

# Mô phỏng cảm biến sóng âm bề mặt đo từ trường sử dụng mô hình ma trận truyền kết hợp với mô phỏng FEM

## Simulation of the SAW sensor measuring magnetic fields using the transmission matrix model combined with FEM simulations

Đỗ Duy Phú<sup>1,2</sup>, Nguyễn Văn Tuấn<sup>1</sup>, Lê Văn Vinh<sup>3</sup>, Hoàng Sĩ Hồng<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Hanoi University of Industrial, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>Phenikaa University, Hanoi, Vietnam

\*Corresponding author E-mail: hong.hoangsy@hust.edu.vn

### Abstract

This study proposes the transmission matrix model [ABCD] for the FeNi magnetic sensitive layer used in surface acoustic wave magnetic (SAW-MO) sensors. The center frequency and input excitation to the sensor through the  $v_m$ -H characteristic are determined by finite element simulation (FEM) on the FeNi/IDT/ST-Quartz structure. The simulation results of the center frequency and sensor's working response show that simulations by the FEM method and simulations by the transmission matrix (TM) method are correlated. Furthermore, the survey also indicates the more reasonable and suitable of the third-order  $v_m$ -H characteristic curve compared to the second-order characteristic in the transmission matrix model of the FeNi magnetic sensitivity layer. These accuracy and suitability are expressed through the trend and shape of the sensor's working response.

**Keywords:** Surface Acoustic Wave, SAW-MO sensor, FeNi nanoparticles, FeNi magnetic sensitivity layer, FEM.

### Ký hiệu

Symbols	Units	Description
H	Oe	Cường độ từ trường
$f_c$	Hz	Tần số cộng hưởng
$f_0$	Hz	Tần số trung tâm
$S_{21}$	dB	Đáp ứng tần số
$Z_m, Z_u, Z_d$	$\Omega$	Tổng trở
$\theta_m, \theta_u, \theta_d$	rad	Góc sóng âm
$C_s$	F/m	Điện dung trên mỗi cặp ngón tay
$C_d$	F/m	Điện dung vùng khe giữa điện cực và lớp nhảy từ FeNi.
$k^2$		Hệ số cơ điện
$v_m$	m/s	Vận tốc sóng âm lan truyền qua vùng phủ vật liệu
$N_t$		Số ngón tay

### Các từ viết tắt

SAW	Surface Acoustic Wave
SAW-MO	SAW-Magnetostriction
IDT	Inter Digital Transducer
TM	Transmission Matrix
FEM	Finite Elements Method
COM	Coupling of Modes
ECM	Crossed-field Equivalent Circuit Model
sf	Single Finger

### IRM

### Impulse Response Model

### Tóm tắt

Nghiên cứu này đề xuất mô hình ma trận truyền [ABCD] cho lớp nhảy từ FeNi dùng trong cảm biến từ dạng sóng âm bề mặt (SAW-MO). Tần số trung tâm và kích thích tín hiệu đo đến đầu vào cho cảm biến thông qua đặc tính  $v_m$ -H được xác định bằng phương pháp mô phỏng phần tử hữu hạn (FEM) trên cấu trúc FeNi/IDT/ST-Quartz. Kết quả mô phỏng tần số trung tâm và đáp ứng làm việc của cảm biến cho thấy mô phỏng theo phương pháp FEM và mô phỏng theo phương pháp ma trận truyền (TM) là có sự tương quan. Vì vậy, mô hình ma trận truyền [ABCD] đã đề xuất cho lớp nhảy từ FeNi là đúng đắn và phù hợp. Bên cạnh đó, khảo sát cũng chỉ ra sự hợp lý và phù hợp hơn của đường đặc tính  $v_m$ -H bậc ba so với đặc tính bậc hai trong mô hình ma trận truyền của lớp nhảy từ FeNi. Độ chính xác và sự phù hợp được thể hiện thông qua xu thế và hình dáng trên đáp ứng làm việc của cảm biến.

### 1. Giới thiệu

Ngày nay, cảm biến hoạt động dựa trên nguyên lý sóng âm bề mặt (SAW) đã và đang được nghiên cứu, ứng dụng vào nhiều lĩnh vực của cuộc sống từ vật lý, hóa học cho tới sinh học [1-3], bởi những ưu điểm như: kích thước nhỏ, không dây, đáp ứng nhanh và độ nhạy cao [4, 5]. Với sự đa dạng và

