

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



**TRẦN THỊ THÚY HÀ**

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

**CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ**

**MÃ SỐ: 9.52.02.03**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**HÀ NỘI - 2020**

Công trình được hoàn thành tại:

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

Người hướng dẫn khoa học:

**1. GS.TS. Nguyễn Bình**

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước hội đồng chấm luận văn tại:

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

vào hồi: giờ , ngày tháng năm 20

Có thể tìm hiểu luận án tại:

**1. Thư viện Quốc gia Việt Nam**

**2. Thư viện Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông**

## 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 (wear-free), đồng thời nó có khả năng cảm nhận với một khoảng cách lớn, kích thước cảm biến nhỏ.

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 cho các ứng dụng đo độ nghiêng và 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 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 cũng như phát hiện độ nghiêng. 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**

Trong luận án, 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. [1], [2], [3], [4], [5]. 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. [6], [7].

## CHƯƠNG 1

### TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ CẦN NGHIÊN CỨU

**Tóm tắt:** Nội dung của chương trình bày lý thuyết tổng quan về cảm biến điện dung. Các phương pháp đo và đặc điểm của cảm biến điện dung cũng được giới thiệu trong chương này. Chương này cũng sẽ tập trung khảo sát các nghiên cứu liên quan đến cảm biến điện dung trong ứng dụng phát hiện độ nghiêng và phát hiện vi hạt để từ đó tìm ra các hạn chế của các nghiên cứu trước đây và đề xuất hướng nghiên cứu, phạm vi nghiên cứu và phương thức tiếp cận của luận án.

#### 1.1. Giới thiệu chung

Phần này trình bày tổng quan về ứng dụng của cảm biến điện dung thông thường cũng như cảm biến điện dung dựa trên công nghệ vi cơ điện tử (MEMs).

#### 1.2. Nguyên tắc hoạt động của cảm biến điện dung

Phần này trình bày tổng quan về nguyên tắc hoạt động của cảm biến điện dung thông thường cũng như cảm biến điện dung.

#### 1.3. Cảm biến điện dung đơn

Phần này đưa ra khái niệm về cảm biến điện dung đơn đồng thời cũng đưa ra cách tính độ nhạy của cảm biến.

#### 1.4. Cảm biến điện dung vi sai

Phần này trình bày lý thuyết về phương pháp đo điện dung vi sai cũng như phương pháp giải điều chế của nó.

#### 1.5. Một số đặc điểm của cảm biến điện dung

Phần này trình bày về ưu điểm và nhược điểm của cảm biến điện dung.

#### 1.6. Các nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của 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.

Trong đó, 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. Do vậy, 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 2D và 3D.

Bên cạnh đó, 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. Chính vì vậy, 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.

### **1.8. Kết luận chương**

Trong chương này, Luận án đã trình bày cơ sở lý thuyết cho các nội dung nghiên cứu của luận án bao gồm các nội dung về cảm biến điện dung, cảm biến điện dung vi sai. Ở cuối chương trình bày hướng nghiên cứu của luận án và thảo luận một số kết quả nghiên cứu liên quan từ đó làm rõ hơn nội dung nghiên cứu của luận án.

## CHƯƠNG 2

### CẢM BIẾN ĐIỆN DUNG PHÁT HIỆN ĐỘ NGHIÊNG

**Tóm tắt:** Trong chương này, Luận án trình bày các kết quả nghiên cứu về phương pháp nghiên cứu, thiết kế, và chế tạo cảm biến điện dung vi sai dựa trên cấu trúc hai pha lỏng/khí trong ứng dụng phát hiện độ nghiêng. Nội dung chương 2 được bố cục gồm ba phần và kết luận chương. Phần đầu tiên giới thiệu chung về nội dung của chương và các vấn đề liên quan. Nội dung tiếp theo trình bày một số kết quả nghiên cứu mới của tác giả về cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục 2D. Phần cuối cùng trình bày kết quả nghiên cứu mới về cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hai trục 3D.

#### 2.1. Giới thiệu

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... 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.

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 2D

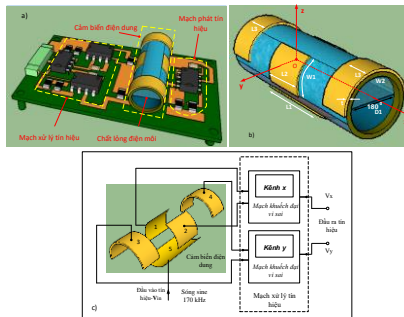
##### 2.2.1. Giới thiệu

Phần này giới thiệu 1 số phương pháp xây dựng cấu trúc cảm biến độ nghiêng với những ưu, nhược khác nhau để từ đó đưa ra giải pháp của luận án

là xây dựng 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

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.



