

NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT KẾ CẢM BIẾN ĐO ĐỘ DÀY MÀNG MỎNG

RESEARCH AND DESIGN SENSOR TO MEASURE THIN FILM THICKNESS

Nguyễn Đắc Hải^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.075>

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu, thiết kế cảm biến đồng phẳng kiểu điện dung đo ước lượng độ dày màng mỏng ứng dụng trong công nghiệp. Cấu trúc cảm biến bao gồm 2 điện cực phẳng, mỏng hình chữ nhật có kích thước nhỏ cỡ milimet được gắn ở các vị trí cố định trên đế mạch in (PCB) phẳng, trong đó có một điện cực đóng vai trò điện cực phát và điện cực còn lại được đặt song song trên cùng mặt phẳng đóng vai trò điện cực thu. Cảm biến được đặt áp sát vào màng mỏng không dẫn điện để đo độ dày. Cảm biến được đề xuất có thể đo được độ dày màng mỏng từ 10 μ m đến 50 μ m. Khi cảm biến được đặt áp sát vào màng mỏng, màng mỏng sẽ làm thay đổi điện môi trong cảm biến kiểu tụ, từ đó làm thay đổi giá trị điện dung của tụ điện, điều này giúp ta xác định được độ dày của màng mỏng đó.

Hoạt động của cảm biến được khảo sát bởi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) sử dụng phần mềm mô phỏng Ansoft Maxwell. Kết quả mô phỏng thể hiện sự thay đổi điện dung khi có sự xuất hiện và thay đổi độ dày của màng mỏng. Dựa trên kết quả mô phỏng này, kích thước của các điện cực và khoảng cách đặt của màng mỏng đến điện cực của cảm biến đã được tìm ra để thiết kế cảm biến với độ nhạy cần thiết. Trong nghiên cứu này đã tìm ra kích thước của cảm biến với các tham số: độ rộng của bản cực tụ ($a = 5$ mm), độ dày bản cực tụ ($h = 0,2$ mm), khoảng cách khe tụ ($d = 0,1$ mm) và độ dày lớp phủ cực tụ ($t = 0,01$ mm). Cảm biến có thể được ứng dụng trong công nghệ đo kiểm, sản xuất điện trở và tụ điện màng mỏng, bán dẫn màng mỏng, áp điện màng mỏng, màng mỏng oxit và trong một số ứng dụng tương tự khác.

Từ khóa: Cảm biến điện dung; cảm biến điện dung hai điện cực; cảm biến đồng phẳng.

ABSTRACT

This paper presents research, design of capacitive coplanar sensors for measuring thin film thicknesses applied in industry. The sensor structure consists of two flat, thin rectangular electrodes of milli-meter size mounted in fixed positions on a printed circuit board base, one of which acts as the emitter and the other electrode is placed parallel on the same plane as the receiver electrode. A thin non-conductive film thickness is placed against the sensing electrode. The proposed sensor can measure thin film thicknesses from 10 μ m to 50 μ m. When the thin film is placed close to the sensor, the thin film will change the dielectric in the capacitor sensor, thereby changing the capacitance value of the capacitor, this helps us to determine the thickness of the thin film.

The sensor's operation was investigated by finite element method (FEM) using Ansoft Maxwell simulation software. Simulation results show the change in capacitance when there is appearance and change in thickness of thin film. Based on this simulation result, the size of the electrodes and the placement distance of the thin film to the electrode of the sensor were found to design the sensor with the required sensitivity. In this study, the dimensions of the sensor were found with the following parameters: width of electrodes plate ($a = 5$ mm), thickness of electrode plate ($h = 0.2$ mm), electrodes gap distance ($d = 0.1$ mm) and the coating thickness of the electrode ($t = 0.01$ mm). The sensor can have industrial applications in manufacturing of thin film resistors and capacitors, thin film transistors, thin film piezoelectricity, oxide thin films and in a number of other similar applications.