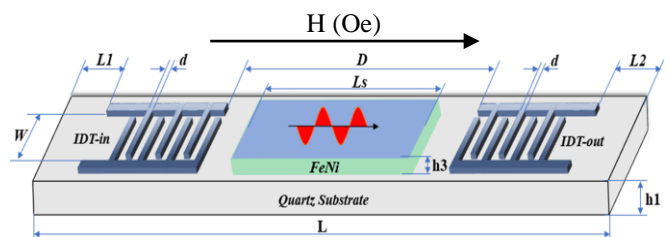
ưu điểm như trên thì việc nghiên cứu và khảo sát các đặc tính của cảm biến SAW nói chung và cảm biến từ dạng SAW nói riêng là quan trọng và cần thiết. Theo đó, mô phỏng là một cách tiếp cận được áp dụng phổ biến trước khi tính đến chế tạo thực nghiệm cảm biến. Với phương pháp mô phỏng FEM đã và đang được nhiều nhóm sử dụng vì các ưu điểm của phương pháp như: Dễ dàng xây dựng cấu trúc cảm biến thông qua công cụ đồ họa, cấu trúc cảm biến được xây dựng rất gần với mô hình vật lý, dễ dàng thực hiện tối ưu hóa cấu trúc của cảm biến và dễ thiết lập các điều kiện biên cho quá trình mô phỏng [6-10]. Tuy nhiên, mô phỏng FEM còn tồn tại một số thách thức như: Cần cấu hình máy tính cao, quá trình tính toán mất nhiều thời gian, cần phương pháp chia lưới phù hợp với mô hình mô phỏng, xử lý kết quả mô phỏng cần một công cụ khác (như Matlab) và đặc biệt là không chia lưới được khi độ dày lớp vật liệu nhỏ hơn khoảng 100 (nm). Bên cạnh mô phỏng FEM, phương pháp mô hình mạch tương đương cũng được sử dụng để mô phỏng cảm biến SAW. Phương pháp bao gồm một số mô hình như: mô hình đáp ứng xung IRM (Impulse Response Model) [11, 12], mô hình trường chéo ECM (Crossed-field Equivalent Circuit Model) [13], mô hình ghép chế độ COM (Coupling-Of-Mode) [14, 15] và mô hình ma trận truyền TM (Transmission Matrix) [16]. Ưu điểm của phương pháp là công cụ giải mạch điện được trang bị đầy đủ, hiệu quả và dễ dàng được thực hiện thông qua các phần mềm cơ bản như Matlab; thời gian tính toán nhanh mà không cần máy tính có cấu hình cao. Hơn nữa, với mô phỏng FEM, mô hình hóa các tính chất vật lý của lớp vật liệu và tác động của các yếu tố môi trường (nhiệt độ, độ ẩm, v.v) tác động đến cảm biến cần mô tả chi tiết và phức tạp. Trong khi đó, với mô phỏng mạch điện tương đương thì mô hình hóa đơn giản hơn, tuy nhiên phương pháp này cần biết trước tần số trung tâm của cảm biến.

Các nghiên cứu về phương pháp mô hình mạch điện tương đương. Nhóm Otto Schwelb và cộng sự [17] xây dựng mô hình ma trận truyền để mô phỏng và thiết kế bộ lọc SAW, trong đó có xét đến sự ảnh hưởng của cấu trúc bộ điện cực IDT. Bên cạnh đó, nghiên cứu [18] mô phỏng đáp ứng tần số của các thiết bị sóng âm bề mặt với ba loại cấu trúc SAW khác nhau bao gồm: cấu trúc dạng delay line, cộng hưởng một công và cộng hưởng hai công; qua đó đánh giá sự ảnh hưởng độ điện dẫn, khẩu độ âm học và số cặp ngón tay của bộ điện cực IDT tới đáp ứng đầu ra của thiết bị. Nghiên cứu [19] sử dụng mô hình COM để mô hình hóa đầy đủ các thành phần của cảm biến thụ động không dây dạng sóng âm bề mặt, mô hình cho phép mô phỏng độ trễ pha và có thể được sử dụng như một công cụ để thiết kế và phân tích cảm biến SAW thụ động một công dạng đường trễ. Một nghiên cứu nữa, nhóm R.C.O. Jesus và cộng sự sử dụng định lý Mittag-Leffler để xây dựng mô hình mạch tương đương cho cấu trúc SAW delay-line, nghiên cứu cho phép ứng dụng cảm biến để phát hiện môi trường chất lỏng [20]. Với mô hình ma trận truyền TM nói riêng, một nghiên cứu [21] đã sử dụng mô hình TM bậc hai để tối ưu hóa bộ điện cực IDT cho cảm biến SAW đo biến dạng trong lĩnh vực hàng không vũ trụ. Bên cạnh đó, công bố [22] cũng đã sử dụng mô hình ma trận truyền để phân tích các đáp ứng của cảm biến SAW hydro trong miền thời gian khi xem xét đến yếu tố độ dày lớp nhay khí palladium (Pd).

Qua khảo sát trên, nhóm chúng tôi nhận thấy các công bố về ứng dụng mô hình ma trận truyền TM trong nghiên cứu cảm biến SAW nói chung và cảm biến SAW-MO nói riêng là rất ít. Vì vậy, việc đề xuất thử nghiệm phương pháp mô phỏng ma trận truyền TM cho lớp nhay từ FeNi kết hợp cùng mô phỏng FEM cho cảm biến SAW nói chung và cảm biến đo từ trường dạng SAW nói riêng là cần thiết. Nếu thành công sẽ cung cấp thêm một phương án mô phỏng đơn giản và nhanh hơn so với mô phỏng FEM truyền thống. Thêm nữa, việc đề xuất và xây dựng mô hình ma trận truyền cho lớp nhay vùng delay-line chưa được quan tâm nhiều và đặc biệt là cảm biến từ dạng sóng âm bề mặt. Vì vậy, trong nghiên cứu này, bài báo thực hiện xây dựng mô hình mô phỏng cảm biến SAW từ dạng delay-line với cấu trúc FeNi/IDT/ST-Quartz bằng mô hình ma trận truyền TM. Trong đó, tiến hành đề xuất mô hình ma trận truyền [ABCD] cho lớp nhay từ FeNi với tần số trung tâm ( $f_0$ ) và quan hệ giữa vận tốc sóng âm bề mặt tại lớp nhay với cường độ từ trường đo ( $v_m-H$ ) được xác định thông qua mô phỏng FEM. Kết quả mô phỏng bằng phương pháp ma trận truyền được so sánh với mô phỏng FEM để kiểm tra tính hợp lý và phù hợp. Vì độ tin cậy của phương pháp mô phỏng FEM đã được chứng minh qua các công trình của nhiều tác giả cũng như là nhóm chúng tôi [6-10].

