

MÔ PHỎNG HOẠT ĐỘNG CỦA LINH KIỆN SAW 120 MHz VỚI CẤU TRÚC CHỌN LỌC TỪ PHƯƠNG PHÁP TAGUCHI

DƯƠNG TẤN PHƯỚC, TRẦN HUY THÔNG, TRẦN THỊ MINH THƯ, NGUYỄN ĐĂNG GIANG,
TRẦN THỊ THÁNH, TRƯƠNG HỮU LÝ, NGUYỄN NGỌC VIỆT

Trung tâm Nghiên cứu và Đào tạo Thiết kế Vi mạch ICDREC
Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

Bài báo trình bày việc tối ưu thiết kế và mô phỏng hoạt động của linh kiện sóng âm bề mặt SAW với tần số cộng hưởng 120 MHz. Phương pháp chọn lọc Taguchi, mô hình phần tử hữu hạn và mạch điện tương đương đã được phối hợp sử dụng để đưa ra cấu trúc tối ưu của linh kiện SAW, đáp ứng các tiêu chí về độ nhạy và độ chống nhiễu. Bên cạnh đó, phương pháp định lượng tải hấp thụ trên bề mặt cũng đã được xây dựng nhằm hướng đến ứng dụng linh kiện SAW làm cảm biến hóa học và sinh học.

Từ khóa: *linh kiện sóng âm bề mặt, SAW, cảm biến, phương pháp Taguchi, mô phỏng, ANSYS, Matlab.*

SIMULATION OF THE OPERATION OF 120 MHz SAW DEVICE WITH THE STRUCTURE SELECTED FROM THE TAGUCHI METHOD

Summary

This article presents an optimal design and operation simulation of surface acoustic wave (SAW) device with a resonant frequency of 120 MHz. The Taguchi selection method, finite element model and equivalent circuit have been used to figure out the optimal structure of SAW device, in terms of high sensitivity and signal/noise criteria. In addition, quantification of the gas load absorbed on the device surface has also been developed, which could potentially open new ways for SAW devices being used as chemical or biological sensors.

Keywords: *Surface Acoustic Wave (SAW) devices, sensors, Taguchi method, simulation, ANSYS, Matlab.*

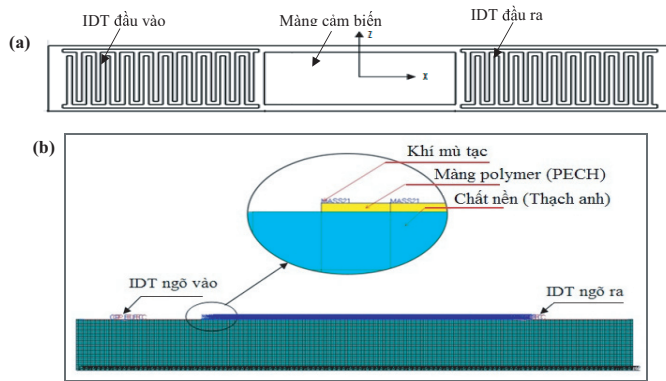
Giới thiệu

Bắt đầu từ những năm 70 của thế kỷ trước, linh kiện sóng âm bề mặt (Surface Acoustic Wave - SAW) đã được sử dụng phổ biến trong các thiết bị điện tử viễn thông như bộ lọc tần số, bộ dao động, bộ chuyển đổi... Ngày nay, linh kiện này không ngừng được mở rộng sang lĩnh vực công nghiệp, ô tô, y tế, môi trường, và đặc biệt là trong dân dụng như làm cảm biến khí, độ ẩm, nhiệt độ, khối lượng...[1].

Trong từng ứng dụng khác nhau, các linh kiện SAW phải có tần số cộng hưởng tương thích, phân bố trong dải rộng từ 0,01 đến 2 GHz, và được quyết định bởi các thông số cấu trúc của linh kiện [2]. Do đó, việc thiết kế cấu trúc và mô phỏng hoạt động của linh kiện SAW có các thông số thích hợp là hết sức cần thiết. Tần số cộng hưởng cần phải đảm bảo độ nhạy của linh kiện và không quá khó khăn trong việc chế tạo cũng như xử lý tín hiệu. Các thông số như số cặp ngón của IDT (Inter-Digital Transducer), khoảng cách giữa các ngón, kích thước màng dẫn sóng so với bước sóng, bề dày và vật liệu làm chất nền... là những yếu tố quyết định khả năng hoạt động của linh kiện và chúng tác động qua lại lẫn nhau. Trong quá trình thiết kế, hệ số phẩm chất (độ nhạy và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu) của linh kiện là một trong các tiêu chí quan trọng nhất để so sánh và lựa chọn cấu trúc. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về hoạt động của linh kiện SAW khi có tải trên bề mặt vẫn chưa được quan tâm đúng mức. Vì thế, việc xây dựng một quy trình thiết kế chặt chẽ và mô phỏng hoạt động của linh kiện trong cả điều kiện có tải lẫn không tải là một yêu cầu

cấp thiết.