Hình 2. 1. Thiết kế cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng hình trụ

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 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.

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.



Các điện cực được làm bằng đồng với kích thước được đặt như trong bảng 2.1.

*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 1,2,5
$L_1$	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
$D_1$	11,0	Đường kính của ống chứa dung dịch
$D_2$	15,7	Đường kính của điện cực
t	0,2	Độ dày của các điện cực

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 ra tín hiệu đến bốn điện cực thu được đánh số từ 1 đến 4. Hai cặp điện cực này có cùng 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.

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 cảm biến 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.

### **2.2.3. Mô phỏng 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).  
Bảng 2.2 liệt kê các tham số của vật liệu sử dụng trong cảm biến.

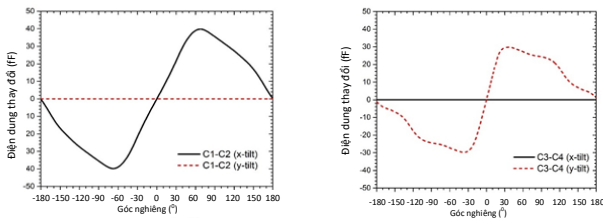
Bảng 2. 2. Thông số của cảm biến được sử dụng trong mô phỏng cấu trúc

Thành phần trong cấu trúc	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	-	$5,96.10^7$

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

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  $\Delta C$  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.

Đồ thị trong hình 2.2 thể hiện sự thay đổi của góc nghiêng theo trục  $x$  và theo trục  $y$ . Qua đồ thị ta thấy, khi cảm biến nghiêng trong phạm vi từ  $-180^\circ$  đến  $+180^\circ$ : theo trục  $x$  thì giá trị điện dung vi sai tuyến tính trong phạm vi từ  $-60^\circ$  đến  $+60^\circ$  với độ nhạy  $0,64\text{ fF}^\circ$  và khi nghiêng theo trục  $y$  thì giá trị điện dung vi sai tuyến tính trong phạm vi từ  $-25^\circ$  đến  $+25^\circ$  với độ nhạy  $1,16\text{ fF}^\circ$ .



Hình 2. 2. Mối quan hệ giữa điện dung vi sai  $\Delta C_1$  và  $\Delta C_2$  và góc nghiêng khi cảm biến nghiêng theo trục  $x$  và trục  $y$

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

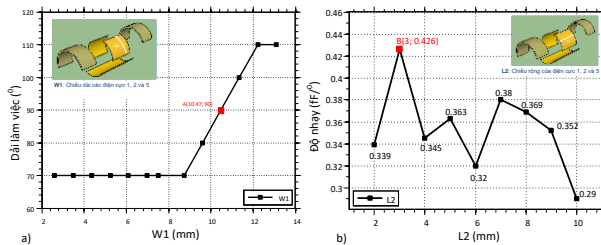
hiều xuyên kênh của hai trục lên nhau là không đáng kể do sự sắp xếp đối xứng của các cực thu.

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

a. *Khảo sát các điện cực của cảm biến nghiêng khi quay theo trục x*

### Khảo sát chiều rộng của điện cực kích thích- $W_1$

Trong mô phỏng này, ta cố định  $L_2 = 5 \text{ mm}$  và lần lượt thay đổi kích thước  $W_1$ .

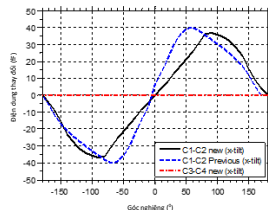


Hình 2. 3. a) *Mối quan hệ giữa dải làm việc của cảm biến và kích thước  $W_1$* ; b) *Mối quan hệ giữa kích thước  $L_2$  và độ nhạy của cảm biến.*

Nhìn vào đồ thị hình 2.3 a) ta chọn được kích thước  $W_1 = 10,47 \text{ mm}$ , đây là dải làm việc tối ưu của cảm biến theo trục  $x$ .

### Khảo sát chiều rộng $L_2$ của điện cực

Từ kết quả khảo sát  $W_1 = 10,47 \text{ mm}$ , ta lần lượt thay đổi kích thước  $L_2$  để khảo sát độ nhạy của cảm biến. Qua đồ thị 2.3b) ta thấy khi  $L_2 = 3 \text{ mm}$  thì độ nhạy của cảm biến đạt giá trị cao nhất là  $0,426 \text{ fF/}^\circ$ . Như vậy, ở cấu trúc tối ưu thì phạm vi hoạt động lớn hơn, nhưng độ nhạy nhỏ hơn một chút.