Key words: Capacitive sensor, two-electrodes capacitive sensor, coplanar sensor.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: haind@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/10/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/2/2023

Ngày chấp nhận đăng: 26/4/2023

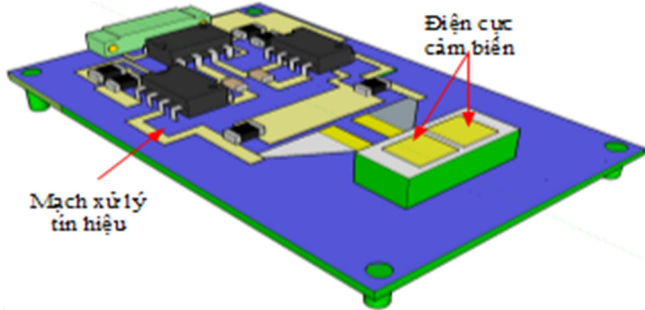
1. GIỚI THIỆU

Ngày nay màng mỏng được sử dụng rộng rãi trong rất nhiều lĩnh vực. Màng mỏng được ứng dụng rộng rãi trong việc chế tạo các thành phần thụ động và tích cực như điện trở và tụ điện màng mỏng [1], bán dẫn màng mỏng, áp điện màng mỏng [2], màng mỏng oxit [3], màng mỏng đa tinh thể và mạch tích hợp [4, 5]. Ngoài ra, các thiết bị có sử dụng công nghệ màng mỏng bao gồm: công cụ cắt, cấy ghép y tế, các yếu tố quang học. Các lớp chất bán dẫn, cách điện tạo thành một cấu trúc hạ tầng cơ sở cho việc chế tạo ra các thiết bị điện tử. Đây là lý do việc nghiên cứu về tính chất vật lý của màng mỏng là rất quan trọng.

Độ dày là một trong những thông số quan trọng của màng mỏng. Do đó việc đo độ dày của màng mỏng là công việc quan trọng trong nghiên cứu thông số vật lý của màng mỏng. Hiện nay trên thế giới đang sử dụng một số phương pháp đo khác nhau, như phương pháp cảm biến điện dung, phương pháp sử dụng khối lượng trung bình, phương pháp quang học, phương pháp dựa trên phát xạ và hấp thụ bức xạ, sử dụng giao thoa kế, phân tích hóa học [6, 7].

Trong bài báo này, tác giả đề xuất thiết kế cảm biến đồng phẳng kiểu điện dung đo độ dày màng mỏng không dẫn điện. Các điện cực của cảm biến được tích hợp trên một đế PCB cố định. Màng mỏng có độ dày từ 10 μ m đến 50 μ m. Độ dày màng mỏng

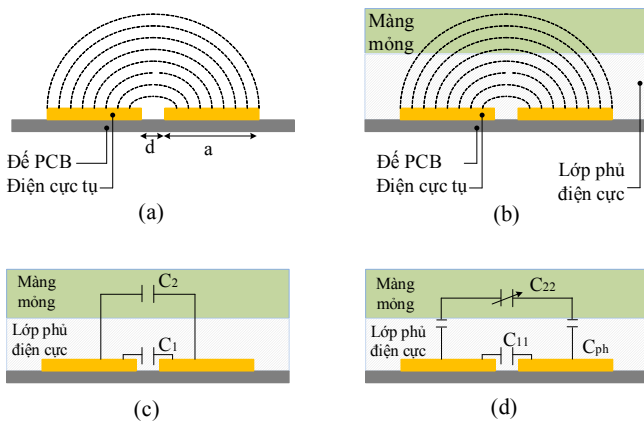
được cảm nhận dựa trên sự thay đổi điện dung của cặp điện cực tụ cảm biến, khi màng mỏng đặt sát điện cực cảm biến sẽ làm thay đổi điện môi của cảm biến tụ điện và làm thay đổi điện dung của cảm biến tụ điện. Từ sự thay đổi của điện dung này sẽ ước lượng được độ dày của màng mỏng.