## 2. Mô hình mô phỏng

Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của cảm biến SAW-MO được thể hiện trên Hình 1 và kích thước được thể hiện qua Bảng 1. Hoạt động của cảm biến, đặt xung điện áp (hoặc một phổ tín hiệu hình sin quanh tần số trung tâm) vào IDT-in. Tại đây, sóng âm bề mặt được tạo ra do hiệu ứng áp điện ngược. Sóng này truyền qua vùng delay-line có sự tương tác giữa lớp nhay từ FeNi với cường độ từ trường đo ( $H$ ) làm thay đổi vận tốc sóng âm hay tần số cộng hưởng. Tiếp theo, sóng âm bề mặt lan truyền tới IDT-out, tại đây tín hiệu điện áp được hình thành do hiệu ứng áp điện thuận. Tần số cộng hưởng được xác định bằng cách phân tích phổ tín hiệu điện áp tại IDT-out, từ đó suy ra giá trị của cường độ từ trường đo.



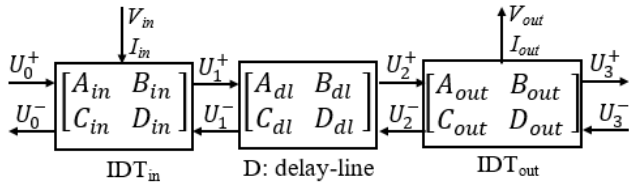
Hình 1. Cấu trúc và nguyên lý cảm biến SAW-MO.

Bảng 1: Các thông số kích thước của cảm biến.

Thông số	Ký hiệu	Giá trị ( $\mu\text{m}$ )
Số cặp ngón tay	n	25 (cặp)
Độ dày đế áp điện	h1	400
Độ dày lớp nhay từ	h3	200
Chiều rộng mỗi ngón tay	d	10
Chiều dài vùng delay-line	D	5000
Chiều dài mép trái	L1	2000
Chiều dài mép phải	L2	2000
Chiều dài lớp nhay từ	Ls	4960
Chiều dài của cảm biến	L	10980
Bước sóng	$\lambda=4*d$	40
Khẩu độ sóng âm	W	2399.3

## 2.1. Mô hình ma trận truyền

Ma trận truyền là mô hình bậc hai sử dụng mô hình mạch tương đương. Mô hình cho phép xem xét đến các hiệu ứng bậc hai bao gồm: tín hiệu phản xạ, nhiễu xạ sóng, phân bố điện tích và phân tán. Mô hình được xây dựng bằng cách thừa kế các mô hình thiết lập trước đó: ma trận P, COM và ma trận truyền thông. Tương tự như cách tiếp cận COM và ma trận P, mô hình xem IDT là mạng ba công và ma trận truyền của mỗi ngón tay có kích thước  $3 \times 3$ , trong khi đó vùng delay-line được coi là một mạng hai công và được đại diện bởi một ma trận truyền  $2 \times 2$ . Hình 2 thể hiện cấu trúc mô hình ma trận truyền của cảm biến SAW dạng nói tầng [18, 23].



Hình 2: Mô hình ma trận truyền của cảm biến SAW-MO.

$U_i^+, U_i^-$ : là các tín hiệu sóng âm truyền theo chiều thuận và ngược qua các bộ phận của cảm biến;  $V_{in}, I_{in}$  và  $V_{out}, I_{out}$ : là điện áp và dòng điện vào và ra tại các bộ điện cực IDT. Mỗi ngón tay trong các bộ điện cực có mối quan hệ (1) [23, 24].

$$\begin{bmatrix} U_{i-1}^+ \\ U_{i-1}^- \\ I_i \end{bmatrix} = [T_i(f)] \begin{bmatrix} U_i^+ \\ U_i^- \\ V_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó các ma trận truyền  $3 \times 3$  của mỗi ngón tay có dạng (2), với  $f$  là tần số của phổ sóng âm.

$$T_i(f) = \begin{bmatrix} t_{11}(f) & t_{12}(f) & t_{13}(f) \\ t_{21}(f) & t_{22}(f) & t_{23}(f) \\ t_{31}(f) & t_{32}(f) & t_{33}(f) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong biểu thức (2), các chỉ số 1 và 2 chỉ ra mối quan hệ giữa các công sóng âm, chỉ số 3 chỉ ra mối quan hệ giữa các công điện.

Mặt khác, các ma trận truyền [ABCD] có kích thước  $2 \times 2$  của điện cực IDT-in, IDT-out lần lượt là:

$$[IDT_{in}] = \begin{bmatrix} A_{in} & B_{in} \\ C_{in} & D_{in} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[IDT_{out}] = \begin{bmatrix} A_{out} & B_{out} \\ C_{out} & D_{out} \end{bmatrix} \quad (4)$$

và (5) mô tả ma trận truyền [ABCD] của lớp nhảy (vùng delay-line):

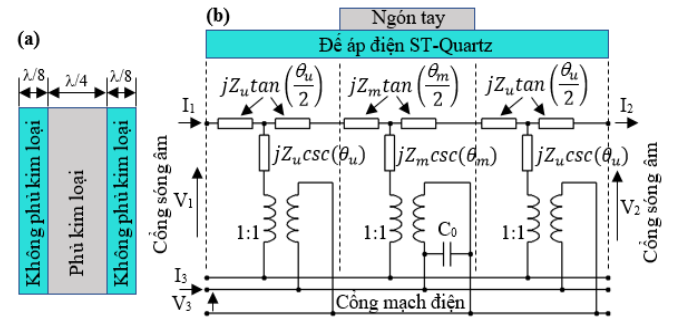
$$[D] = \begin{bmatrix} A_{dl} & B_{dl} \\ C_{dl} & D_{dl} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Các ma trận (2), (3), (4) và (5) sẽ được xác định ở các phần tiếp theo.

