

Cảm biến độ dẫn không dây thụ động phát hiện và phân tích độ dẫn dòng chảy vi lỏng

A Wireless Passive Conductivity Detector for Fluidic Conductivity Analyzation in Microchannel

**Hoàng Bảo Anh¹, Nguyễn Cảnh Việt², Trần Thị Thúy Hà³, Phạm Văn Thành²,
Đỗ Trung Kiên², Chử Đức Trình¹, Bùi Thanh Tùng¹, Đỗ Quang Lộc^{2*}**

¹ Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc Gia Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

² Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc Gia Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

³ Học viện Bưu chính Viễn thông, Hà Nội, Việt Nam

*Email: locdq@hus.edu.vn

Tóm tắt

Độ dẫn điện là một trong những tham số quan trọng của các dung dịch, đặc biệt là các dung dịch điện ly. Việc phát hiện độ dẫn của dung dịch trong dòng chảy vi lỏng đóng vai trò rất quan trọng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu và ứng dụng công nghiệp. Để tránh các hạn chế gặp phải trong kỹ thuật cảm biến độ dẫn thông thường, nghiên cứu này sử dụng cấu trúc cảm biến thụ động không dây phát hiện độ dẫn thụ động ứng dụng cho việc phát hiện và phân tích độ dẫn dung dịch trong kênh dẫn vi lưu. Hoạt động của hệ thống được phân tích, tính toán mô phỏng để tối ưu thiết kế trước khi tiến hành thực nghiệm. Nghiên cứu cũng đã chế tạo hệ thống cảm biến đề xuất thành công và thực hiện thực nghiệm đo nồng độ một số dung dịch muối KCl dựa trên thay đổi độ dẫn dung dịch. Kết quả thực nghiệm cho thấy khi nồng độ dung dịch KCl tăng dần từ 10 mM đến 1 M, tần số cộng hưởng tương ứng của khung cộng hưởng cảm biến sẽ giảm từ 64,7 MHz xuống 58,6 MHz. Sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng vào khoảng cách giữa hai cuộn cảm cũng được khảo sát, phân tích và đánh giá trong báo cáo này. Việc tích hợp kỹ thuật cảm biến không dây thụ động LC với cảm biến phát hiện độ dẫn cho hệ thống kênh vi lưu có thể được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu, ngành công nghiệp khác nhau như vật lý, hóa học, đặc biệt là trong các ứng dụng chip cảm biến y sinh.

Từ khóa: Hệ thống cảm biến độ dẫn điện, cảm biến không dây thụ động LC, vi lỏng

Abstract

Electrical conductivity is one of the main parameters of an electrolyte solution. Fluidic conductivity detection and analyzation is very important in many academic research and industrial applications. In order to avoid the issues of the conventional sensing technique, this study utilizes the wireless passive conductivity detector for fluidic conductivity analyzation in the microchannel. The operation of the proposed structure is designed, simulated and then validated by experiments. The experimental results show that the resonance frequency of the sensor decreases from 64.7 MHz to 58.6 MHz according to the rise of KCl concentration in the fluidic channel from 10 mM to 1 M. The dependence of resonance frequency on the distance between inductors was also implemented and analyzed in this work. The integration of the LC passive sensing technique in microfluidic conductivity detector can be utilized in various academic research, industrial application, especially in biosensor applications.

Keywords: Conductivity detector, LC passive sensing technique, microfluidic

1. Giới thiệu

Độ dẫn điện là một trong số những tham số quan trọng của các dung dịch, đặc biệt là các dung dịch điện ly. Ngày nay, việc đo độ dẫn điện của các dung dịch điện ly đóng vai trò rất quan trọng và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu và các ngành công nghiệp như công nghiệp chế biến, thực phẩm, phân tích và kiểm soát chất lượng nước. Việc xác định hàm lượng các chất có trong dung dịch giúp ta kiểm soát và đánh giá được chất lượng dung dịch trong pha chế hóa chất, đánh giá độ nhiễm bẩn của

nước và kiểm tra chất lượng của các loại sản phẩm, nước uống trong công nghiệp thực phẩm.