Hình 1. Thiết kế cảm biến kiểu điện dung đo độ dày màng mỏng

2. CẢM BIẾN ĐỒNG PHẪNG KIỂU ĐIỆN DUNG

Các cảm biến điện dung thông thường làm việc dựa vào sự thay đổi các tham số trong cấu trúc tụ, dẫn đến việc thay đổi điện dung của tụ điện. Có nhiều cấu trúc cảm biến điện dung phát triển dựa trên hai cấu trúc điện cực song song. Trong vi chế tạo, cấu trúc cảm biến điện dung chủ yếu là cấu trúc đồng phẳng do giới hạn và giá thành của quy trình vi chế tạo.



Hình 2. Cảm biến tụ và các đường điện trường, điện dung của cảm biến. (a) Đường điện trường giữa các điện cực tụ; (b) Đường điện trường giữa các điện cực tụ khi có màng mỏng; (c) Điện dung tương đương song song; (d) Điện dung riêng lẻ hình thành qua lớp phủ điện cực và màng mỏng (C_{ph}), lớp phủ điện cực (C_{11}), màng mỏng (C_{22})

Điện dung của tụ có hai bản cực song song và đồng phẳng cách nhau bởi một khoảng cách d được đặt trong một môi trường điện môi đồng nhất có hằng số điện môi ϵ_r (hình 2(a)) được xác định bằng công thức [8]:

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

Với ϵ_0 là hằng số điện môi chân không, a là chiều dài và chiều rộng của cặp điện cực. Phương trình (1) cho giá trị tối ưu khi giá trị của tham số $a/(d/2) \gg 1$ [8]. Hầu hết các cảm biến điện dung chất lỏng dựa trên cơ chế phát hiện sự thay

đổi của điện dung gây ra bởi sự thay đổi của điện môi và tính dẫn điện của vật liệu giữa các điện cực. Do đó, sự thay đổi độ dày màng mỏng có thể dẫn đến sự thay đổi của điện dung của cảm biến.

Trong thiết kế này, sự thay đổi điện dung được tính đến sự ảnh hưởng của lớp phủ điện cực, độ dày màng mỏng. Tổng điện dung được tạo thành bởi một cặp điện cực đồng phẳng đặt bên dưới một màng mỏng (hình 2 (c)) có thể được viết là:

$$C_{total} = C_1 + C_2 \quad (2)$$

Trong đó: C_1, C_2 là điện dung tương đương song song được hình thành thông qua các đường điện trường khác nhau giữa các điện cực như được hiển thị trong hình 2 (c).

Điện dung trên màng mỏng ký hiệu là C_{22} , lớp phủ điện cực là C_{11} , lớp phủ điện cực và màng mỏng là C_{ph} (hình 2 (d)). Khi thay đổi độ dày của màng mỏng thì điện dung C_2 thay đổi là chủ yếu, còn điện dung C_1 được coi là không thay đổi.

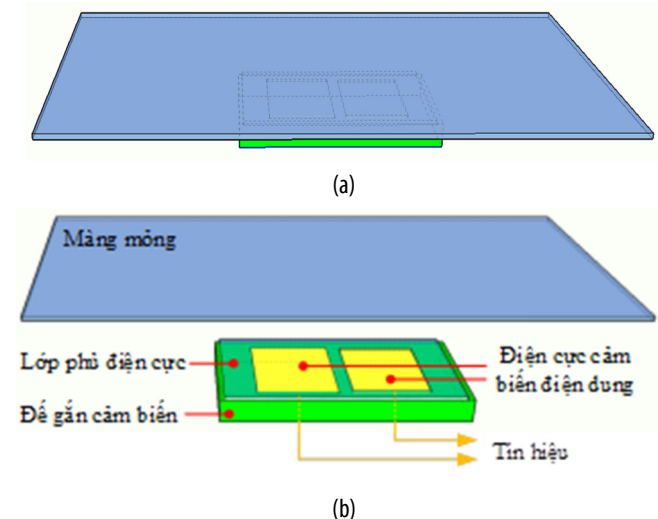
$$\Delta C_{total} = \Delta C_1 + \Delta C_2 \approx \Delta C_2 \quad (3)$$