## 2.2. Xác định ma trận truyền [ABCD] cho các bộ điện cực IDT

Theo mô hình trường chéo ECM, mỗi ngón tay trong các bộ IDT được chia thành ba vùng như Hình 3, bao gồm hai vùng

không phủ kim loại có độ rộng  $\lambda/8$  và một vùng có phủ kim loại có độ rộng  $\lambda/4$  [23].



Hình 3. Mô hình ECM cho mỗi ngón tay.

(a): Vùng ngón tay, (b): Mô hình ECM

Theo đó, các ma trận truyền được xác định như sau:

Ma trận truyền [ABCD] cho vùng phủ kim loại là:

$$[R_m(f)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_m(f)) & jZ_m \sin(\theta_m(f)) \\ \frac{j}{Z_m} \sin(\theta_m(f)) & \cos(\theta_m(f)) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Với  $Z_m$  là tổng trở,  $\theta_m(f)$  là góc sóng âm trong vùng phủ kim loại và lần lượt được tính theo công thức (7), (8):

$$Z_m(f) = \frac{4d}{k^2 C_s W v_m} \quad (7)$$

$$\theta_m(f) = \frac{2\pi f d}{v_m} \quad (8)$$

trong đó:  $f$  là tần số,  $v_m$  là vận tốc sóng âm bề mặt khi để áp điện đã được phủ các lớp vật liệu,  $w$  là khẩu độ của bộ IDT,  $d$  là độ rộng mỗi ngón tay,  $C_s$  là điện dung trên mỗi cặp ngón tay trên mỗi đơn vị độ dài (hay khoảng trống giữa hai ngón tay) và  $k^2$  là hệ số cơ điện của vật liệu để áp điện.

Theo [25], hệ số cơ điện của để áp điện Quartz  $k^2 = 0.0016$ . Và theo [26]:

$$C_s = C_0 W \quad (9)$$

$$\text{với: } C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{W d}{t} \quad (10)$$

trong đó,  $d$ : là chiều rộng ngón tay

$t$ : là khoảng cách giữa 2 ngón tay ( $t = d$ )

$\epsilon_r = 4.6$ : Hằng số điện môi của để áp điện Quartz

$\epsilon_0$ : Hằng số điện cố định  $\epsilon_0 = 8.854$  (PF/m)

Ma trận truyền [ABCD] cho vùng không phủ kim loại là:

$$[R_u(f)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_u(f)) & jZ_u \sin(\theta_u(f)) \\ \frac{j}{Z_u} \sin(\theta_u(f)) & \cos(\theta_u(f)) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{với tổng trở: } Z_u(f) = \frac{1}{k^2 C_s W f_c} \quad (12)$$

và góc sóng âm trong vùng không phủ kim loại:

$$\theta_u(f) = \frac{\pi f}{4f_c} \quad (13)$$

trong đó:  $f_c$  là tần số được tính theo vận tốc sóng âm bề mặt khi để áp điện chưa phủ vật liệu nhảy từ (hay tương đương tần số trung tâm  $f_0$  khi phủ lớp nhảy nhưng cường độ từ trường  $H = 0$ ).

Từ (6) và (11) ta xác định được ma trận truyền [ABCD] cho mỗi ngón tay  $[R(f)]$  là:

$$[R(f)] = [R_u(f)][R_m(f)][R_u(f)] = \begin{bmatrix} A_{sf} & B_{sf} \\ C_{sf} & D_{sf} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Kết hợp các phương trình (1) và (14) ta xác định được quan hệ của các phần tử trong ma trận truyền  $[T_i(f)]$  theo các phần tử trong ma trận truyền [ABCD] cho mỗi ngón tay trong các bộ điện cực IDT như sau [24]:

$$\begin{aligned} t_{11} &= \frac{1}{2} \left( 2A_{sf} + \frac{B_{sf}}{Z_u} + Z_u C_{sf} \right) \\ t_{12} &= \frac{1}{2} \left( Z_u C_{sf} - \frac{B_{sf}}{Z_u} \right) \\ t_{13} &= \frac{1}{2Z_e} j \tan \frac{\theta_e}{2} \sqrt{Z_u} \left( -A_{sf} - 1 - \frac{B_{sf}}{Z_u} \right) \\ t_{22} &= \frac{1}{2} \left( 2A_{sf} - \frac{B_{sf}}{Z_u} - Z_u C_{sf} \right) \\ t_{23} &= \frac{1}{2Z_e} j \tan \frac{\theta_e}{2} \sqrt{Z_u} \left( A_{sf} + 1 - \frac{B_{sf}}{Z_u} \right) \\ t_{21} &= -t_{12} ; \quad t_{31} = 2t_{13} ; \quad t_{32} = -2t_{23} \\ t_{33} &= j\omega C_s + \frac{j2 \tan \frac{\theta_e}{2}}{Z_e} - \frac{j \tan^2 \frac{\theta_e}{2} \sin \theta_e}{Z_e} \end{aligned} \quad (15)$$

với:

$$\theta_e = \cos^{-1} \left( A_{sf} \right) ; \quad Z_e = \frac{B_{sf}}{j \sin \theta_e}$$

Các ma trận truyền [ABCD] cho bộ điện cực IDT-in  $[IDT_{in}(f)]$  và IDT-out  $[IDT_{out}(f)]$  được tính bằng cách xếp chồng ma trận truyền của các ngón tay, với  $N_t$  là số ngón tay trong mỗi bộ điện cực IDT.