Trong kỹ thuật phát hiện độ dẫn điện của dung dịch truyền thống, các điện cực cảm biến thường tiếp xúc trực tiếp với dung dịch chất lỏng hoặc dung dịch điện ly. Việc tiếp xúc trực tiếp giữa các điện cực kim loại và dung dịch điện ly có thể dẫn tới một số tác động tiêu cực như hiện tượng phân cực trong dung dịch, ăn mòn điện hóa trên bề mặt điện cực. Những hiện tượng này đều có thể ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả đo và có thể làm thay đổi cấu trúc bề mặt điện cực kim loại trong dung dịch dẫn tới những sai lệch trong việc đo lường và thu thập kết quả. Vì vậy, việc thực hiện đo độ dẫn bằng phương pháp truyền thống như trên gặp phải nhiều hạn chế và khó khăn trong việc áp dụng vào các ứng dụng thực tế [1]. Để tránh

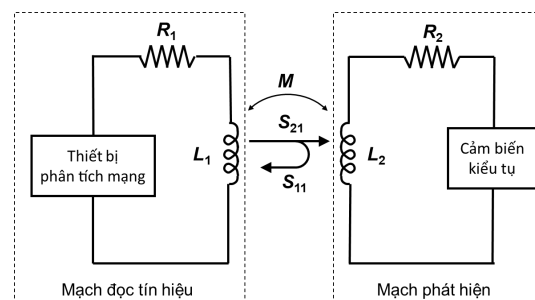
các hạn chế đó, một số nghiên cứu đã đề xuất cấu trúc cảm biến không tiếp xúc ứng dụng trong phát hiện độ dẫn dung dịch và phát hiện dòng chảy lỏng dựa trên nguyên lý cảm biến điện dung. Tuy nhiên, độ nhạy của các cảm biến thường thấp, đặc biệt trong các trường hợp dung dịch có độ dẫn cao do sự chênh lệch lớn giữa điện trở dung dịch so với dung kháng của cảm biến [2]. Vào năm 2016, nhóm nghiên cứu của Hải và cộng sự đã đưa ra cấu trúc cảm biến cặp điện dung không tiếp xúc vi sai ứng dụng trong phát hiện độ dẫn có thể phát hiện độ dẫn của cả dung dịch có độ dẫn điện thấp và độ dẫn điện cao [3]. Đồng thời, nghiên cứu cũng đã ứng dụng cấu trúc vi sai được đề xuất trong việc phát hiện các vật thể lạ như bọt khí, hạt nhựa và hạt thiếc di chuyển trong dòng chảy chất lỏng.

Kỹ thuật cảm biến sử dụng phương pháp truyền nhận sóng vô tuyến đã được nhiều nhóm nghiên cứu phát triển như cảm biến RFID, cảm biến không dây thụ động LC, ... Trong khi phương pháp RFID hoạt động dựa trên chip chứa mã định danh, phương pháp cảm biến không dây thụ động LC hoạt động dựa trên phương pháp phát hiện tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC. Trong nghiên cứu này, kỹ thuật cảm biến không dây thụ động LC được kết hợp cùng cấu trúc cảm biến phát hiện độ dẫn truyền thống để đưa ra một hệ thống cảm biến độ dẫn mới. Cấu trúc kết hợp này có ưu điểm hơn so với kỹ thuật thông thường nhờ vào việc phát hiện độ dẫn dung dịch dựa trên việc phân tích tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến. Các cảm biến không dây thụ động (LC) lần đầu được Collins đề xuất vào đầu năm 1967 [12], tác giả đã sử dụng một cặp cuộn cảm hình xoắn ốc đồng phẳng tạo ra một cấu trúc cảm biến áp suất thu nhỏ được cấy vào mắt để đo áp lực nội nhãn. Tuy nhiên, sự phát triển của cấu trúc cảm biến không dây thụ động LC vẫn chưa thu hút được nhiều sự chú ý của các nhóm nghiên cứu trên thế giới cho tới những năm 1990. Cùng với sự ra đời và phát triển hệ thống vi cơ điện tử (MEMS), cấu trúc cảm biến thụ động không dây LC đã được nghiên cứu và tích hợp cho nhiều ứng dụng cảm biến đo lường khác nhau như đo áp suất, độ ẩm, nhiệt độ, độ biến dạng, dòng chảy, các phép đo hóa học, v.v. [13-16]. Cấu trúc cảm biến này có một số ưu điểm nổi bật như kích thước và khối lượng nhỏ, chi phí chế tạo thấp, độ nhạy lớn và có tính di động cao.

Cấu trúc cảm biến cặp điện dung không tiếp xúc phát hiện độ dẫn (Capacitively coupled contactless conductivity detection – C4D) đã được đề xuất một cách độc lập bởi hai nhóm nghiên cứu vào năm 1998 [4,5]. Một số nghiên cứu liên quan đến việc ứng dụng cấu trúc cảm biến C4D trong các kênh lỏng với kích thước milimet và micromet đã được thực hiện và cải tiến trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu, bao gồm: phát hiện pha dầu và khí trong dòng chảy chất lỏng [3,6], mẫu sinh học [7,8], hệ thống vi lỏng [9] và trong các ứng dụng phân tích thực phẩm [10]. Mặc dù được

ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, cấu trúc C4D truyền thông vẫn gặp phải một số hạn chế kỹ thuật. Nhiều phiên bản cải tiến cấu trúc C4D truyền thống để khắc phục các hạn chế đã được nghiên cứu, phát triển như việc sử dụng lỏng nổi đất hoặc hiệu ứng cộng hưởng song song để giảm thiểu điện dung ký sinh, sử dụng phương pháp vi sai để loại trừ nhiễu đồng pha hoặc sử dụng phương pháp cộng hưởng để đo độ dẫn của dung dịch trong kênh lỏng [1,3,11].