Điện dung C_2 tương đương trong công thức (2) có thể được viết chi tiết là:

$$C_2 = \frac{\frac{C_{ph}}{2} \cdot C_{22}}{\frac{C_{ph}}{2} + C_{22}} = \frac{C_{ph} \cdot C_{22}}{C_{ph} + 2C_{22}} \quad (4)$$

Từ công thức (4) cho thấy giá trị điện dung tụ C_2 sẽ thay đổi phụ thuộc theo giá trị của các tụ C_{ph} và C_{22} . Giá trị của tụ C_{ph} sẽ là giá trị không đổi đối với từng loại chất liệu của màng mỏng. Như vậy khi đo màng mỏng có chất liệu được xác định thì chỉ có giá trị tụ C_{22} sẽ thay đổi khi độ dày màng mỏng thay đổi. Vậy từ sự thay đổi điện dung của cảm biến tụ điện ta có thể ước lượng được độ dày của màng mỏng.

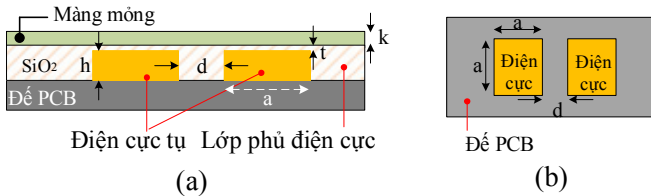
3. THIẾT KẾ CẢM BIẾN



Hình 3. Mô hình thiết kế hệ thống cảm biến kiểu điện dung đặt dưới màng mỏng. (a) Cảm biến tụ đặt áp sát bên dưới màng mỏng; (b) Điện cực tụ cảm biến đặt cố định trên đế PCB và lớp phủ cách điện được phủ trên bề mặt điện cực tạo khoảng cách cố định với màng mỏng

Cảm biến được thiết kế gồm hai điện cực mỏng hình vuông gắn ở trên bề mặt của đế PCB, điện cực được phủ một lớp cách điện. Màng mỏng được đặt áp sát vào lớp phủ điện cực (hình 3).

Hai điện cực cảm biến được áp sát vào màng mỏng. Khi điện cực cảm biến được áp sát vào màng mỏng và khi độ dày màng mỏng thay đổi sẽ làm thay đổi điện môi, từ đó làm thay đổi điện dung của cảm biến.



Hình 4. Cấu trúc của cảm biến: (a) mặt cắt dọc và (b) nhìn từ trên xuống

Các điện cực có chất liệu bằng đồng với kích thước như bảng 1 và chúng được chế tạo là màng mỏng phẳng được gắn ở vị trí xác định trên đế PCB. Cặp điện cực này tạo nên tụ điện C, tụ C được tạo bởi 2 điện cực là điện cực thu và điện cực phát. Giá trị điện dung của tụ điện C phụ thuộc vào độ dày của màng mỏng. Khi đặt điện cực áp sát vào màng mỏng nó làm thay đổi điện môi của tụ, dẫn đến làm thay đổi giá trị điện dung của tụ, từ sự thay đổi điện dung này ta có thể ước lượng được độ dày của màng mỏng. Độ dày màng mỏng (k) được khảo sát từ 10µm đến 50µm.

Bảng 1. Tham số của cảm biến được thiết kế

Tham số	a	d	h	t
Giá trị (mm)	5	0,3	0,2	0,01

4. THIẾT LẬP MÔ PHỎNG

Hoạt động của cảm biến được khảo sát bởi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM- Finite Element Method) sử dụng phần mềm mô phỏng Ansoft Maxwell.