$$[IDT_{in}(f)] = [R(f)]^{N_t} \quad (16)$$

$$[IDT_{out}(f)] = [R(f)]^{N_t} \quad (17)$$

### 2.3. Đề xuất ma trận truyền cho lớp nhảy vùng delay-line

Ma trận truyền  $[D(f)]$  lớp nhảy vùng delay-line đề xuất được xác định giống như vùng được phủ kim loại của một ngón tay khi bỏ qua hai vùng không phủ kim loại như sau:

$$[D(f)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_d(f)) & jZ_d \sin(\theta_d(f)) \\ jZ_d \sin(\theta_d(f)) & \cos(\theta_d(f)) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{với tổng trở: } Z_d(f) = \frac{d_m}{k^2 C_d W v_m} \quad (19)$$

$C_d$  là điện dung vùng khe hở giữa các bộ điện cực IDT với lớp nhảy từ FeNi. Xét trường hợp này, lấy gần đúng  $C_d = C_s$ . Góc sóng âm trong vùng delay-line  $\theta_d$  được tính theo công thức (20):

$$\theta_d(f) = \frac{2\pi f d_m}{v_m} \quad (20)$$

trong đó:  $d_m$  là chiều dài của lớp nhảy,  $v_m$  là vận tốc sóng âm trong vùng delay-line và bị tác động bởi cường độ từ trường đo và được xác định thông qua mô phỏng FEM.

Kết hợp các ma trận truyền (16), (17) và (18) ta xác định được ma trận truyền  $[SAW(f)]$  của cảm biến SAW-MO bằng cách nhân các ma trận truyền của hai bộ IDT với ma trận truyền của vùng delay-line.

$$[SAW(f)] = [IDT_{in}(f)][D(f)][IDT_{out}(f)] \quad (21)$$

### 2.4. Xây dựng quan hệ $v_m$ -H bằng mô phỏng FEM

Theo nguyên lý hoạt động của cảm biến, lớp nhảy từ FeNi do tác động của cường độ từ trường ngoài làm thay đổi vận tốc sóng âm bề mặt khi truyền qua vùng này ( $v_m$ ). Vì vậy, để thực hiện mô phỏng đáp ứng làm việc của cảm biến bằng phương pháp TM ta cần xác định được mối quan hệ giữa vận tốc sóng âm bề mặt với cường độ từ trường (đặc tính  $v_m$ -H). Đặc tính này được xác định bằng phương pháp mô phỏng FEM trên phần mềm ANSYS.

Quá trình mô phỏng FEM gồm các bước cơ bản như sau: xây dựng cấu trúc, nhập các ma trận hệ số áp điện, hệ số vật liệu, chia lưới, đôi lớp vật liệu, đặt điện áp lên IDT và đặt điều kiện biên. Quá trình này được thực hiện trên phần mềm ANSYS tương tự theo những công bố trước đây của nhóm [9, 10]. Trong nghiên cứu, FeNi được sử dụng làm vật liệu lớp nhảy vì có một số ưu điểm như độ phi tuyến thấp, lực kháng từ nhỏ và có độ nhạy cao [27, 28]. Bên cạnh đó, ST-Quartz được lựa chọn làm đế áp điện vì có hiệu ứng sóng âm bề mặt tốt nhất so với các loại góc cắt khác [29, 30]. Kích thước của cảm biến SAW-MO được thể hiện ở Hình 1 và Bảng 1. Các bộ thông số vật lý của các lớp vật liệu được trình bày ở Bảng 2.

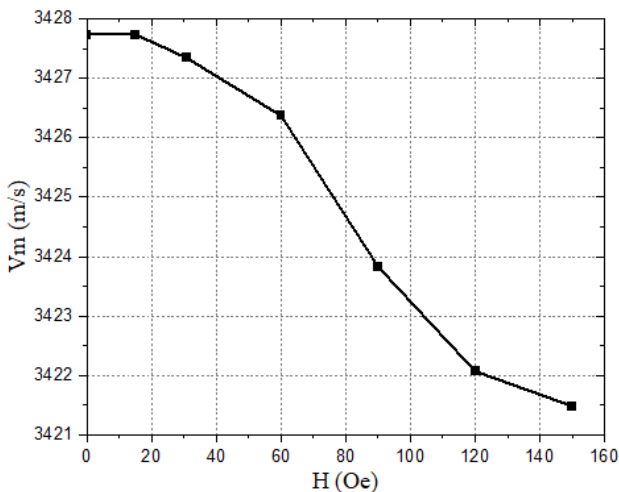
**Bảng 2:** Thông số vật lý của các lớp vật liệu [8, 28, 30].

Thông số	Kí hiệu	Giá trị		
		ST- Quartz	FeNi	Al
Mật độ ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	$\rho$	2651	8380	2697
Hệ số độ cứng (GPa)	$C_{11}$	87.26		
	$C_{12}$	6.57		
	$C_{13}$	11.95		
	$C_{14}$	-17.18		
	$C_{33}$	105.8		
	$C_{44}$	57.15		
Hệ số áp điện ( $\text{C.m}^{-2}$ )	$C_{66}$	40.35		
	$e_{11}$	0.17		
	$e_{12}$	-0.04		
	$e_{13}$	-0.13		
	$e_{14}$	0.08		
	$e_{25}$	0.07		
	$e_{26}$	-0.10		
Hằng số điện môi	$e_{35}$	-0.07		
	$e_{36}$	0.11		
	$\epsilon_{11}$	4.43		
	$\epsilon_{22}$	4.54		
Module Young (GPa)	$E$	E-H	70.3	
Hệ số Poisson	$\nu$		0.3	0.345

Kết quả mô phỏng FEM cho cảm biến FeNi/IDT/ST-Quartz có tần số trung tâm đạt  $f_0 = 85.693$  (MHz). Bảng 3 và Hình 4 là mối quan hệ  $v_m$ -H.