Báo cáo đề xuất tích hợp cấu trúc cảm biến cảm biến không dây thụ động LC trong hệ thống vi lưu bao gồm hai điện cực được sử dụng kết hợp với cuộn cảm phát hiện để tạo ra mạch phát hiện chứa khung cộng hưởng cảm biến thụ động LC nhằm phát hiện sự thay đổi tính chất điện trong dòng chảy chất lỏng cũng như của độ dẫn của chất lỏng [17]. Nguyên lý hoạt động của cấu trúc đề xuất được thể hiện trong Hình 1. Bất cứ sự thay đổi nào về tính chất điện như độ dẫn điện của dung dịch lỏng chảy trong kênh cũng sẽ ảnh hưởng đến điện dung của tụ điện cảm biến, sau đó dẫn đến sự thay đổi về tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC. Sự thay đổi tần số cộng hưởng này có thể được đo lường và ghi nhận bằng cách sử dụng thiết bị phân tích mạng (Network Analyzer) để phân tích hệ số phản xạ S_{11} dựa trên năng lượng phản xạ từ mạch phát hiện về mạch đọc tín hiệu.



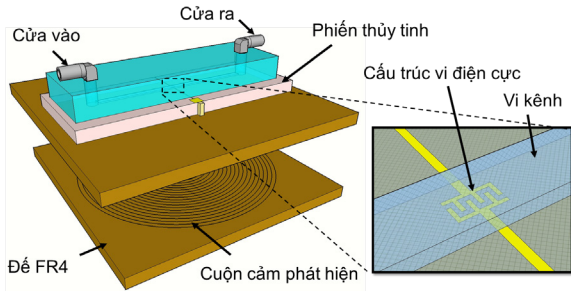
Hình 1. Nguyên lý hoạt động của hệ thống cảm biến đề xuất

Trong báo cáo này trước tiên nguyên lý hoạt động của hệ thống cảm biến đề xuất sẽ được phân tích chi tiết. Tiếp đó, báo cáo trình bày về thiết kế của hệ thống cảm biến, kết quả mô phỏng hoạt động của cảm biến sử dụng phương pháp các phần tử hữu hạn và các kết quả kiểm chứng thực nghiệm. Các kết quả ghi nhận được trong báo cáo đặt nền tảng cho việc tích hợp cấu trúc phát hiện và phân tích độ dẫn điện của dung dịch lỏng tích hợp trong các ứng dụng sử dụng hệ thống vi lưu.

2. Thiết kế và mô phỏng cảm biến thụ động không dây phát hiện độ dẫn

Hệ thống cảm biến được đề xuất trong nghiên cứu này bao gồm hai thành phần chính: mạch đọc tín hiệu cấu thành bởi một cuộn cảm đồng phẳng hình xoắn ốc được ghép với máy phân tích mạng Network Analyzer và mạch phát hiện là một cuộn cảm đồng

phẳng hình xoắn ốc được ghép nối tiếp với một cấu trúc cảm biến tạo thành một khung cộng hưởng cảm biến LC của mạch phát hiện. Hình 2 minh họa cấu trúc đề xuất của cảm biến không dây thụ động LC để phát hiện độ dẫn dòng chất lỏng trong kênh dẫn. Hệ thống cảm biến bao gồm một tụ điện được tạo ra từ hai vi điện cực trong kênh dẫn lỏng và hai cuộn cảm có chức năng truyền và nhận bức xạ điện từ.



Hình 2. Cảm biến thụ động LC đề xuất để phát hiện độ dẫn dòng chảy lỏng trong vi kênh tích hợp vi điện cực.