Bảng 2. Các tham số dùng trong mô phỏng cảm biến

Thành phần hệ thống của cảm biến	Chất liệu	Hằng số điện môi	Độ dẫn điện (s/m)
Màng mỏng	Silicon	11,9	0
Điện cực	Đồng	1	58.10 ⁶
Lớp cách điện phủ điện cực	SiO ₂	4	0

Mô hình cảm biến được thiết kế gồm hai điện cực bằng đồng được thiết kế hình vuông được gắn trên mặt đế PCB, phía trên điện cực được phủ một lớp cách điện. Một điện cực được đặt điện thế 5V, một điện cực còn lại được đặt 0V. Màng mỏng được sử dụng để khảo sát có chất liệu là Silicon. Bảng 2 thể hiện các tham số của vật liệu sử dụng trong cảm biến.

5. MÔ PHỎNG

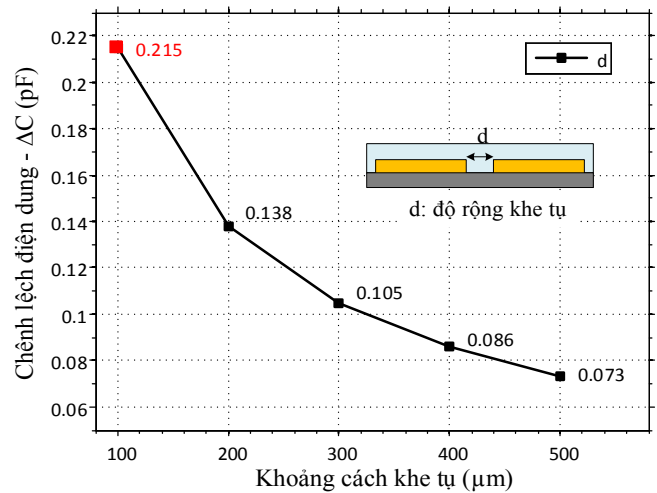
Khi đặt điện cực cảm biến sát vào màng mỏng thì có sự thay đổi điện dung ΔC. Như vậy sự thay đổi giá trị điện dung nhiều hay ít phụ thuộc vào độ dày của màng mỏng và chất liệu của màng mỏng. Ngoài ra độ nhạy của cảm biến còn phụ thuộc vào độ dày lớp cách điện phủ cực tụ và

khoảng cách giữa hai điện cực. Trong nghiên cứu này, các khảo sát về độ dày lớp cách điện phủ điện cực, khảo sát về khoảng cách các điện cực để tìm ra kích thước, khoảng cách tối ưu cho độ nhạy tốt nhất sẽ được trình bày. Các tham số trong bảng 1 là kích thước độ rộng của bản cực tụ (a) và độ dày bản cực tụ (h) được giữ cố định, khoảng cách khe tụ (d) và độ dày lớp phủ cực tụ (t) sẽ lần lượt được thay đổi.

5.1. Khảo sát các tham số kích thước của cảm biến

5.1.1. Khảo sát mối liên hệ giữa khoảng cách khe tụ (d) và sự thay đổi chênh lệch điện dung

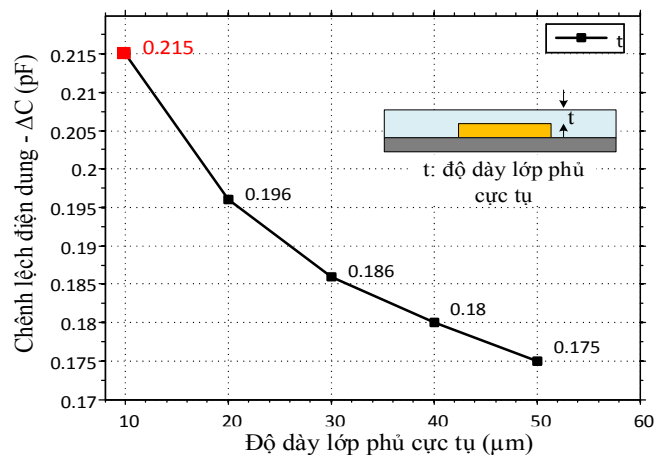
Cố định độ rộng của bản cực tụ (a = 5mm) và độ dày bản cực tụ (h = 0,2mm) và lần lượt thay đổi khoảng cách khe tụ cảm biến (d). Đồ thị hình 5 thể hiện sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến thu được ứng với từng khoảng cách khe tụ (d).