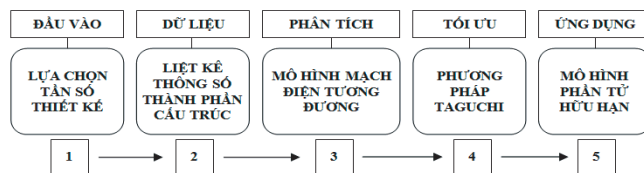
Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu các vấn đề nêu trên. Quy trình chọn lọc các thông số cấu trúc được thực hiện theo phương pháp Taguchi. Phương pháp định lượng tải trên bề mặt linh kiện để tạo đường chuẩn đã được xây dựng nhằm hướng đến ứng dụng trong cảm biến hóa học và sinh học. Hình 1 là mô hình của linh kiện SAW có tráng phủ lớp màng cảm biến trong khoảng không gian truyền sóng giữa hai IDT.



Hình 1: mô hình linh kiện SAW. Mô hình hình học (a), mô hình phần tử hữu hạn (b)

Phương pháp thực hiện

Quy trình thiết kế cấu trúc linh kiện SAW được tiến hành trên cơ sở vận dụng phương pháp chọn lọc tối ưu Taguchi nhằm mục đích rút ngắn thời gian và khối lượng dữ liệu cần phân tích, mà vẫn đảm bảo được sự lựa chọn các thông số cấu trúc tốt nhất. Việc tạo cơ sở dữ liệu ứng xử của linh kiện để tiến hành chọn lọc được thực hiện dựa trên mô hình mạch điện tương đương và phương pháp phần tử hữu hạn. Ngôn ngữ lập trình tính toán Matlab được sử dụng để phân tích mô hình mạch điện tương đương và xử lý dữ liệu sau khi mô phỏng, đồng thời phần mềm ANSYS được dùng để phân tích ứng xử cấu trúc theo phương pháp phần tử hữu hạn. Quy trình thiết kế linh kiện SAW được xây dựng như hình 2.



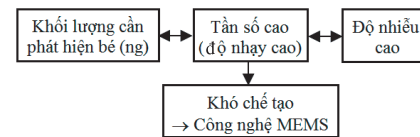
Hình 2: quy trình thiết kế cấu trúc linh kiện SAW

Lựa chọn tần số cộng hưởng và thông số cấu trúc

Trước tiên, nhóm nghiên cứu xác định tần số thiết kế thích hợp cho linh kiện. Tần số riêng của dạng dao động sóng Rayleigh trên bề mặt tinh thể phụ thuộc vào hai thông số là vận tốc truyền sóng và bước sóng theo công thức:

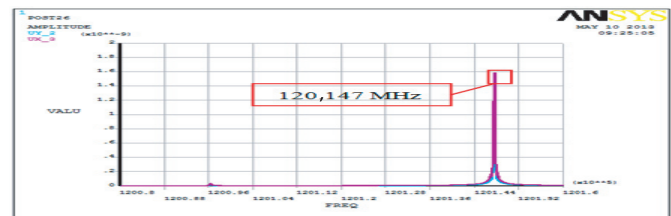
$$f_{device} = \frac{v_{crystal}}{\lambda_{design}} \quad (1)$$

Trong đó, vận tốc lan truyền sóng $v_{crystal}$ phụ thuộc vào tính chất cơ học của tinh thể vật liệu được chọn làm chất nền. Do đó, đối với từng loại vật liệu chất nền, tần số thiết kế sẽ được chọn lựa chủ yếu dựa vào bước sóng λ_{design} , hay chính xác hơn là phụ thuộc vào thông số hình học của bộ tạo sóng. Bước sóng càng ngắn (tần số càng cao) thì linh kiện sẽ càng nhạy nhưng kèm theo đó là tín hiệu sẽ giảm dần ngang mức nhiễu, gây sai lệch tín hiệu và khó chế tạo. Vì vậy cần lưu ý, tần số tối ưu chỉ mang tính tương đối, và việc lựa chọn tần số thiết kế phải phù hợp với từng ứng dụng và thỏa mãn các tiêu chí như hình 3 [3].



Hình 3: các tiêu chí lựa chọn tần số hoạt động

Đặc trưng của linh kiện SAW là có thể kiểm soát tần số hoạt động thông qua cấu trúc IDT, do đó có rất nhiều tần số cộng hưởng có thể được lựa chọn. Nhằm hướng đến ứng dụng trong cảm biến hóa học và sinh học với ngưỡng phát hiện thấp (ppm), nhóm nghiên cứu đã chọn tần số linh kiện SAW trong khoảng 120 MHz làm tần số thiết kế. Tần số này đảm bảo yêu cầu về độ nhạy cao, dễ chế tạo bằng công nghệ MEMS [2, 3] và đặc biệt là khả năng xử lý tín hiệu [4]. Khi tần số cộng hưởng quá cao (GHz), việc thiết kế và chế tạo mạch xử lý sẽ trở nên phức tạp và tốn kém, gây khó khăn trong việc ứng dụng vào thực tế. Bằng cách sử dụng kỹ thuật đáp ứng điều hòa với nguồn kích thích là điện áp, giá trị tần số tính toán được là 120,15 MHz như trong hình 4.