**Bảng 3:** Mối quan hệ giữa  $v_m$  và H.

TT	H	f (Hz)	$v_m$ (m/s)
1	0	85,693,359	3427.734
2	15	85,693,359	3427.734
3	30.7	85,683,594	3427.344
4	60	85,659,179	3426.367
5	90	85,595,703	3423.828
6	120	85,551,758	3422.070
7	150	85,537,109	3421.484



Hình 4: Kết quả mô phỏng FEM đặc tính  $v_m$ -H.

Sử dụng phương pháp hồi quy ta xác định được các hàm số bậc hai (B2) và bậc ba (B3) của mối quan hệ giữa  $v_m$  và H như sau:

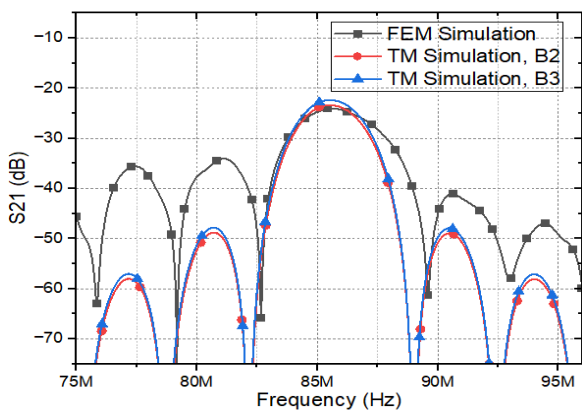
$$v_m = -8.10^{-5}H^2 - 0.0359H + 3428.2 \quad (22)$$

$$v_m = 5.10^{-6}H^3 - 0.0013H^2 + 0.0318H + 3427.6 \quad (23)$$

Các phương trình (22) và (23) được dùng để kích thích cường độ từ trường đến cảm biến SAW-MO trong mô phỏng TM.

### 3. Kết quả và thảo luận

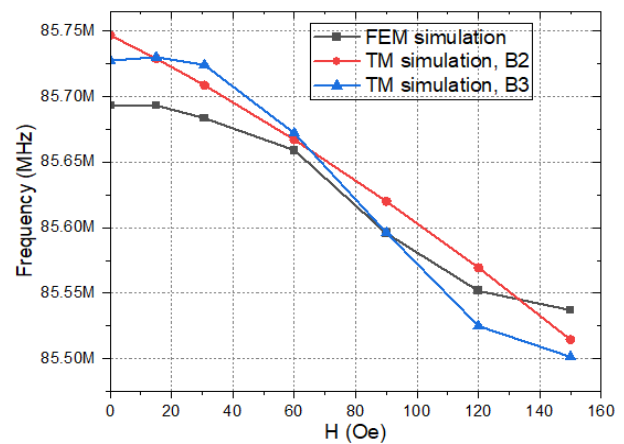
Mô hình mô phỏng trên được viết bằng phần mềm MATLAB để tính toán các đáp ứng làm việc của cảm biến FeNi/IDT/ST-Quartz, cường độ từ trường tác động vào cảm biến thông qua phương trình (22) và (23), kết quả được so sánh với mô phỏng FEM. Hình 5 chỉ ra tần số trung tâm của cảm biến, giá trị tần số trung tâm đối với mô phỏng theo phương pháp FEM, mô phỏng theo phương pháp TM (B2) và mô phỏng theo phương pháp TM (B3) lần lượt là 85.693 (MHz), 85.747 (MHz) và 85.728 (MHz). Kết quả cho thấy phương pháp TM và FEM đều cho tần số trung tâm gần giống nhau, có sự sai lệch nhỏ nhưng có thể chấp nhận được. Sự sai lệch này có thể do nhiều nguyên nhân gây nên, nhưng phần lớn là do các điều kiện giả định của mỗi phương pháp có tính đơn giản hóa riêng. Với phương pháp TM đơn giản hóa bằng cách giả định rằng sóng truyền đi mà không mất mát hoặc phân tán. Trong khi FEM cho phép tính toán chi tiết hơn về sự phân bố trường và phản hồi của vật liệu, dẫn đến kết quả chính xác hơn nhưng tốn kém về mặt thời gian tính toán cũng như là dung lượng bộ nhớ.



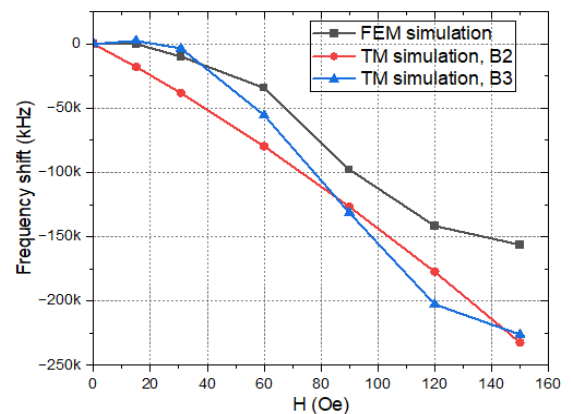
Hình 5: Kết quả mô phỏng tần số trung tâm.

Sau khi thực hiện mô phỏng tần số trung tâm, chúng tôi tiếp tục thực hiện mô phỏng các đáp ứng làm việc của cảm biến bằng phương pháp TM trên cơ sở quan hệ bậc hai (22) và bậc ba (23). Kết quả được thể hiện trên Hình 6 và Hình 7 và kết quả này cũng được so sánh với mô phỏng FEM.