Hình 5. Mối liên hệ giữa khoảng cách khe tụ (d) và sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến

Theo hình 5, chọn được d = 100µm cho sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến là lớn nhất đạt 0,215pF.

5.1.2. Khảo sát mối liên hệ giữa độ dày lớp cách điện phủ cực tụ (t) và sự thay đổi chênh lệch của điện dung



Hình 6. Mối liên hệ giữa độ dày lớp cách điện phủ cực tụ (t) và sự chênh lệch của điện dung

Từ kết quả khảo sát trên ta có độ rộng khe cực tụ $d = 100\mu\text{m}$ là tối ưu, lần lượt thay đổi độ dày lớp phủ cực tụ cảm biến (t) để khảo sát sự biến thiên của điện dung của cảm biến. Kết quả mô phỏng cho thấy khi lần lượt thay đổi từng kích thước độ dày lớp phủ cực tụ t thì sự thay đổi chênh lệch của điện dung của cảm biến là khác nhau. Đồ thị hình 6 thể hiện sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến thu được ứng với từng giá trị độ dày lớp phủ cực tụ (t)

Theo hình 6 cho thấy, với độ dày lớp phủ cực tụ $t = 10\mu\text{m}$ thì sẽ cho sự thay đổi chênh lệch điện dung của cảm biến cao nhất là $0,215\text{pF}$.

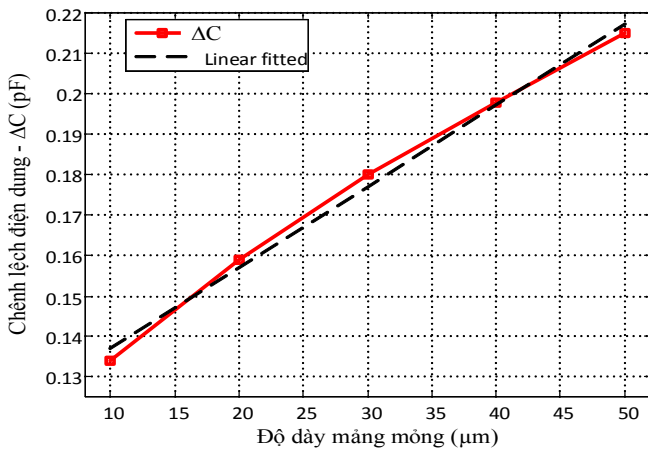
5.2. Khảo sát thay đổi điện dung của cảm biến theo độ dày màng mỏng

Theo kết quả khảo sát khoảng cách khe tụ và độ dày lớp phủ điện cực, giá trị các tham số của cảm biến được tối ưu và được thể hiện trong bảng 3.

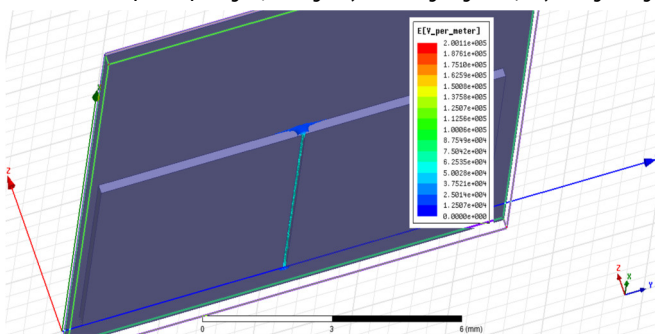
Bảng 3. Tham số của cảm biến được thiết kế tối ưu

Tham số	a	d	h	t
Giá trị (mm)	5	0,1	0,2	0,01

Hình 7 cho thấy kết quả mô phỏng sự thay đổi điện dung của cảm biến khi thay đổi độ dày của màng mỏng. Khi độ dày của màng mỏng tăng lên thì điện dung của cảm biến cũng tăng tương ứng. Cảm biến được thiết kế có thể ước lượng được độ dày màng mỏng từ $10\mu\text{m}$ đến $50\mu\text{m}$, tương ứng với sự thay đổi chênh lệch của điện dung từ $0,134\text{pF}$ đến $0,215\text{pF}$ (hình 7).