Hình 4: phân tích đáp ứng điều hòa bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Dựa trên các tài liệu tham khảo [2, 3], nhóm nghiên cứu đưa ra các thông số cấu trúc cần được phân tích để xác định bản thiết kế tối ưu cho linh kiện SAW. Ở đây nhóm chỉ tiến hành so sánh hai vật liệu áp điện phổ biến dùng cho linh kiện SAW là Quartz ST cut X và LiNbO₃ cut Y.

Bảng 1: các thông số cấu trúc cần xem xét

Thông số cấu trúc	Ký hiệu	Lựa chọn 1	Lựa chọn 2	Lựa chọn 3
Chất nền	A	Quartz ST cut X	LiNbO ₃ cut Y	
Bề dày chất nền	B	10λ	20λ	40λ
Số cặp ngón IDT	C	20	40	80
Chiều dài màng	D	50λ	50λ $\frac{1}{4}$	50λ $\frac{3}{4}$
Chiều rộng màng	E	25λ	25λ $\frac{1}{4}$	25λ $\frac{3}{4}$

Linh kiện SAW có 5 thành phần cấu trúc quan trọng cần xem xét ký hiệu từ A đến E, và mỗi yếu tố sẽ có từ 2 đến 3 lựa chọn như liệt kê trong bảng 1. Ở đây, khoảng cách giữa các ngón điện cực có giá trị bằng với kích thước ngón nhằm đảm bảo biên dạng sóng Rayleigh tạo thành. Cứ hai cặp ngón kế nhau sẽ tạo thành một bước sóng, vì vậy bề rộng và khoảng cách ngón có giá trị bằng nhau và bằng λ/4. Chiều dài ngón (độ chống điện cực) và bề dày điện cực tỷ lệ thuận với tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu [3] nên được chọn sát biên của chất nền. Bên cạnh đó, không gian lan truyền sóng (khoảng cách giữa hai IDT) tỷ lệ nghịch với số cặp ngón. Theo nguyên tắc thông thường cần phải tiến hành mô phỏng đáp ứng đầu ra của một tổ hợp 2 x 3⁴ cấu trúc để xác định thiết kế tốt nhất. Tuy nhiên, phương pháp Taguchi chỉ chọn các cấu trúc chủ yếu để khảo sát mà vẫn đảm bảo được tính tổng thể của nghiên cứu [3]. Theo bảng Taguchi, chúng ta chỉ cần tiến hành mô phỏng và so sánh kết quả của 18 cấu trúc như trong bảng 2.

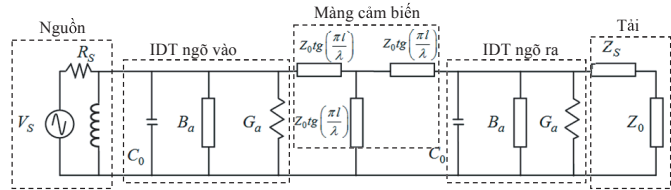
Bảng 2: danh sách các cấu trúc cần tiến hành so sánh theo Taguchi

		Cấu trúc																	
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Ký hiệu	A	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2
	B	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	1	1
	C	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3	1	2
	D	1	2	3	1	2	3	2	3	1	3	1	2	2	3	1	1	3	1
	E	1	2	3	2	3	1	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	3	1

Phân tích số liệu và lựa chọn cấu trúc

Cơ sở dữ liệu cho quá trình phân tích và lựa chọn là độ dịch bằng thông tần số của các cấu trúc được đề ra trong bảng 2. Mô hình mạch điện tương đương được thiết lập với tham khảo từ [5], bao gồm ba thành phần chính: hai thành phần của IDT (mặc định là giống

nhau) và thành phần của màng cảm biến. Ngoài ra còn có mạch điện cung cấp nguồn cho IDT ngõ vào như trình bày trong hình 5. Trong đó R_s và L_s là điện trở và cảm kháng tương đương nguồn, C_0 là điện dung giữa các cặp ngón, G_a và B_a là giá trị độ dẫn điện và giá trị độ nạp điện của IDT, Z_0 là trở kháng bề mặt tinh thể, Z_s là trở kháng bề mặt lớp chất tải.



Hình 5: mô hình mạch điện tương đương của linh kiện SAW

Theo mô hình trên, ta sẽ tính toán được giá trị thay đổi tần số khi có tải và không tải [5] làm đầu vào cho phương pháp ANOM và ANOVA theo công thức:

$$\Delta BW = \frac{2 \cdot \Delta f}{N} = 2 \cdot \frac{c_m \cdot f_0^2 \cdot M_s}{N \cdot \rho_q \cdot h \cdot A} \quad (2)$$

Phương pháp ANOM được sử dụng để xem xét sự ảnh hưởng của từng thành phần cấu trúc lên độ nhạy và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của linh kiện theo công thức:

$$SST = \frac{SS}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (3)$$

Trong đó, x_i là độ nhạy hoặc tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu trung bình của từng lựa chọn cấu trúc ($A_1, A_2, \dots$), $\bar{x}$ là giá trị trung bình của $(A_1 + A_2) / 2$, n là số bậc tự do (được tính bởi số lựa chọn của thành phần cấu trúc trừ đi một), SS là tổng độ ảnh hưởng đến giá trị độ nhạy hoặc tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, SST là độ ảnh hưởng trung bình đến giá trị độ nhạy hoặc chống nhiễu.