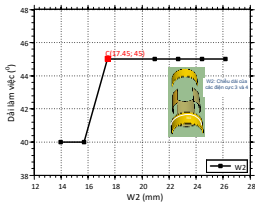


Hình 2. 4. *Điện dung thay đổi khi cấu trúc quay theo trục  $x$*

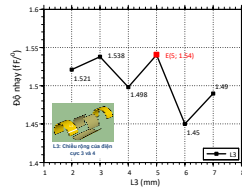
Hình 2.4 cho thấy khả năng làm việc của cấu trúc được tối ưu hóa theo hướng quay trục  $x$  khi so sánh với thiết kế trước. Phạm vi làm việc của cấu trúc được tối ưu hóa lên tới  $\pm 90^\circ$  trong khi cấu trúc trước là khoảng  $\pm 50^\circ$ . Kết quả cũng cho thấy giá trị điện dung vi sai ( $C_3$ - $C_4$ ) không thay đổi khi lăn dọc trục  $x$ . Trong thiết kế này, độ nhạy của cảm biến trên trục  $x$  là khoảng  $0,426 \text{ fF}^\circ$ .

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

*b. Khảo sát các điện cực của cảm biến nghiêng khi quay theo trục  $y$*

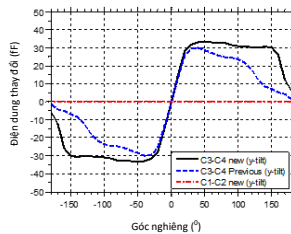


Hình 2. 5. Khảo sát dải làm việc khi thay đổi  $W_2$



Hình 2. 6. Khảo sát độ nhạy khi thay đổi  $L_3$

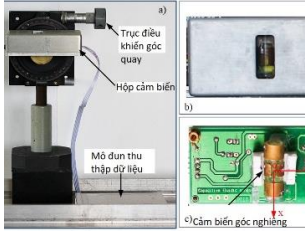
Hình 2.5 và 2.6 cho thấy với  $W_2 = 17,45 \text{ mm}$  thì dải làm việc của cấu trúc là tốt nhất, và với  $L_3 = 5 \text{ mm}$  thì độ nhạy của cảm biến là cao nhất. Từ cấu trúc tối ưu trên, tiến hành khảo sát sự thay đổi giá trị điện dung khi cảm biến nghiêng theo trục  $y$  (hình 2.7).



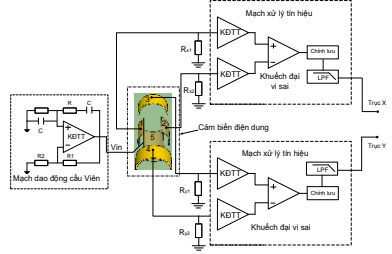
Hình 2. 7. Điện dung thay đổi khi cấu trúc quay theo trục  $y$

### 2.2.3. Thực nghiệm

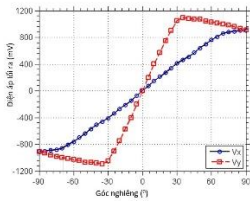
Sau khi thu được kích thước tối ưu, Luận án tiến hành chế tạo và khảo sát hoạt động của cấu trúc cảm biến (Hình 2.8, 2.9).



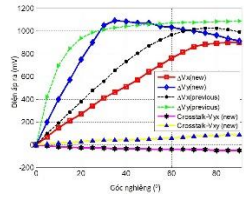
Hình 2. 8. Thiết lập phép đo. a) Cảm biến được gắn trên hệ quay; b) Cảm biến và mạch xử lý được đóng gói trong hộp kín; c) Bảng mạch xử lý tín hiệu.



Hình 2. 9. Sơ đồ khối của cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng



Hình 2. 10. Điện áp ra tương ứng với góc nghiêng theo trục x, y



Hình 2. 11. Điện áp ra và nhiễu xuyên kênh khi cảm biến nghiêng trong dải  $0^0$  đến  $90^0$

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 2.10. 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.

Khi cảm biến nghiêng theo trục x: vùng tuyến tính của cảm biến trong khoảng từ  $-70^0$  đến  $+70^0$  với độ nhạy khoảng  $12,4 \text{ mV}/^0$ . Đối với cấu trúc trước khi tối ưu, thì độ nhạy của cảm biến là  $16 \text{ mV}/^0$  trong khoảng tuyến tính từ  $-60^0$  đến  $+60^0$ .