Trong cấu trúc cảm biến C4D tích hợp kỹ thuật cảm biến không dây LC, trở kháng tương đương của mạch phát hiện là [17]:

$$Z_{eq} = R_2 + \frac{R_s C_w^2}{(R_s C_p C_w \omega)^2 + (C_w + C_p)^2} + j \left[\omega L_2 - \frac{C_w + C_p + R_s^2 C_w^2 C_p \omega^2}{\omega^3 (R_s C_p C_w)^2 + \omega (C_w + C_p)^2} \right] \quad (1)$$

trong đó, C_w là điện dung tạo bởi điện cực và dung dịch bên trong kênh dẫn lỏng, C_p là điện dung ký sinh giữa hai điện cực cảm biến, R_s là điện trở dung dịch, j là đơn vị ảo, ω là tần số tín hiệu. Tại tần số cộng hưởng, thành phần dung kháng và cảm kháng trong trở kháng toàn phần của mạch phát hiện sẽ triệt tiêu lẫn nhau. Nói cách khác, tần số cộng hưởng của mạch phát hiện sẽ phụ thuộc thành phần ảo trong phương trình (1). Khi xét thành phần ảo của trở kháng toàn phần, các giá trị điện dung C_w , điện dung ký sinh C_p và điện cảm L_2 được coi như không đổi. Vì vậy, tần số cộng hưởng sẽ phụ thuộc trực tiếp vào độ dẫn dung dịch R_s .

Để kiểm tra hoạt động của cấu trúc cảm biến được đề xuất, các mô hình mô phỏng cấu trúc cảm biến đã được thực hiện bằng cách sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics® - gói phần mềm phân tích phần tử hữu hạn (FEM). Trong các mô phỏng, mô-đun RF được sử dụng để thực hiện tính toán phân tích hệ số phản xạ S_{11} trên cuộn cảm đọc tín hiệu khi thay đổi các môi trường lỏng khác nhau trong kênh dẫn. Cấu trúc hình học của mô hình mô phỏng được xây dựng dựa theo cấu trúc cảm biến thụ động đề xuất để phát hiện độ dẫn chất lỏng trong kênh dẫn lỏng. Các tham số vật lý mô phỏng cho kênh, môi trường chất lỏng, điện cực cảm biến và cấu trúc cuộn cảm được cung cấp trong Bảng 1. Bảng 2 cung cấp các thông số

vật liệu được sử dụng trong mô phỏng. Cấu trúc các cuộn cảm được xây dựng dưới dạng hình xoắn ốc đồng phẳng trên cả cuộn cảm đọc và cuộn cảm phát hiện. Các đế cuộn cảm sử dụng vật liệu FR4.

Bảng 1. Các tham số hình học của cấu trúc cảm biến để mô phỏng.

Tham số	Giá trị
Bán kính cuộn cảm ngoài cùng – R	15 mm
Số vòng – n	12
Chiều rộng vòng cuộn cảm – w	0.5 mm
Độ cao kênh lỏng	100 μ m
Độ rộng kênh lỏng	1 mm

Bảng 2. Tham số vật liệu cho mô phỏng.

Vật liệu	Độ thấm tương đối	Hằng số điện môi	Độ dẫn điện (S/m)
Không khí	1	1	0
FR4	1	4.5	0.004
Nước DI	1	80.1	5.5×10^{-6}
Đồng	1	1	6×10^7

