techniques – Recent development," *Electrophoresis*, 32, pp. 30-42.
28. Lei Wang, Zhiyao Huang, 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*, pp. 1466- 1474.
29. Liu, Junshan, Liangkun An, Zheng Xu, Ning Wang, Xiaochong Yan, Liqun Du, Chong Liu, and Liding Wang (2013), “Modeling of capacitively coupled contactless conductivity detection on microfluidic chips,” *Microsystem Technologies*, 19(12), pp. 1991 -1996.
  30. Mamishev A.V., Sundara-Rajan K., Yang F., Du Y.Q., Zahn M. (2004), “Interdigital sensors and transducers,” *Proc. IEEE* 92, pp.808–845.
  31. Moon H.-S., Nam Y.-W., Park J. C., and Jung H.-I. (2009), “Dielectrophoretic Separation of Airborne Microbes and Dust Particles Using a Microfluidic Channel for Real-Time Bioaerosol Monitoring,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 15, pp. 5857–5863.
  32. Muth, Claus M. and Erik S. Shank (2000), *Gas Embolism*, New England Journal of Medicine, 342(7), pp. 476-482.
  33. Nguyen Dac H., Vu Quoc T., Do Quang L., Nguyen Hoang H., Chu Duc T. (2015), “Differential C<sup>4</sup>D Sensor for Conductive and Non-conductive Fluidic Channel”, *Microsystem Technologies J.*, pp. 1-10.
  34. Opekar Frantisek, Tuma Petr, and Stulik Karel (2013), “Contactless impedance sensors and their application to flow measurements,” *Sensors (Basel)*, 13(3), pp. 2786-2801.
  35. Paleček E. and Fojta M. (2007), “Magnetic beads as versatile tools for electrochemical DNA and protein biosensing,” *Talanta*, vol. 74, no. 3, pp. 276–290.
  36. Pallás-Areny R., and Webster J. G. (2001), *Sensors and signal conditioning*, New York: Wiley.
  37. Q. L. Do, T. H. Bui, T.T.H. Tran, K. Kikuchi, M. Aoyagi, T. Chu Duc (2015), “Differential Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (DC<sup>4</sup>D) Sensor for Detection of Object in Microfluidic Channel”, *In: proceeding of IEEE Conference on sensors*, Busan, South Korea, pp. 1546-1549.
  38. Ripka P., & Típek A. (2007), Level position and distance, *In Modern sensors handbook*, Newport Beach: ISTE USA.
  39. Robbins A., & Miller W. (2000), *Circuit analysis: Theory and practice*, Albany: Delmar.
  40. Shih C-Y., Li W., Zheng S.Y., Tai Y.C. (2006), “A resonance-induced resolution enhancement method for conductivity sensor,” *In: proceeding of 5th IEEE Conference on sensors*, EXCO, pp. 271-4.
  41. Solinova V., Kasicka V. (2006), “Recent applications of conductivity detection in capillary and chip electrophoresis,” *J. Sep. Sci.*, 29, pp. 1743-1762.



42. Strazza, Domenico, Marco Demori, Vittorio Ferrari, and Pietro Poesio (2011), "Capacitance sensor for hold-up measurement in high-viscousoil/conductive-water core-annular flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5), pp. 360-369.
43. Terzic E. et al. (2012), *Capacitive sensing Technology, A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments*, Springer-Verlag London.
44. Vu Quoc T., Nguyen Dac H., Pham Quoc T., Nguyen Dinh D., Chu Duc T. (2015), "A printed circuit board capacitive sensor for air bubble inside fluidic flow detection," *Microsyst Technol*, 21, pp. 911–918.
45. Wang, Baoliang, Ying Zhou, Haifeng Ji, Zhiyao Huang, and Haiqing Li (2013), "Measurement of bubble velocity using Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (C<sup>4</sup>D) technique," *Particuology*, 11(2), pp. 198-203.
46. Zemann A.J., Schnell E., Volgger D., Bonn G.K. (1998), "Contactless conductivity detection for capillary electrophoresis," *Anal Chem*.
47. Zhang Zhenli, Li Dong Dong, Liu Xueyong, Subhani Qamar, Zhu Yan, Kang Qi, and Shen Dazong (2012), "Determination of anions using monolithic capillary column ion chromatography with end-to-end differential contactless conductometric detectors under resonance approach," *Analyst*, 137(12), pp. 2876-83.
48. Zhenli Zhang, Yaolong Li, Zhongshi Xu, Xilei Zhu, Qi Kang, Dazhong Shen (2013), "Determination of Equivalent Circuit parameters of a Contactless Conductive Detector in Capillary Electrophoresis by an Impedance Analysis Method", *Electromechanical science*.
49. Chia-Yen Lee and Gwo-Bin Lee, Humidity Sensors: A Review, *Sensor Lett.* Vol. 3, No. 1, 2005.
50. Liu, J., et al., Modeling of capacitively coupled contactless conductivity detection on microfluidic chips. *Microsystem Technologies*, 2013. 19(12): p. 1991-1996.
51. Q.L. Do, T.T.B., T.T.H. Tran, K. Kikuchi, M. Aoyagi, T. Chu Duc, Differential Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (DC<sup>4</sup>D) Sensor for Detection of Object in Microfluidic Channel. *IEEE Sensor 2015 Conference*, 2015.
52. Georg Fercher, A.H., Walter Smetana, Michael J. Vellekoop, End-to-End Differential Contactless Conductivity Sensor for Microchip Capillary Electrophoresis. *Anal. Chem*, 2010(82): p. 3270–3275.
53. Chen, J.Z., et al., Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation. *Lab Chip*, 2004. 4(5): p. 473-80.
54. Elbuken, C., et al., Detection of microdroplet size and speed using capacitive sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011. 171(2): p. 55-62.
55. Du, L., et al., A method of water pretreatment to improve the thermal bonding rate of PMMA microfluidic chip. *Microsystem Technologies*, 2012. 18(4): p. 423-428.

56. Liu, J., et al., Plasma assisted thermal bonding for PMMA microfluidic chips with integrated metal microelectrodes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009. 141(2): p. 646-651.