Khi cảm biến nghiêng theo trục y: Vùng tuyến tính của cảm biến nằm trong khoảng  $-30^0$  đến  $+30^0$  với độ nhạy khoảng  $34,8 \text{ mV}/^0$ . Đối với cấu trúc

trước khi tối ưu, thì độ nhạy của cảm biến là  $39,6 \text{ mV}^0$  trong khoảng tuyến tính từ  $-25^0$  đến  $+25^0$ .

Hình 2.11 cho thấy điện áp đầu ra của cảm biến theo trục  $x$ ,  $y$  trong phạm vi độ nghiêng từ  $0^0$  đến  $90^0$  với tín hiệu nhiễu xuyên kênh.

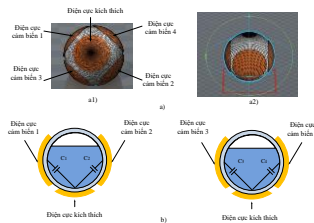
Ta thấy, phạm vi làm việc của cấu trúc cảm biến này khi nghiêng theo trục  $x$  và trục  $y$  không tương đương do tính không đối xứng của cấu trúc cảm biến. Trong phần tiếp theo, Luận án đề xuất cấu trúc cảm biến nghiêng đối xứng hình cầu hai trục dựa trên môi trường điện môi là không khí và chất lỏng 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

Cấu trúc của cảm biến nghiêng có dạng hình cầu được trình bày trong hình 2.12.

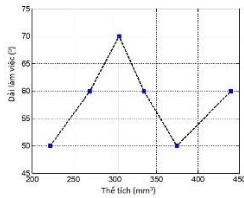


Hình 2. 12. Cấu trúc của cảm biến nghiêng: a) Dạng hình học, (a1) Nhìn từ dưới lên, (a2) Nhìn toàn cảnh; b) Các cặp tụ điện cảm biến trên trục  $x$  ( $C_1$ ,  $C_2$ ) và trục  $y$  ( $C_3$ ,  $C_4$ )

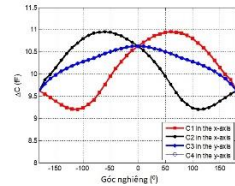
Chất điện môi hai pha lỏng/khí được đặt trong một hộp nhựa hình cầu rỗng có đường kính  $10 \text{ mm}$ , tương đương  $523 \text{ mm}^3$ . Bốn điện cực mỏng, tròn làm bằng đồng được uốn cong theo hình dạng kênh dẫn tạo thành hai cặp điện cực cảm biến. Các điện cực cảm biến của từng cặp là đối xứng nhau 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.

Thể tích của chất lỏng (nước tinh khiết) thay đổi từ  $222 \text{ mm}^3$  đến  $440 \text{ mm}^3$  (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 2.13.

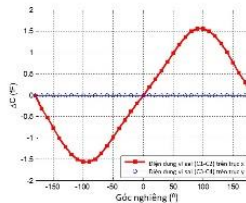


Hình 2.13. Phạm vi làm việc lớn nhất của cấu trúc (ngiêng  $70^\circ$ ) khi thể tích chất lỏng chiếm khoảng 60% thể tích hình cầu (tương đương  $305 \text{ mm}^3$ ).



Hình 2.14. Khảo sát hoạt động của cảm biến trong dải đo  $-180^\circ$  đến  $+180^\circ$

Với lượng chất lỏng chiếm khoảng 60% thể tích hình cầu, ta tiến hành khảo sát hoạt động của cảm biến trong phạm vi  $\pm 180^\circ$  theo hai hướng trục  $x$  và  $y$ . Kết quả được hiển thị trong Hình 2.14.



Hình 2.15. 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  $y$

Độ tuyến tính đạt được trong khoảng từ  $-70^{\circ}$  đến  $+70^{\circ}$  khi cảm biến nghiêng theo trục  $x$ . Kết quả tương tự cho hoạt động của trục  $y$ . 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 vì sai giữa hai cặp điện cực tương ứng có giá trị bằng 0.

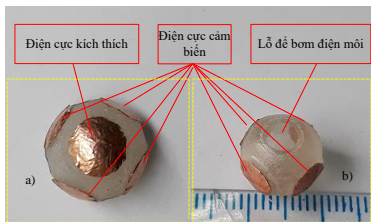
### 2.3.2. Thực nghiệm

Để xác nhận chức năng của cấu trúc, 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  $30\text{ nm}$ .