3. Thiết lập hệ đo

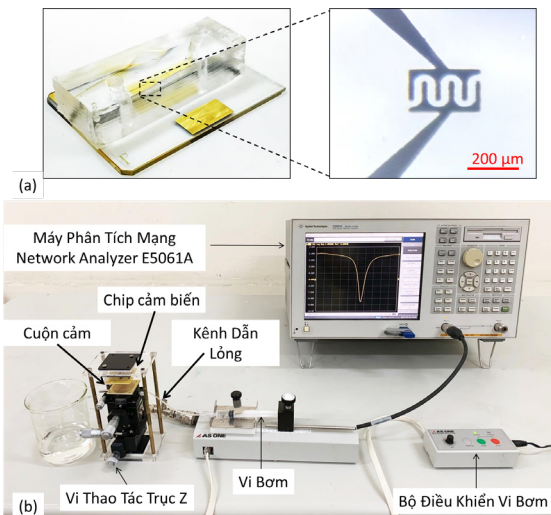
3.1. Chuẩn bị mẫu

Cấu trúc vi điện cực được thực hiện chế tạo dựa trên kỹ thuật vi chế tạo tiêu chuẩn. Hai lớp kim loại Chromium và vàng được tạo thành trên đế thủy tinh thông qua phương pháp bốc bay. Các cấu trúc điện cực, dây dẫn được tạo hình trên phiến thông qua phương pháp quang khắc sử dụng chất cản quang S1813. Bên cạnh đó, cấu trúc khuôn vi kênh cũng được chế tạo sử dụng chất cản quang SU-8 được tạo hình trên phiến Silic thông qua quá trình quang khắc. Vật liệu Polydimethylsiloxane (PDMS) được sử dụng trong quá trình đổ khuôn vi kênh lỏng trên cấu trúc SU-8 đã được chế tạo. Cấu trúc vi điện cực được cách ly với môi trường kênh dẫn lỏng bằng cách sử dụng một lớp chất cản quang được quay phủ trên bề mặt phiến thủy tinh đã tạo hình điện cực. Kết quả chế tạo chip vi lưu tích hợp điện cực được thể hiện trên Hình 3(a). Cuộn cảm đọc tín hiệu và cuộn cảm phát hiện có cùng cấu trúc và được chế tạo trên bảng mạch in FR4 với kích thước 3,5 cm x 3,5 cm. Bán kính ngoài của cuộn cảm phẳng xoắn ốc gồm mười hai vòng là 15 mm. Dung dịch lỏng được sử dụng trong các thí nghiệm là nước DI và dung dịch KCl. Dung dịch KCl với nồng độ khác nhau (bao gồm các nồng độ 10 mM, 20 mM, 50 mM, 100 mM, 200 mM, 500 mM và 1 M) được sử dụng làm dung dịch điện ly tương ứng với độ dẫn điện khác nhau. Các dung dịch được bơm vào trong kênh dẫn lỏng bằng cách sử dụng một hệ thống vi bơm (AS ONE – CT10). Một ống silicon có bán kính bên ngoài và bên trong lần lượt là

1,5 mm và 0,4 mm được sử dụng làm kênh dẫn chất lỏng tới hệ thống vi kênh.

3.2. Thiết lập hệ đo

Hình 3 (b) thể hiện hình ảnh hệ đo được thiết lập thực tế. Hệ số phản xạ S_{11} được xác định bằng máy phân tích mạng (Agilent E5061A ENA) để xác định tần số cộng hưởng của mạch phát hiện chứa cấu trúc cảm biến. Chương trình ứng dụng Visual Basic Application tích hợp trong trình điều khiển của máy phân tích mạng được sử dụng để theo dõi và ghi nhận lại sự thay đổi tần số cộng hưởng tương ứng với sự thay đổi môi trường trong kênh dẫn lỏng. Hệ thống điều khiển vi bơm được sử dụng để kiểm soát tốc độ dòng chảy chất lỏng trong kênh dẫn lỏng. Các điện cực cảm biến của cấu trúc được ghép nối tiếp với cuộn cảm phát hiện để tạo thành khung cộng hưởng cảm biến LC. Ngoài ra, để kiểm soát khoảng cách tương đối giữa hai cuộn cảm trong hệ đo, một bộ vi thao tác trục Z được sử dụng để thay đổi chiều cao của cuộn cảm đọc tín hiệu trong khi vẫn giữ vị trí của mạch phát hiện cố định.



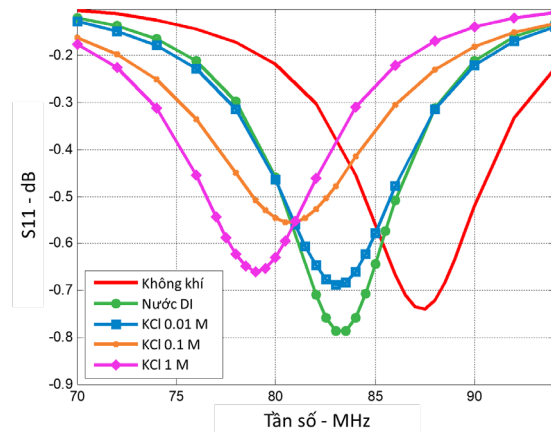
Hình 3. Thiết lập hệ đo khảo sát hoạt động của hệ thống cảm biến đề xuất: (a) Chip vi lưu đã được chế tạo tích hợp cấu trúc vi điện cực răng lược; (b) Hệ đo thiết lập thực tế.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả mô phỏng

Hình 4 biểu diễn kết quả mô phỏng cho sự phụ thuộc của hệ số phản xạ vào tần số tín hiệu trong các trường hợp các kênh lỏng khác nhau tương ứng với dải tần số tín hiệu từ 70 MHz đến 100 MHz. Kết quả tính toán mô phỏng cho thấy tần số cộng hưởng của cảm biến trong trường hợp kênh chứa đầy không khí và nước DI lần lượt tương ứng là 87,5 MHz và 83 MHz. Các hệ số phản xạ S_{11} tương ứng với các tần số cộng hưởng này lần lượt là -0,74 dB và -0,79 dB. Bên cạnh đó, các dung dịch với độ dẫn điện lần lượt là 0,1413 S/m, 1,285 S/m, 11,13 S/m tương