Thuật toán ANOVA dùng để tính toán ảnh hưởng của từng lựa chọn thông số cấu trúc lên hệ số phẩm chất của thiết kế. Hệ số phẩm chất được thể hiện qua hai giá trị là độ nhạy và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu.

Độ nhạy của từng cấu trúc:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^J M_j y_{ij}}{\sum_{j=1}^J M_j^2} \quad (4)$$

Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu:

$$S_i/N = 10 \lg \left(\frac{\beta_i^2}{MSE_i} \right), MSE_i = \sum_{j=1}^I \sum_{j=1}^J (y_{ij} - \beta_i M_j)^2 \quad (5)$$

Với j là số thứ tự bậc lựa chọn giá trị đầu vào (khối lượng), y_{ij} là giá trị bằng thông ở lần mô phỏng thứ $i \times j$ và β_i được xem là độ nhạy của bản thiết kế thứ i [3].

Khảo sát ứng xử khi có tải

Để nghiên cứu hoạt động của linh kiện SAW khi có tải, màng mỏng polymer PECH (Polyepichlorohydrin) được tráng phủ trên bề mặt linh kiện nhằm hấp thu khí lưu huỳnh mù tạc ($C_4H_8Cl_2S$) [6]. Đây là một chất độc tế bào, tác nhân làm phồng da, hình thành mụn nước trên da khi tiếp xúc. Khối lượng chất tải lần lượt là $M_1 = 11,8$ ng, $M_2 = 47,4$ ng và $M_3 = 106,6$ ng tương ứng với nồng độ khí mù tạc trong không khí lần lượt là 10 ppm, 40 ppm và 90 ppm như bảng 3. Các giá trị khối lượng chất tải này hơn kém nhau nhiều lần có tác dụng tăng độ chính xác khi thống kê kết quả mô phỏng, đồng thời xem xét ảnh hưởng của sự gia tăng khối lượng lên độ biến thiên bằng thông tần số. Các hệ số phẩm chất của từng bản thiết kế bao gồm độ nhạy (β) và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (S/N). Những hệ số này được tính toán dựa trên giá trị độ giảm băng thông thu thập được qua các lần mô phỏng. Bên cạnh việc hiểu rõ hoạt động của linh kiện, bước phân tích này còn minh chứng khả năng sử dụng SAW trong việc cảm biến định lượng các tác nhân hóa học và sinh học. Khối lượng tương đương khí mù tạc được tính toán theo công thức:

$$m_{SM} = \frac{C \times (m_{Air})}{(10^6 - C)} \quad (6)$$

Với C là nồng độ khí mù tạc trong không khí, m_{Air} là khối lượng tương đương của 1 ml không khí.

Mô hình phần tử hữu hạn linh kiện SAW

Bảng 3: nồng độ và khối lượng tương đương của khí mù tạc phân tán trong không khí

Nồng độ (ppm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Khối lượng tương đương (ng)	0	11,8	23,7	35,5	47,4	59,2	71,0	82,9	94,7	106,6	118,4

Phương pháp phần tử hữu hạn với sự hỗ trợ của phần mềm ANSYS được sử dụng để phân tích ứng xử của linh kiện trong trường hợp cảm biến khí. Mô hình được xây dựng trong không gian hai chiều (2D) nhằm giảm thiểu thời gian tính toán và phân tích. Dữ liệu đầu ra sẽ thông qua các phép phân tích và xử lý tín hiệu

nếu phân tích tương quan, phân tích tín hiệu trên miền tần số (Fourier) để tạo cơ sở dữ liệu. Mô hình phần tử hữu hạn của linh kiện SAW được xây dựng bằng phần tử PLANE13 có hỗ trợ phân tích hiệu ứng áp điện (Piezoelectric) như hình 1b. Số bậc tự do tại mỗi nút là 3, bao gồm chuyển vị theo 2 phương x, y (U_x, U_y) và điện áp (VOLT). Phần tử MASS21 được sử dụng để mô hình hóa phần tử khí bám trên bề mặt màng cảm biến và có xét đến quán tính của khối lượng. Sử dụng kỹ thuật ràng buộc điểm (CP Node) để mô hình hóa hai IDT đầu vào và đầu ra. Giai đoạn tiền xử lý sử dụng phần mềm chuyên dụng là HyperMesh, lưới được chia theo cấu trúc hình tứ giác với số phần tử là 20420 phần tử bậc nhất (không có nút giữa) với mật độ đều nhằm tăng độ chính xác nhưng kích thước các ma trận không lớn như dùng phần tử tam giác, tiêu chí chia lưới được xét đến là skewness nhỏ hơn 0,4, aspect nhỏ hơn 2 để tránh hiện tượng dominate giữa các ma trận khi lắp ghép, và jacobian lớn hơn 0,8 nhằm tránh sai số khi chuyển về phần tử chủ trong không gian tham chiếu, mục đích là tăng tốc độ hội tụ nghiệm trong quá trình phân tích theo thời gian và tránh sai số do mapping dựa trên cơ sở phần tử tốt hơn. Quá trình phân tích sử dụng kỹ thuật đáp ứng quá độ (transient) và tính toán bằng phương pháp chồng chất (superposition). Vật liệu dùng trong mô phỏng đặc trưng bởi các ten xơ bất đẳng hướng và phụ thuộc vào góc quay tinh thể. Kết quả toàn bộ quá trình được đánh giá dựa trên độ giảm băng thông, sự suy hao năng lượng và độ dịch tần số.