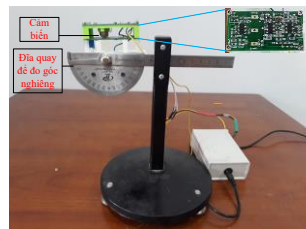
Để tạo ra hai pha lỏng-khí, một phần nước tinh khiết được đổ vào quả cầu (chiếm 60% thể tích quả cầu). Năm điện cực bằng đồng được gắn bên ngoài quả cầu. Các thông số của cấu trúc được cho trong bảng 2.3.

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

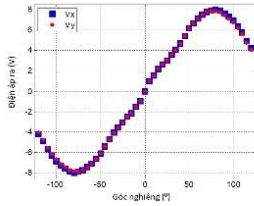


Hình 2. 16. Nguyên mẫu của cảm biến: a) Nhìn từ dưới lên; b) Nhìn từ trên xuống

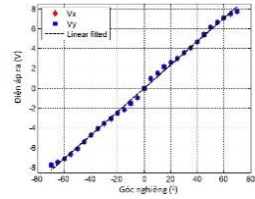


Hình 2. 17. Thiết lập thực hiện phép đo góc nghiêng





Hình 2. 18. Mối quan hệ giữa điện áp ra và góc nghiêng theo trục  $x$ ,  $y$



Hình 2. 19. Mối quan hệ giữa điện áp ra và góc nghiêng theo trục  $x$ ,  $y$  trong dải  $-70^0$  đến  $+70^0$

Qua đồ thị 2.18 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 2.19 cho thấy đồ thị này là tuyến tính.

Kết quả cũng cho thấy độ nhạy của cấu trúc khoảng  $115 \text{ mV}^0$ , độ phân giải khoảng  $\pm 0.5^0$  trong phạm vi tuyến tính  $[-70^0, +70^0]$ . 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 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.

## 2.4. Kết luận chương

Chương 2 đã trình bày kết quả nghiên cứu mới về cảm biến điện dung phát hiện độ nghiêng dựa trên hai pha lỏng/khí kiểu hình trụ và kiểu hình cầu. Các kết quả đã được công bố trong các công trình [1, 2, 3, 4, 5] tập trung vào hai nội dung chính:

### 1. Cấu trúc cảm biến kiểu hình trụ:

Trước khi thực hiện việc tối ưu hóa kích thước của các điện cực: cảm biến nghiêng được đề xuất có thể đo góc nghiêng trong  $[-60^0, +60^0]$  với độ nhạy  $16 \text{ mV}^0$  trên trục  $x$  và trong  $[-25^0, +25^0]$  với độ nhạy  $39,6 \text{ mV}^0$  trên trục  $y$ .

Sau khi thực hiện việc tối ưu hóa kích thước của các điện cực, cảm biến nghiêng được đề xuất có thể đo góc nghiêng trong  $[-70^{\circ}, +70^{\circ}]$  với độ nhạy  $12,4 \text{ mV}^{\circ}$  trên trục  $x$  và trong  $[-30^{\circ}, +30^{\circ}]$  với độ nhạy  $34,8 \text{ mV}^{\circ}$  trên trục  $y$ .

## 2. Cấu trúc cảm biến kiểu hình cầu:

Cảm biến nghiêng được đề xuất có thể đo góc nghiêng trong  $[-120^{\circ}, +120^{\circ}]$ . Cấu trúc có độ nhạy  $115 \text{ mV}^{\circ}$  trong khoảng  $[-70^{\circ}, +70^{\circ}]$  trên cả hai trục  $x, y$ .

## CHƯƠNG 3

### CẢM BIẾN ĐIỆN DUNG PHÁT HIỆN VI HẠT

**Tóm tắt:** Trong chương này, Luận án trình bày các kết quả nghiên cứu về phương pháp nghiên cứu, thiết kế, và chế tạo bộ phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc. Sau đó, kết hợp với thao tác điện di môi để xây dựng cấu trúc cảm biến điện dung nhằm mục đích phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng. Đối tượng phát hiện là tế bào ung thư cổ tử cung – Hela.

#### 3.1. Mở đầu

Phần này trình bày tổng quan về các phương pháp phát hiện tế bào ung thư trong hệ tuần hoàn.

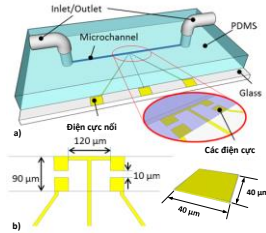
#### 3.2. Thiết bị vi sai phát hiện độ dẫn điện bằng cặp tụ không tiếp xúc để phát hiện vi hạt trong kênh vi lỏng

##### 3.2.1. Nguyên tắc làm việc của bộ phát hiện độ dẫn điện bằng điện dung vi sai của cặp tụ không tiếp xúc - DC<sup>4</sup>D (Differential capacitively coupled contactless conductivity detection)

Hình 3.1 cho thấy cấu trúc DC<sup>4</sup>D 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. Cấu trúc DC<sup>4</sup>D 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.