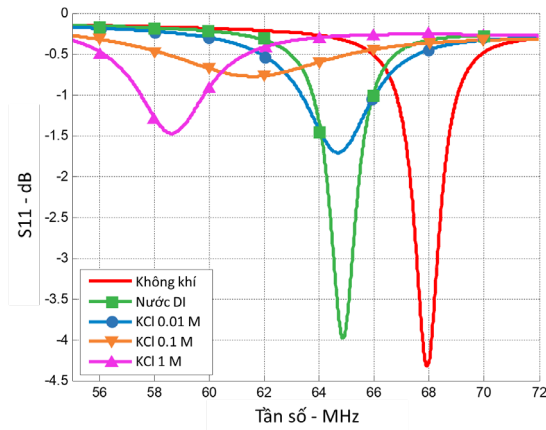
ứng với độ dẫn điện của dung dịch KCl ở nồng độ 10 mM, 100 mM và 1 M cũng được thực hiện mô phỏng để khảo sát sự thay đổi tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy tần số cộng hưởng là 83 MHz và 79 MHz khi độ dẫn của dung dịch được mô phỏng lần lượt tương ứng là 0,1413 S/m và 11,13 S/m ứng với dung dịch KCl nồng độ 10 mM và 1 M. Có thể thấy rằng, khi độ dẫn của dung dịch tăng lên, tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC giảm đi.



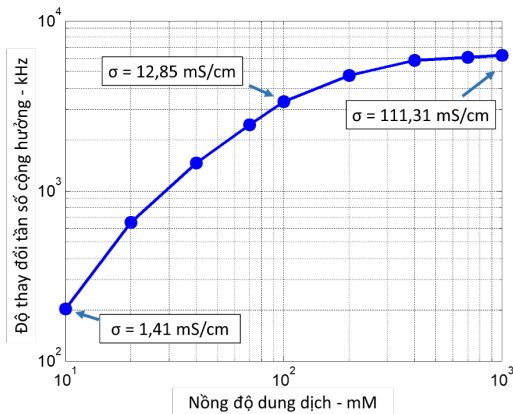
Hình 4. Kết quả mô phỏng biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số phản xạ S_{11} vào tần số trong trường hợp kênh chứa dung dịch KCl với các nồng độ khác nhau.

4.2. Kết quả đo thực nghiệm

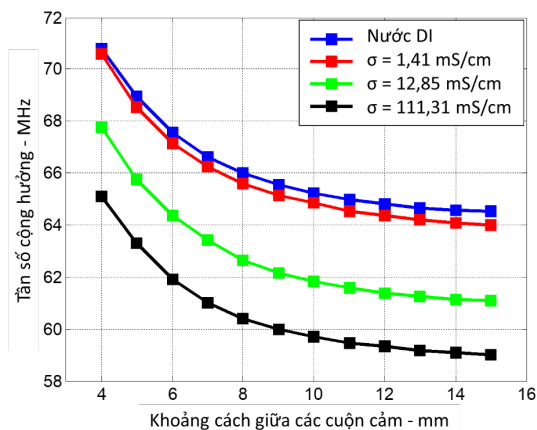
Dựa trên các kết quả tính toán mô phỏng, cấu trúc cảm biến đề xuất đã được chế tạo thực nghiệm thành công. Hình 5 thể hiện kết quả đo hệ số phản xạ S_{11} trong dải tần số tín hiệu từ 55 MHz đến 72 MHz tương ứng với các trường hợp khi kênh dẫn lỏng được làm đầy bởi các môi trường khác nhau như không khí, nước DI, dung dịch KCl với các nồng độ từ 10 mM, 100 mM và 1 M. Tần số cộng hưởng của cấu trúc cảm biến đề xuất có thể được rút ra từ tần số tín hiệu mà tại đó, giá trị hệ số phản xạ S_{11} đạt giá trị tối thiểu. Các kết quả thực nghiệm của tần số cộng hưởng trong kênh không khí và kênh nước DI lần lượt là 67,9 MHz và 64,9 MHz. Sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng và hệ số phản xạ S_{11} tại tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC với nồng độ KCl trong kênh chất lỏng cũng được thể hiện trong Hình 5. Khi nồng độ dung dịch KCl tăng dần từ 10 mM đến 1 M, tần số cộng hưởng tương ứng của kênh lỏng sẽ giảm từ 64,7 MHz xuống 58,6 MHz. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ số phản xạ S_{11} giảm mạnh khi có mặt KCl trong khi kết quả mô phỏng tương ứng với các độ dẫn dung dịch sử dụng trong thực nghiệm. Giá trị hệ số phản xạ ghi nhận từ kết quả mô phỏng không thay đổi nhiều như kết quả ghi nhận thực nghiệm. Kết quả này có thể do sự sai lệch giữa quá trình chế tạo chip vi lưu và cuộn cảm so với thiết kế được thực hiện mô phỏng.



Hình 5. Kết quả thực nghiệm biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số phản xạ S_{11} với môi trường kênh dẫn.



Hình 6. Sự phụ thuộc của độ thay đổi tần số cộng hưởng so với nồng độ dung dịch KCl trong kênh.