Kết quả

Cấu trúc tối ưu của linh kiện SAW

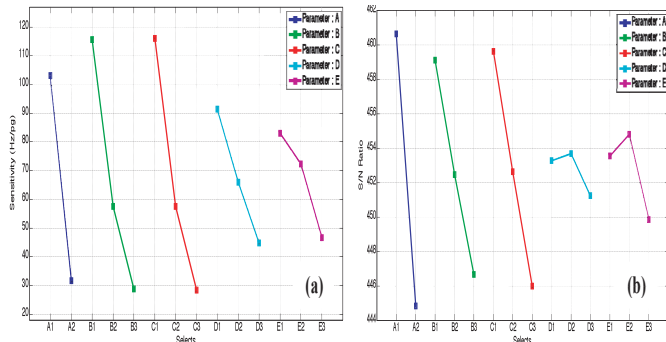
Dựa vào dữ liệu ứng xử của từng cấu trúc, nhóm nghiên cứu tiến hành chọn lọc tối ưu theo phương pháp Taguchi. Bảng 4 trình bày kết quả thu được sau khi sử dụng thuật toán ANOM và ANOVA. Trong đó, vật liệu chất nền (ký hiệu A) là yếu tố có ảnh hưởng quan trọng và rõ rệt nhất lên độ nhạy và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của cảm biến ($SST_{Sensitivity} = 2,544$ và $SST_{S/N} = 124,84$). Đây chính là vấn đề cần quan tâm đầu tiên khi chế tạo. Hai yếu tố quan trọng tiếp theo là bề dày chất nền (ký hiệu B) và số cặp ngón IDT (ký hiệu C). Việc lựa chọn cặp ngón có ảnh hưởng $SST = 1,991$ và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu là 46,333. Trong khi đó, thông số bề dày có ảnh hưởng lên độ nhạy là $SST = 1,950$ và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu là lên độ nhạy tương ứng với $SST = 38,697$. Qua đó cho thấy, ảnh hưởng của số cặp ngón IDT nhiều hơn so với ảnh hưởng của bề dày chất nền. Yếu tố chiều dài (ký hiệu D) và chiều rộng (ký hiệu E) màng cảm biến đóng vai trò cuối cùng

trong khả năng ảnh hưởng lên phẩm chất cảm biến. Do mỗi thành phần đều ảnh hưởng đến phẩm chất của các cấu trúc nên để phân tích độ nhạy hoặc tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của một thành phần cấu trúc bất kỳ, ta cần thống kê kết quả của các cấu trúc được đề ra theo bảng Taguchi mà cấu trúc đó có sự đóng góp của thành phần cần xét, các thành phần còn lại không cố định mà có giá trị phụ thuộc vào bảng Taguchi.

Bảng 4: kết quả tính toán sự ảnh hưởng lên phẩm chất linh kiện của từng thành phần cấu trúc

Ký hiệu	A	B	C	D	E
Độ nhạy (SST)	2,544	1,950	1,991	0,542	0,347
Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SST)	124,84	38,697	46,333	1,691	6,576

Nhóm nghiên cứu cũng xem xét ảnh hưởng của từng lựa chọn thông số cấu trúc lên hệ số phẩm chất của các bản thiết kế. Yếu tố A có hai lựa chọn là A₁ (Thạch anh ST-cutX) và A₂ (LiNbO₃-cut Y). Theo hình 6a và hình 6b, bản thiết kế với yếu tố A₁ có độ nhạy trung bình và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu đạt giá trị cao hơn hẳn so với các bản thiết kế sử dụng yếu tố A₂. Vì thế yếu tố A₁ được lựa chọn. Thực hiện tương tự với các yếu tố còn lại, nhóm nghiên cứu đã chọn ra bản thiết kế có thông số tốt nhất là A₁B₁C₁D₂E₂ (bảng 5). Điểm đặc biệt khi sử dụng phương pháp Taguchi là chỉ với 18 lần mô phỏng, ta đã chọn ra được cấu trúc tốt nhất trong tổng thể 2 x 3⁴ cấu trúc cần xem xét.