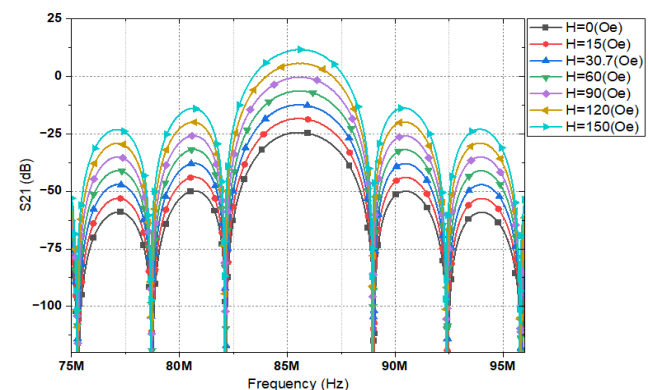
Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình đặc tính  $v_m$ -H bậc hai về cơ bản có xu hướng giảm theo so với mô phỏng FEM nhưng không phù hợp bằng mô hình bậc ba vì ngoài xu hướng giảm theo thì mô hình bậc ba còn có dạng đường cong tương đồng với mô phỏng FEM. Ngoài ra, cả hai phương pháp mô phỏng đều cho dải làm việc từ 0 đến 150 (Oe). Bên cạnh đó, biên độ giữa hai phương pháp có sự khác biệt là do mô phỏng TM sử dụng mô hình thông số tập trung nên kém chính xác hơn mô phỏng FEM sử dụng mô hình thông số dải. Mặt khác, Trên các Hình 8 và Hình 9 chỉ ra rõ hơn quá trình dịch tần số của cảm biến khi mô phỏng bằng phương pháp TM.



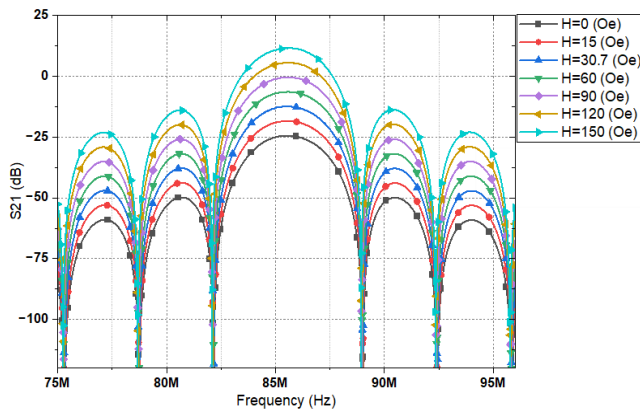
Hình 6: Đáp ứng làm việc của cảm biến FeNi/IDT/ST-Quartz.



Hình 7: Đáp ứng dịch tần của cảm biến FeNi/IDT/ST-Quartz.



Hình 8: Đáp ứng tần số với đặc tính  $v_m$ -H bậc hai.



Hình 9: Đáp ứng tần số với đặc tính  $v_m$ -H bậc ba.