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

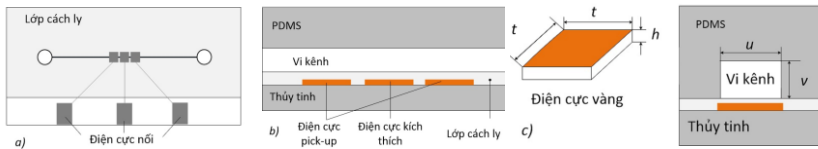
cực thay đổi. Mỗi loại vật liệu hay chất lỏng đều có hằng số điện môi khác nhau, nên khi có sự xuất hiện của một loại vật liệu hoặc một vật thể lạ trong môi trường đồng nhất nằm giữa các điện cực thì giá trị điện dung sẽ thay đổi tương ứng.



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 -  $DC^4D$

### 3.2.2. Chế tạo và thiết lập phép đo

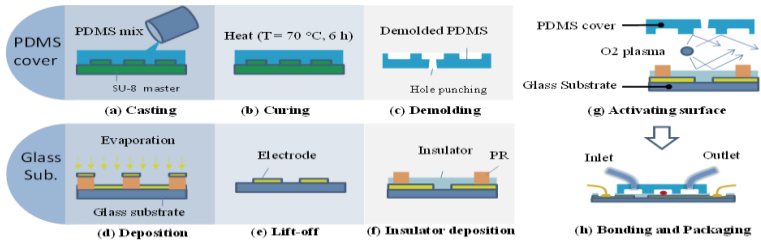
Polymer là vật liệu phổ biến sử dụng để chế tạo chip vi lỏng do chi phí thấp và dễ chế tạo. Chip vi lỏng được tạo thành bởi một lớp thủy tinh và lớp PDMS. Trên lớp thủy tinh gắn các điện cực bằng vàng và các điện cực nối và sau đó toàn bộ cấu trúc được phủ một lớp màng mỏng  $SiO_2$  để các điện cực không tiếp xúc trực tiếp với chất điện phân trong kênh dẫn lỏng. Kênh vi lỏng nằm trong lớp PDMS. Hình 3.2 mô tả cấu trúc của một chip vi lỏng. Thông số về kích thước của điện cực và vi kênh là :  $t=40 \mu m$ ;  $h=150 nm$ ;  $u=30 \mu m$ ;  $v=50 \mu m$ .



Hình 3. 2. Cấu trúc để xuất chip vi lỏng: a) Mặt trên; b) Mặt cắt ngang; c) Kích thước của các điện cực và kênh dẫn

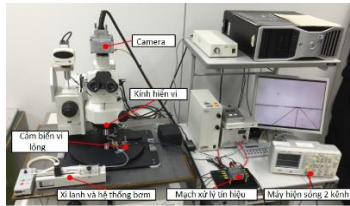
Hình 3.3 mô tả quá trình chế tạo cấu trúc. Sử dụng kỹ thuật đúc khuôn để chế tạo kênh vi mô PDMS. Chất tiền polyme PDMS và chất làm cứng (curing

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.



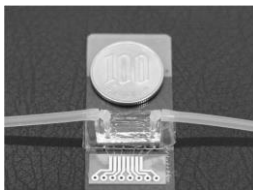
Hình 3. 3. Quy trình chế tạo chip DC<sup>4</sup>D: a) Tạo khuôn; b) Ủ nhiệt; c) Dỡ khuôn; d) Làm lắng đọng; e) Loại bỏ phần thừa; f) Lắng đọng lớp cách ly; g) Kích hoạt bề mặt; h) Hàn gắn chip.

Để thực hiện khảo sát hoạt động của chip vi lỏng DC<sup>4</sup>D ta thiết lập hệ thống đo lường thực nghiệm

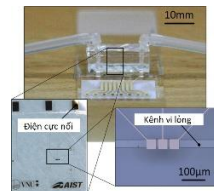


Hình 3. 4. Thiết lập hệ đo

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



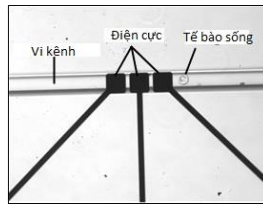
Hình 3. 5. Hình ảnh nguyên mẫu chip vi lỏng sau khi được chế tạo



Hình 3. 6. Chip vi lỏng được tích hợp bởi cấu trúc DC<sup>4</sup>D

Hình 3.5 là hình ảnh nguyên mẫu của chip vi lỏng sau khi được chế tạo. Hình 3.6 là hình ảnh đóng gói của chip vi lỏng, đầu vào và đầu ra kết nối với chip bằng cầu nối hình chữ L.