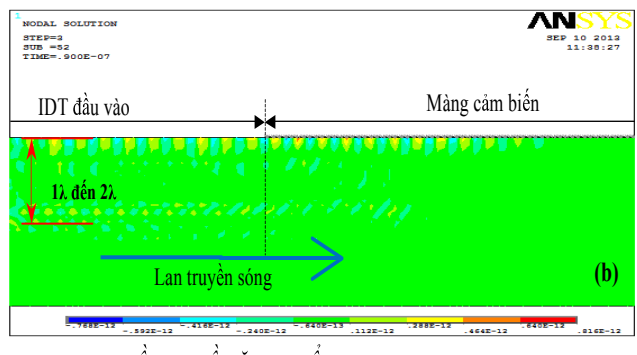
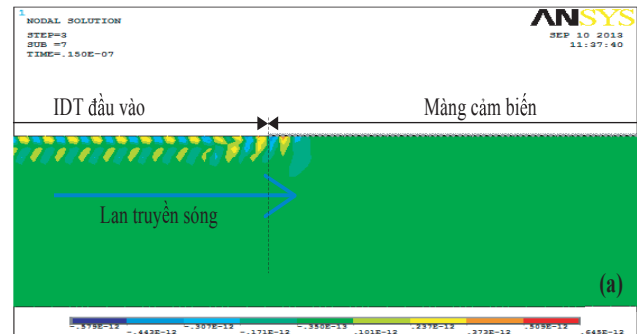
Hình 6: độ nhạy trung bình của các thông số (a) và tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu trung bình của các thông số (b)

Chất nền	Vật liệu	Thạch anh ST cut X
	Dày	10λ = 263 μm
	Ngón	20 (cặp)
IDT	Khoảng cách ngón	λ / 4 = 6.575 μm
	Bề rộng ngón	λ / 4 = 6.575 μm
	Khoảng cách hai IDT	202 λ / 4 = 1.328 mm
Màng	Dài	50 $\frac{1}{4}$ λ = 1.324 mm
	Rộng	25 $\frac{1}{4}$ λ = 0.66 mm

Bảng 5: thông số thiết kế được lựa chọn tương ứng với tần số 120,15 MHz

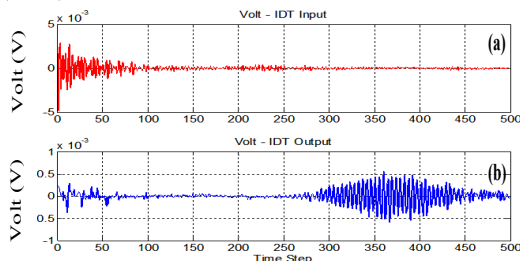
Hoạt động của linh kiện SAW và ứng dụng làm cảm biến khí

Hoạt động của linh kiện SAW: sau khi tìm được cấu trúc tối ưu, nhóm nghiên cứu tiến hành mô hình hóa và phân tích hoạt động của linh kiện SAW khi có điện áp kích thích $\pm 5(mV)$. Hình 7 biểu diễn sự lan truyền sóng trên bề mặt tinh thể tại các thời điểm khác nhau sau khi ngừng cấp điện áp. Dựa vào phổ màu theo chuyển vị của mô hình phần tử hữu hạn, ta có thể quan sát được sự phân bố biến dạng của tinh thể theo hai phương x và y là khác nhau. Sóng lan truyền theo phương y (tức thành phần sóng thâm nhập vào bề dày tinh thể) bị suy hao nhanh chóng trong khoảng một đến hai bước sóng. Thành phần sóng theo phương x thì lan truyền theo thời gian và đến IDT đầu ra.



Hình 7: sóng lan truyền trên bề mặt tinh thể thạch anh ST Cut X sau 15 ns (a) và 90 ns (b)

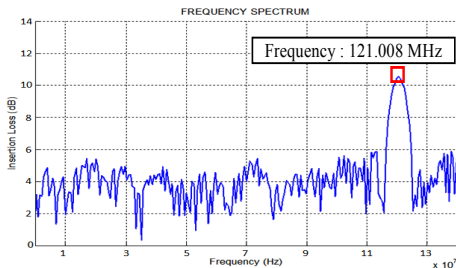
Tiến hành lấy dữ liệu dao động tại các nút trên IDT đầu vào và IDT đầu ra để tạo cơ sở dữ liệu cho quá trình phân tích tín hiệu. Với điện áp kích thích là một xung $\pm 5(mV)$ tại IDT đầu vào, sau khi ngắt nguồn kích thích, biên độ điện áp tắt dần theo thời gian (hình 8a) và tạo tín hiệu ở IDT đầu ra nhờ sự lan truyền sóng trên bề mặt tinh thể (hình 8b).



Hình 8: tín hiệu điện áp của IDT đầu vào (a) và IDT đầu ra (b), với 1 time step = 1,67 ns

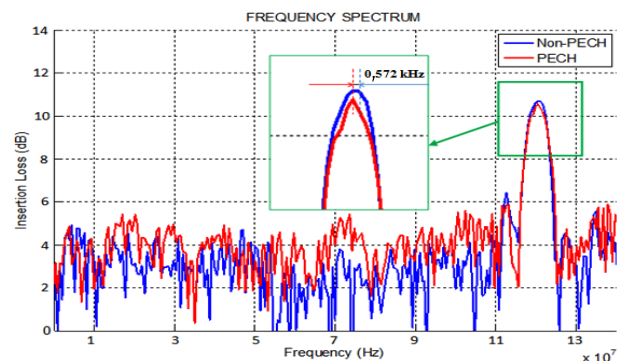
Dựa trên tín hiệu thu được từ IDT đầu ra của hình 8b, sử dụng thuật toán biến đổi Fourier nhanh (FFT) để phân tích phổ tần số. Trong bài báo này, phổ được phân tích theo mức suy giảm logarithm của năng lượng tín hiệu dao động.