Hình 7. Sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến với khoảng cách giữa các cuộn cảm ứng với các độ dẫn điện của dung dịch khác nhau.

Sự thay đổi tần số cộng hưởng khi kênh dẫn được bơm đầy dung dịch KCl với nồng độ khác nhau, lần lượt là 10 mM, 50 mM, 100 mM, 500 mM và 1 M so với kênh dẫn được làm đầy bởi nước DI được thể

hiện trong Hình 6. Kết quả thực nghiệm thu nhận được cho thấy, tần số cộng hưởng của mạch phát hiện ứng với các nồng độ dung dịch KCl. Nhìn chung, khi nồng độ dung dịch KCl tăng thì tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC giảm tương ứng. Ứng với kênh dẫn chứa dung dịch KCl có nồng độ thay đổi từ 10 mM đến 1 M, độ thay đổi tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến so với kênh dẫn chứa dung dịch nước DI thay đổi từ 0,2 kHz tới 6,2 KHz. Như vậy, dựa vào độ thay đổi tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến, độ dẫn của dung dịch trong kênh dẫn lỏng có thể được xác định. Ngoài ra, ứng với các nồng độ dung dịch KCl khác nhau, khoảng cách giữa các cuộn cảm cũng được thay đổi để khảo sát độ thay đổi tần số cộng hưởng ứng với từng khoảng cách giữa các cuộn cảm khác nhau. Hình 7 cho thấy sự phụ thuộc của tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến LC và nồng độ dung dịch trong kênh dẫn vào khoảng cách giữa các cuộn cảm sử dụng trong cấu trúc đề xuất. Trong nghiên cứu này, khoảng cách giữa hai cuộn cảm được khảo sát trong khoảng 4 mm đến 15 mm. Tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến trong trường hợp kênh dẫn lấp đầy bởi nước DI giảm từ 70,8 MHz xuống 64,6 MHz ứng với khoảng cách giữa các cuộn cảm tăng từ 4 mm đến 15 mm. Có thể thấy rằng, khi khoảng cách giữa các cuộn cảm tăng dần, tần số cộng hưởng của khung cộng hưởng cảm biến giảm dần ứng với cả trường hợp kênh dẫn được lấp đầy bởi nước DI và dung dịch KCl với các nồng độ khác nhau ứng với các độ dẫn dung dịch khác nhau.

Như vậy, qua các kết quả thu được từ mô phỏng và khảo sát thực nghiệm, tần số cộng hưởng thay đổi theo từng dung dịch cũng như nồng độ của dung dịch đó. Trong báo cáo này, các nghiên cứu được thực hiện nhằm mục đích thử nghiệm, kiểm tra hoạt động của kỹ thuật phát hiện độ dẫn không tiếp xúc sử dụng phương pháp cảm biến không dây thụ động LC. Báo cáo đã thực hiện mô phỏng hoạt động hệ thống và kiểm chứng bằng các phép đo thực nghiệm cho thấy kết quả rất khả quan trong các ứng dụng tích hợp hệ thống vi lưu. Với việc tần số cộng hưởng phụ thuộc vào các môi trường khác nhau, hệ thống có thể được sử dụng để phát hiện được các đối tượng lạ có trong kênh dẫn vi lỏng. Cấu trúc cảm biến đề xuất có thể được tiêu hình hóa để áp dụng cho các ứng dụng phát hiện đối tượng sinh học như các tế bào trong các bài toán xét nghiệm và phân tích y sinh [18-20].

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, cấu trúc phát hiện độ dẫn và kỹ thuật cảm biến thụ động LC đã được kết hợp để đưa ra một hệ thống cảm biến độ dẫn không dây thụ động sử dụng trong việc phát hiện và phân tích độ dẫn của các dòng chất lỏng khác nhau như nước DI, dung dịch KCl với các nồng độ khác nhau từ 10 mM đến 1 M. Việc tích hợp kỹ thuật cảm biến không dây thụ động LC với cảm biến phát hiện độ dẫn cho cấu trúc kênh dẫn vi lưu và vi cảm biến có thể được ứng

dụng trong nhiều lĩnh vực nghiên cứu, ngành công nghiệp khác nhau như vật lý, hóa học, đặc biệt là trong các ứng dụng y sinh. Với cách tiếp cận bằng phương pháp không dây, hệ thống cảm biến đề xuất trong nghiên cứu này cho thấy sự phù hợp và tính ứng dụng cao trong các chip cảm biến dùng một lần trong lĩnh vực y tế và các lĩnh vực đo lường khác.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Khoa học Tự nhiên trong đề tài mã số TN.19.04.