Hình 3.7 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  $25 \mu\text{m}$ , chiều rộng của vi kênh vi dẫn là  $30 \mu\text{m}$ . Chính vì vậy mà cấu trúc vi kênh này chỉ phù hợp cho việc phát hiện một tế bào S-180.



Hình 3. 7. Hình ảnh thu được của tế bào sống khi đi qua chip vi lỏng

### 3.3. Thao tác tế bào trong chất lỏng dựa trên nguyên tắc điện di điện môi - DEP

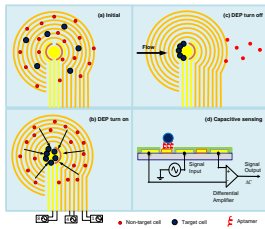
DEP là sự chuyển động của các hạt đặc trưng được đặt trong một điện trường không đồng nhất gây ra bởi hiệu ứng phân cực.

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.

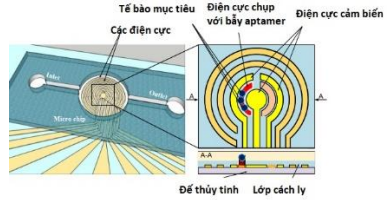
### 3.4. Phương pháp thực hiện phát hiện và bắt giữ tế bào HeLa

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.



Hình 3. 8. Phác họa của thiết bị vi lỏng cho các thao tác tế bào mục tiêu và phát hiện mục tiêu



Hình 3. 9. Sơ đồ vi mạch của cấu trúc

Khảo sát các thao tác phát hiện và bắt giữ tế bào mục tiêu trong một vi mạch được minh họa trong hình 3.8.

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

Giả sử rằng các tế bào hồng cầu có dạng hình cầu với đường kính là  $5 \mu\text{m}$ . Đối tế bào hồng cầu (Erythrocytes) có hằng số điện môi là 57, độ dẫn điện là  $0,52 \text{ S/m}$  và điện dung màng là  $0,9 \mu\text{m}$ . Tế bào HeLa có đường kính khoảng  $10 \mu\text{m}$  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.

Hình 3.9 cho thấy mô hình hình học và các thông số thiết kế của mô hình được đưa ra trong bảng 3.1. Vi thiết bị được thiết kế bởi ba phần chính: chất nền thủy tinh, điện cực tròn và lớp cách nhiệt.

*Bảng 3. 1. Thông số của cảm biến trong mô phỏng cấu trúc*

Thông số	Kích thước	Đơn vị
Bán kính của khoang cầu vi mô	600	$\mu\text{m}$
Chiều cao của khoang cầu vi mô	100	$\mu\text{m}$
Độ rộng của điện cực	30	$\mu\text{m}$
Khoảng cách giữa các điện cực	30	$\mu\text{m}$
Bán kính của điện cực trung tâm	90	$\mu\text{m}$
Độ rộng của điện cực chụp	30	$\mu\text{m}$

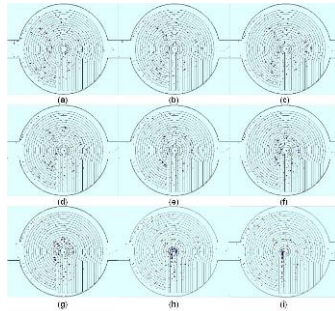
Bán kính và thể tích của buồng làm việc lần lượt là  $600 \text{ nm}$  và  $113 \text{ nL}$ . Các vi điện cực tròn tạo ra tám đôi thao tác DEP với các điện cực trung tâm hình kẹo lollipop. Kết hợp các điện cực trung tâm với hai cặp đối xứng điện cực ở hai bên tạo ra một cấu trúc DC<sup>4</sup>D.

*Bảng 3. 2. 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 ( $\epsilon_0$ )	57	47,5
Đường kính trong ( $\mu\text{m}$ )	5	10
Độ dẫn điện của màng	$10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-7}$
Hằng số điện môi của màng ( $\epsilon$ )	4,44	6
Độ dày của màng ( $\text{nm}$ )	9	8
Mật độ tế bào (tế bào/ $\text{mL}$ )	$3,25 \times 10^6$	$2,5 \times 10^5$
Tham số Clausius-Mossotti	0,91	1

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 được thể hiện trong Bảng 3.2. 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 ( $(\epsilon_r = 78; \sigma = 1,76.10^{-3} S/m)$ ). Đối tượng được mô phỏng là tế bào RBC và HeLa.