Đối với linh kiện SAW chưa có màng polymer, phổ tần số thu được cho thấy tần số cộng hưởng hội tụ tại 121,01 MHz (hình 9). Giá trị này xấp xỉ giá trị tần số lựa chọn thiết kế ban đầu theo phân tích đáp ứng điều hòa (120,15 MHz). Do đó, mô hình phần tử hữu hạn sử dụng để phân tích ứng xử của linh kiện là có thể chấp nhận được. Kế đến, nhóm nghiên cứu tiến hành phân tích trường hợp linh kiện có phủ màng cảm biến.



Hình 9: phổ tần của linh kiện (chưa có màng cảm biến PECH)

Ứng dụng làm cảm biến khí: để ứng dụng làm cảm biến khí, màng polymer PECH được giả định tráng phủ lên trên bề mặt linh kiện SAW trong vùng giữa hai IDT, nhờ khả năng hấp thu khí mù tạc với các nồng độ khác nhau. Quá trình mô phỏng màng PECH cũng sử dụng phần tử PLANE13 tham chiếu đến các nút trên cùng của mô hình phần tử chất nền thạch anh, tuy nhiên, vật liệu được thay đổi cho phù hợp với thuộc tính lớp màng, chỉ sử dụng ten xơ hằng số đàn hồi, loại bỏ ten xơ hằng số áp điện và phi điện. Vẫn sử dụng phương pháp phân tích tín hiệu đã đề cập, kết quả phân tích phổ tần số trên hình 10 cho thấy, linh kiện khi có màng polymer bị giảm tần số khoảng 0,572 kHz so với khi chưa phủ màng. Nguyên nhân sự giảm tần số này là do ảnh hưởng của hiệu ứng khối lượng màng polymer tác động lên bề mặt tinh thể [7].



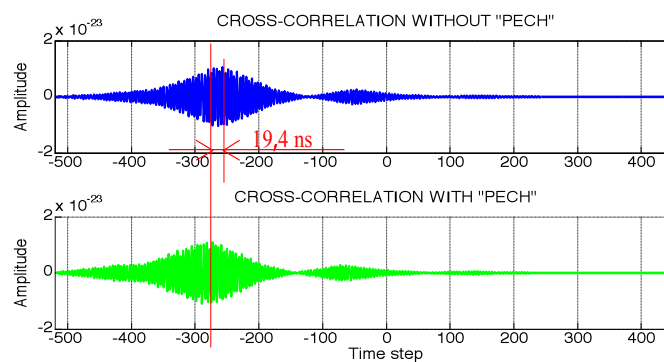
Hình 10: phổ tần số bị dịch khi có màng polymer PECH

Nhóm tiếp tục tiến hành phân tích tương quan tín hiệu nhằm xác định mức năng lượng cũng như thời gian lan truyền sóng. Phân tích tương quan chéo cho kết quả thời gian lan truyền của sóng từ IDT đầu vào sang IDT đầu ra. Hình 11 cho thấy thời gian lan truyền có giá trị 424,7 ns khi không có màng và 444,1 ns khi có màng cảm biến PECH. Quá trình truyền sóng khi có màng chậm đi một khoảng thời gian 19,4 ns. Tiến hành tính toán giá trị vận tốc trong cả hai trường hợp, ta thấy vận tốc lan truyền sóng giảm đi 4,377% khi linh kiện SAW được phủ lớp màng PECH. Tính toán cụ thể như sau:

$$v_{non-PECH} = \frac{s}{t} = \frac{1,338 \cdot 10^{-3}}{424,681 \cdot 10^{-9}} = 3150,6 \text{ (m/s)}$$

$$v_{PECH} = \frac{s}{t} = \frac{1,338 \cdot 10^{-3}}{444,119 \cdot 10^{-9}} = 3012,7 \text{ (m/s)}$$

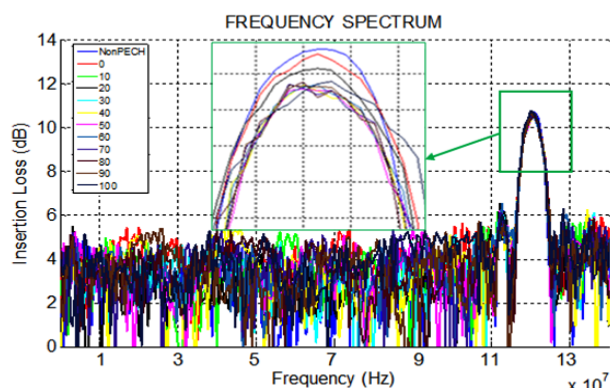
Trong đó, s là khoảng cách giữa hai IDT, t là thời gian lan truyền sóng.