Tài liệu tham khảo

- [1] Z. Huang, J. Long, W. Xu, H. Ji, B. Wang, and H. Li, Design of capacitively coupled contactless conductivity detection sensor, *Flow Meas. Instrum.* 27 (2012) 67–70.
- [2] D. Strazza, M. Demori, V. Ferrari, and P. Poesio, Capacitance sensor for hold-up measurement in high-viscous-oil/conductive-water core-annular flows, *Flow Meas. Instrum.* 22 (2011) 360–369.
- [3] N. Dac, H. Vu, Q. Tuan, D. Quang, L. Nguyen, and H. Hai, Differential C 4 D sensor for conductive and non - conductive fluidic channel, *Microsyst. Technol.* (2015).
- [4] D. Fracassi Silva J.A. and L. Do C.L., An Oscillometric Detector for Capillary Electrophoresis, *Anal.Chem.* 70 (1998) 4339–4343.
- [5] A. J. Zemann, E. Schnell, D. Volgger, and G. K. Bonn, Contactless Conductivity Detection for Capillary Electrophoresis, *Anal. Chem.* 70 (1998) 563–567.
- [6] M. Demori, V. Ferrari, D. Strazza, and P. Poesio, A capacitive sensor system for the analysis of two-phase flows of oil and conductive water, *Sensors Actuators, A Phys.* 163 (2010) 172–179.
- [7] E. M. Abad-Villar, J. Tanyanyiwa, M. T. Fernández-Abedul, A. Costa-García, and P. C. Hauser, Detection of Human Immunoglobulin in Microchip and Conventional Capillary Electrophoresis with Contactless Conductivity Measurements, *Anal. Chem.* 76 (2004) 1282–1288.
- [8] J. Tanyanyiwa, E. M. Abad-Villar, and P. C. Hauser, Contactless conductivity detection of selected organic ions in on-chip electrophoresis, *Electrophoresis* 25 (2004) 903–908.
- [9] D. A. Links, Analytical Methods Capacitively coupled contactless conductivity detection on microfluidic systems - ten years of development †, (2012) 25–33.
- [10] P. Kubán and P. C. Hauser, Application of an external contactless conductivity detector for the analysis of beverages by microchip capillary electrophoresis, *Electrophoresis* 26 (2005) 3169–3178.
- [11] Chi-Yuan Shih, Wei Li, Siyang Zheng, and Yu-Chong Tai, A Resonance-Induced Sensitivity Enhancement Method for Conductivity Sensors, in 2006 5th IEEE Conference on Sensors, Oct. 2006, 271–274, [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4178610/>.
- [12] C. C. Collins, Miniature Passive Pressure Transensor for Implanting in the Eye, *IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-14* (1967) 74–83.
- [13] G. Chitnis and B. Ziaie, A ferrofluid-based wireless pressure sensor, *J. Micromechanics Microengineering* 23 (2013).
- [14] B. Andò, S. Baglio, N. Savalli, and C. Trigona, Cascaded “triple-bent-beam” MEMS sensor for contactless temperature measurements in nonaccessible environments, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60 (2011) 1348–1357.
- [15] C. Zhang, L. F. Wang, and Q. A. Huang, Extending the remote distance of LC passive wireless sensors via strongly coupled magnetic resonances, *J. Micromechanics Microengineering* 24 (2014).
- [16] Q.-A. Huang, L. Dong, and L.-F. Wang, LC Passive Wireless Sensors Toward a Wireless Sensing Platform: Status, Prospects, and Challenges, *J. Microelectromechanical Syst.* 25 (2016) 822–841.
- [17] L. Do Quang, T. T. Bui, A. B. Hoang, P. Van Thanh, C. P. Jen, and T. Chu Duc, Development of a Passive Capacitively Coupled Contactless Conductivity Detection (PC4D) Sensor System for Fluidic Channel Analysis Toward Point-of-Care Applications, *IEEE Sens. J.* 19 (2019) 6371–6380.
- [18] L. Q. Do, T. T. Bui, H. T. T. Tran, K. Kikuchi, M. Aoyagi, and T. C. Duc, Fluidic platform with embedded differential capacitively coupled contactless conductivity detector for micro-object sensing, *Int. J. Nanotechnol.* 15 (2018) 24.
- [19] H. T. T. Thuy et al., Coplanar differential capacitively coupled contactless conductivity detection (CD-C4D) sensor for micro object inside fluidic flow recognition, *TRANSDUCERS 2017 - 19th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems* (2017) 1124–1127. <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994250>
- [20] Q. L. Do, T. T. Bui, T. T. H. Tran, K. Kikuchi, M. Aoyagi, and T. C. Duc, Differential capacitively coupled contactless conductivity detection (DC⁴D) sensor for detection of object in microfluidic channel, 2015 IEEE SENSORS - Proc. (2015) 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370574>