Kết quả mô phỏng của các tế bào HeLa trong mẫu máu dưới sự tác động của điện trường có biên độ 16V với tần số 1MHz dịch chuyển theo từng bước điện trường được thể hiện trong hình 3.3. 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)



*Bảng 3. 3. Kết quả mô phỏng về sự dịch chuyển của các tế bào Hela dưới sự tác động của điện trường bước*

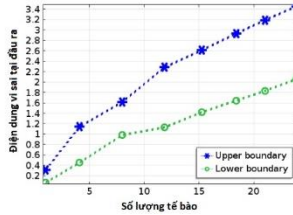
Các tế bào HeLa (tế bào mục tiêu) và các tế bào máu khác (tế bào không phải mục tiêu) được phân phối ngẫu nhiên trên bề mặt. Mỗi luân phiên điện trường trên các cặp điện cực để cả hai loại tế bào bị hút bởi lực DEP sẽ di chuyển đến khu vực có gradient điện trường cao. Tuy nhiên, do tính chất của tế bào 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

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.

Các kết quả mô phỏng trong hình 3.4 chỉ ra mối quan hệ giữa giá trị điện dung vi sai ở đầu ra và số lượng tế bào bắt được.



*Bảng 3. 4. Mối quan hệ giữa điện dung vi sai và số lượng tế bào nhận biết được.*

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.

### 3.5. Kết luận chương

Chương 3 của luận án đã trình bày kết quả chính và mới đã được công bố trong các công trình [6, 7] là:

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<sup>4</sup>D). Các kết quả cho thấy cấu trúc được đề xuất có khả năng phát hiện được các vật thể siêu nhỏ bất kể chúng dẫn điện (thiếc) hoặc không dẫn điện (không khí, SiO<sub>2</sub>).

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<sup>4</sup>D) và thao tác điện di môi (DEP). Thiết bị này sử dụng một dãy các điện cực tròn và kỹ thuật điện di để thao tác các tế bào HeLa đến khu vực cảm biến. Các tế bào bị bắt và phát hiện bởi một cảm biến điện dung vi sai. Thiết bị 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.

## KẾT LUẬN

### Những đóng góp chính của luận án:

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 trong kênh vi lỏng. 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. 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.

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

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  $[-70^0 \div +70^0]$ . Độ nhạy của cấu trúc đạt khoảng  $115 \text{ mV}^{\circ}$  và độ phân giải là  $\pm 0,5^0$ .

2) 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 và thao tác điện di 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  $3,4 \text{ pF}$ , 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 vi sai áp dụng để phát hiện độ nghiêng cũng như phát hiện vi hạt cho kênh vi lỏng 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...

## CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

[1]. **Ha Tran Thi Thuy**, Tiep Dang Dinh, Tuan Vu Quoc, Thinh Pham Quoc, Masahiro Aoyagi, My Bui Ngoc, Van Thanh Dau, Tung Thanh Bui (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]. **Ha Thuy Tran Thi**, Hai Nguyen Dac, Tuan Vu Quoc, Thinh Pham Quoc, An Nguyen Ngoc, Trinh Chu Duc, and Tung Thanh Bui (2019), "Study on design optimization of a capacitive tilt angle sensor", IETE Journal of Research, doi.org/10.1080/03772063.2019.1649214. (SCIE)

[3]. **Trần Thị Thúy Hà**, Nguyễn Đắc Hải, Bùi Thanh Tùng (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]. **Trần Thị Thúy Hà**, Khuất Đức Dương, Nguyễn Đắc Hải (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]. **Ha Thuy Tran Thi**, Dung Nguyen Ngoc, Hai Nguyen Dac, Le Van Thai, An Nguyen Ngoc, Tung Thanh Bui (2018), "A 3D Printed Two-axis Tilt Angle Capacitive Sensor", 2018 IEEE Seventh International Conference on Communications and Electronics, pp 191-195.

[6]. **T.T.H. Tran**, N.V. Nguyen, N.C. Nguyen, T.T. Bui, T. Chu Duc (2016), "Biological Microparticles Detection based on Differential Capacitive Sensing and Dielectrophoresis Manipulation", ATC 16, Hà nội, pp. 297-301.

[7]. **Ha Tran Thi Thuy**, Loc Do Quang, Van Thanh Dau, Ngan Nguyen Thi Kim, Chieu Le Van, Masahiro Aoyagi, Katsuya Kikuchi, Tung Thanh Bui (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.