Hình 7. Kết quả mô phỏng điện dung thay đổi tương ứng với độ dày màng mỏng



Hình 8. Hình ảnh mô phỏng hoạt động của cảm biến

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày thiết kế cảm biến đồng phẳng kiểu điện dung để đo ước lượng độ dày của màng mỏng. Cảm biến được thiết kế với hai điện cực mỏng hình vuông có chất liệu bằng đồng, hai điện cực được gắn cố định trên đế PCB phẳng. Điện cực của cảm biến được đặt áp sát lên màng mỏng để đo độ dày. Kích thước của cảm biến đã được xác định, độ rộng của bản cực tụ ($a = 5\text{mm}$) và độ dày bản cực tụ ($h = 0,2\text{mm}$), khoảng cách khe tụ ($d = 0,1\text{mm}$) và độ dày lớp phủ cực tụ ($t = 0,01\text{mm}$). Kết quả mô phỏng cho thấy sự thay đổi chênh lệch của điện dung của cảm biến từ $0,134\text{pF}$ đến $0,215\text{pF}$ khi độ dày màng mỏng thay đổi từ $10\mu\text{m}$ đến $50\mu\text{m}$. Đặc biệt, cấu trúc hoạt động dựa trên nguyên lý điện dung nên cảm biến này có thể hoạt động trong các điều kiện khắc nghiệt, phù hợp với nhiều ứng dụng khác nhau. Với kết quả này cảm biến có thể được ứng dụng trong công nghệ đo kiểm, sản xuất điện trở và tụ điện màng mỏng, bán dẫn màng mỏng, áp điện màng mỏng và màng mỏng oxit.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Brenneka Geoff L., Tuttle Bruce A., 2007. *Fabrication of ultrathin film capacitors by chemical solution deposition*. Journal of Materials Research, 22(10), 2868–2874. doi:10.1557/JMR.2007.0371
- [2]. S. Trolier-McKinstry, P. Muralt, 2004. *Thin film piezoelectrics for MEMS*. J. Electroceram. 12, 7.
- [3]. C.H. Ahn, K.M. Rabe, J.M. Triscone, 2003. *Ferroelectricity at the nanoscale: Local polarization in oxide thin films and heterostructures*. Science 303, 488.
- [4]. K.T. Miller, F.F. Lange, D.B. Marshall, 1990. *The instability of polycrystalline thin films*. J. Mater. Res. 5, 151.
- [5]. D.B. Dimos, R.W. Schwartz, S.J. Lockwood, 1994. *Control of leakage resistance in Pb(Zr,Ti)O3 thin films by donor doping*. J. Am. Ceram. Soc. 77, 3000.
- [6]. Eckertová Ludmila, 1977. *Thin Film Thickness and Deposition Rate Measurement Methods*. In Physics of Thin Films - Springer, Boston, MA, 10.1007/978-1-4615-7589-4 (Chapter 3), 52–71. doi:10.1007/978-1-4615-7589-4_3.
- [7]. Padron Ivan, 2012. *Thickness Measurement of Photoresist Thin Films Using Interferometry*. Interferometry - Research and Applications in Science and Technology. InTech, doi: 10.5772/34983.
- [8]. J.Z. Chen, A.A. Darhuber, S.M. Troian, S. Wagner, 2004. *Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation*. Lab Chip 4, 473–480.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Duc Hai
Hanoi University of Industry