Hình 11: phân tích tương quan chéo dựa trên tín hiệu chuyển vị, với 1 time step = 1,67 ns

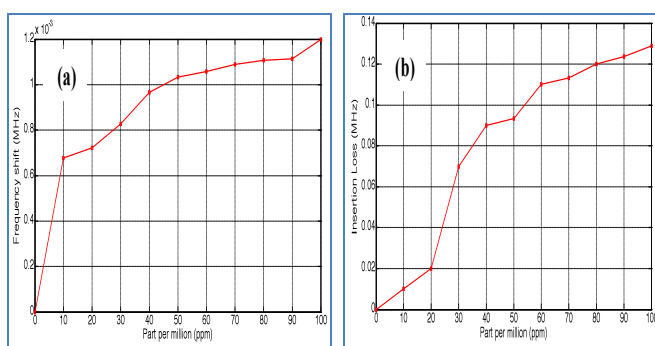
Linh kiện SAW với màng PECH được khảo sát hoạt động làm cảm biến khí, với nồng độ khí mù tạc thay đổi từ 0 ppm đến 100 ppm. Do quá trình xảy ra nhanh nên các phân tử khí chỉ tạo liên kết trên bề mặt lớp

màng mà không làm thay đổi tính chất cơ học và vật lý của lớp màng [7], vì vậy, sự thay đổi nồng độ sẽ tương ứng với thay đổi các giá trị hằng số đặc trưng của phần tử MASS21 trong bảng 3. Do độ dịch tần số khá nhỏ nên độ phân giải phải được chọn rất mịn, trong nghiên cứu này, tần số lấy mẫu được lấy gấp 10 lần tần số cơ bản, độ phân giải tương ứng là 100 Hz với số mẫu là 12 triệu mẫu. Phổ tần số được trình bày trong hình 12.



Hình 12: phổ tần số cảm biến theo các nồng độ khí mù tạc

Quan sát phổ tần số ta thấy trong trường hợp có tải, tần số cộng hưởng và năng lượng của tín hiệu dao động (điện áp, chuyển vị) có xu hướng giảm dần. Để làm rõ hơn ảnh hưởng của khối lượng tải lên hoạt động của cảm biến, nhóm nghiên cứu tiến hành lọc dữ liệu và lập đường chuẩn theo độ dịch giá trị tần số (hình 13a) và độ suy hao năng lượng (hình 13b).



Hình 13: đường chuẩn độ dịch tần số theo nồng độ khí mù tạc (a) và sự suy giảm năng lượng (logarith) theo nồng độ khí mù tạc (b)

Dựa vào đường chuẩn của cảm biến đối với sự thay đổi nồng độ khí mù tạc, ta có thể đánh giá được ảnh hưởng của khối lượng tải lên cảm biến một cách rõ ràng. Đường chuẩn theo cả hai tiêu chí đều đơn điệu và có dạng hàm đồng biến. Tuy nhiên, đường chuẩn

thể hiện trên hình 13a và hình 13b không thật sự tuyến tính. Điều này có thể khắc phục bằng kỹ thuật tuyến tính hóa từng đoạn khi hiển thị ra thiết bị đo.

Kết luận

Bài báo đã trình bày nguyên lý hoạt động, quy trình tính toán và tìm ra cấu trúc tối ưu với tần số cộng hưởng thích hợp cho linh kiện SAW. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng kết hợp hai phương pháp phần tử hữu hạn và mạch điện tương đương để khảo sát ứng xử của linh kiện SAW ở nhiều mô hình cấu trúc khác nhau. Phương pháp chọn lọc Taguchi được sử dụng để đưa ra cấu trúc tốt nhất. Bản thiết kế này đáp ứng được cả hai yêu cầu về độ nhạy cao và độ nhiễu tín hiệu thấp. Đây là hai tiêu chí rất quan trọng đối với linh kiện SAW. Bên cạnh đó, nhóm nghiên cứu cũng đã khảo sát hoạt động của linh kiện SAW trong điều kiện có tải, trong môi trường mô phỏng ANSYS và ngôn ngữ lập trình Matlab. Với kết quả này, nhóm nghiên cứu bước đầu xây dựng được phương pháp định lượng tải thông qua tín hiệu tần số ngõ ra của linh kiện. Đây là tiền đề hướng đến ứng dụng linh kiện SAW vào lĩnh vực cảm biến hóa học và sinh học ■

Tài liệu tham khảo

- [1] Cheng C.H., The Circuit Design For Portable SAW Vapor Sensors, Master thesis, 2011, 4-5.
- [2] Ballantine Jr.D.S., et al., Acoustic Wave Sensors Theory, Design, and Physico-Chemical Applications, Elsevier, 1997, 81.
- [3] Tsai D.H., Chiang T.L., Chen H.H., Robust Design of SAW Gas Sensors by Taguchi Dynamic Method, Sensors, 2009, 13, 1399-1401.
- [4] Thomas Schneider, Wideband impedance spectrum analyzer with arbitrary fine frequency resolution for in situ sensor applications, PhD thesis, 2009, 33-34.
- [5] Hartmann C.S., Bell D.T., Rosenfeld R.C., Impulse Model Design of Acoustic Surface-Wave Filters, IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1973, 21, 165-169.
- [6] Bunkar R. et al., Polyepichlohydrin modified quartz crystal microbalance sensor for sulfur mustard vapor detection, Defence Research & Development Establishment, 2010, 3, 139-142.
- [7] Cui J., Iturri J., Goetz U., Jimenez M., Campo A., Analysis of responsive polymer film using surface acoustic waves, American Chemical Society, 2013, 1, 5-6.