Như vậy, kết quả cho thấy mô hình ma trận truyền đề xuất cho lớp nhạy FeNi của nghiên cứu là đúng đắn và phù hợp. Kết quả gần tương đương như nhau nhưng với phương pháp ma trận truyền có thể giảm thời gian tính toán và đơn giản hóa bài toán đi khá nhiều. Trong khi, để mô phỏng xong một đáp ứng làm việc với 7 điểm như Bảng 3 thì mô phỏng FEM cần thời gian là khoảng 70 giờ, trong khi với mô phỏng TM thì chỉ cần khoảng 105 phút, với trên cùng một cấu hình máy tính. Tuy nhiên mô phỏng TM cần biết trước tần số trung tâm, nhưng mô phỏng FEM thì không cần.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thành công trong việc đề xuất mô hình ma trận truyền [ABCD] cho lớp nhạy trên cảm biến SAW-MO delay-line với cấu trúc FeNi/IDT/ST-Quartz. Phương pháp ma trận truyền đã được áp dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của lớp nhạy từ đến tần số cộng hưởng khi cường độ từ trường thay đổi. Hơn nữa, mô hình đã được thực hiện thông qua phần mềm MATLAB, chứng minh tính ứng dụng và hiệu quả của nó trong việc mô phỏng và khảo sát đáp ứng làm việc của cảm biến SAW-MO. Ngoài ra, nghiên cứu này cũng là cơ sở để ứng dụng mô phỏng các mô hình cảm biến SAW khác nhau. Tuy nhiên, mô hình vẫn còn một số hạn chế nhất định như: chưa tính toán thể hiện được sự ảnh hưởng của độ dày lớp nhạy tới mô hình ma trận truyền và chưa mô tả được sự tương tác của từ trường H tới cảm biến do hiệu ứng từ giảo của vật liệu nhạy FeNi. Đây cũng là hai hướng phát triển mà nhóm chúng tôi sẽ nghiên cứu trong tương lai.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2023-TĐ-003.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] N. Fourati and C. Zerrouki (2017) *Surface acoustic wave sensors: From design to chemical and biological applications*. in 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), pp. 1-4: IEEE, Published.
- [2] N. H. Ha, N. H. Nam, D. D. Dung, N. H. Phuong, P. D. Thach, and H. S. Hong (2017) *Hydrogen gas sensing using palladium-graphene nanocomposite material based on surface acoustic wave*. Journal of Nanomaterials, vol. 2017.
- [3] L. Reindl, I. Shrena, S. Kenschil, and R. Peter (2003) *Wireless measurement of temperature using surface acoustic waves sensors*. in IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003, pp. 935-941: IEEE, Published.
- [4] A. Pohl (2000) *A review of wireless SAW sensors*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, frequency control, vol. 47, no. 2, pp. 317-332.
- [5] R. B. Priya, T. Venkatesan, G. Pandiyarajan, and H. M. Pandya (2015) *A short review of saw sensors*. J. Environ. Nanotechnol, vol. 4, no. 4, pp. 15-22.
- [6] M. Elhosni et al. (2016) *Magnetic field SAW sensors based on magnetostrictive-piezoelectric layered structures: FEM modeling and experimental validation*. Sensors Actuators A: Physical, vol. 240, pp. 41-49.
- [7] Z. T. Salim, U. Hashim, and M. M. Arshad (2016) *FEM modeling and simulation of a layered SAW device based on ZnO/128° YX LiNbO 3*. in 2016 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE), pp. 5-8: IEEE, Published.
- [8] J. Schmalz et al. (2020) *Multi-mode love-wave SAW magnetic-field sensors*. Sensors, vol. 20, no. 12, p. 3421.
- [9] H. S. Hoang (2024) *The effect of FeNi-AlN layer thickness on the response of magnetic SAW sensor by FEM simulation*. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, vol. 13, no. 1, pp. 167-178.
- [10] H. S. Hong (2022) *Simulating the piezoelectric substrate influence on the characteristics of surface acoustic wave-magnetostriction sensor based on the FeNi magnetic sensitive material*. VNUHCM Journal of Engineering Technology, vol. 5, no. 2, pp. 1426-1436.
- [11] C. S. Hartmann, D. T. Bell, and R. C. Rosenfeld (1973) *Impulse model design of acoustic surface-wave filters*. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, vol. 21, no. 4, pp. 162-175.
- [12] W. Wilson and G. Atkinson (2007) *Frequency domain modeling of SAW devices*. in NSTI Nanotech 2007-10th International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Published.
- [13] W. Wang, K. Lee, S. Yang, J. Hwang, and G. Kim (2006) *Optimized surface acoustic wave-based pressure sensor using equivalent circuit model*. in 2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, pp. 1092-1096: IEEE, Published.
- [14] V. Plessky and J. Koskela (2000) *Coupling-of-modes analysis of SAW devices*. International Journal of High Speed Electronics Systems, vol. 10, no. 04, pp. 867-947.
- [15] K.-y. Hashimoto and H. Yamaguchi (1996) *General-purpose simulator for leaky surface acoustic wave devices based on coupling-of-modes theory*. in 1996 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings, vol. 1, pp. 117-122: IEEE, Published.
- [16] W. Wilson and G. Atkinson (2009), "Comparison of transmission line methods for surface acoustic wave modeling", 2009.
- [17] O. Schwelb, E. Adler, and J. Słaboszewicz (1990) *Modeling, simulation, and design of SAW grating filters*. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, frequency control, vol. 37, no. 3, pp. 205-214.
- [18] N. V. Ramachandran (2018) *Development to a flexible surface acoustic wave sensor for strain sensing*.
- [19] X. Zhang, Y. Xu, M. Pan, Y. Fan, and H. Zhang (2006) *Modeling and Simulation of Wireless Passive Sensors Based on Surface Acoustic Wave Delay Lines*. in 2006 International Conference on Communication Technology, pp. 1-4: IEEE, Published.
- [20] R. C. Jesus, E. A. Carvalho, O. Tamarin, R. C. Freire, and C. Dejos (2022) *Equivalent circuit models for SAW delay line sensors*. IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 12, pp. 11810-11818.
- [21] R. S. Govindarajan, E. Rojas-Nastrucci, and D. Kim (2020) *Strain sensing using flexible surface acoustic wave sensor*. in Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2020, vol. 11379, pp. 128-135: SPIE, Published.
- [22] K.-C. Park and J. R. Yoon (2011) *Transmission line matrix modeling for analysis of surface acoustic wave hydrogen sensor*. Japanese Journal of Applied Physics, vol. 50, no. 7S, p. 07HD06.
- [23] G. Atkinson (2009) *A Comparison of Surface Acoustic Wave Modeling Methods*. in Nanotech Conference and Exposition 2009, no. LF99-8088, Published.
- [24] S. Krishnamurthy, (2007), *Wireless passive surface acoustic wave (SAW) sensing system*. Western Michigan University.
- [25] R. B. Priya, T. Venkatesan, and H. M. Pandya (2016) *A comparison of surface acoustic wave (SAW) delay line modelling techniques for sensor applications*. J. Environ. Nanotechnol, vol. 5, no. 2, pp. 42-47.

- [26] H. S. Hong (2015) *Ứng dụng phương pháp mô hình mạch tương đương trong mô phỏng đáp ứng tần số của bộ cộng hưởng cao tần SAW*. Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự, trang 82-88.
- [27] Y. Sun, Y. Jia, Y. Zhang, L. Cheng, Y. Liang, and W. Wang (2021) *Enhanced Sensitivity of FeGa Thin-Film Coated SAW Current Sensor*. Applied Sciences, vol. 11, no. 24, p. 11726.
- [28] J. Tong *et al.* (2017) *Development of a magnetostrictive FeNi coated surface acoustic wave current sensor*. Applied Sciences, vol. 7, no. 8, p. 755.
- [29] K. K. Zadeh, A. Trinchi, W. Wlodarski, and A. Holland (2002) *A novel Love-mode device based on a ZnO/ST-cut quartz crystal structure for sensing applications*. Sensors Actuators A: Physical, vol. 100, no. 2-3, pp. 135-143.
- [30] P. Heyliger, H. Ledbetter, and S. Kim (2003) *Elastic constants of natural quartz*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 114, no. 2, pp. 644-650.