

Mô phỏng đánh giá độ chọn lọc của bộ lọc SAW có cấu trúc bất đối xứng sử dụng phương pháp FEM và mô hình mạch tương đương

Modeling the selectivity of SAW filter with single phase unidirectional transducer based on FEM and equivalent circuit model

Trần Mạnh Hà¹, Trịnh Văn Thái², Nguyễn Thế Truyền¹, Hoàng Sĩ Hồng^{2*}

¹Viện Nghiên cứu Điện tử, Tin học, Tự động hóa/Bộ Công Thương, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Điện, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, Việt Nam

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

Abstract

This study uses FEM and Mason simulation methods to evaluate the selectivity of the bandpass SAW filter with SPUDT structure. The results show that when changing the width of the asymmetric finger of the IDT, the selectivity of the filter is changed. Specifically, the asymmetric finger width of 15 μm showed better selectivity than the equivalent structure with the asymmetric finger width of 5 μm . The results are consistent with the explanatory theory of previous research methods. Besides, the application of the SPUDT structure model test to the Mason model has shown an improvement in the selectivity of the SAW filter.

Keywords: SPUDT SAW filter, Mason, FEM simulation, Selectivity of filter

Ký hiệu

Symbols	Units	Description
H (f)		Đáp ứng bộ lọc
f/f_c		Tần số cộng hưởng trung tâm của bộ lọc
V	m/s	Vận tốc sóng âm bề mặt
R		Hệ số phản xạ
A_{in}		Sóng phản xạ
d_2	μm	Độ rộng ngón tay bất đối xứng
Q		Hệ số chất lượng của bộ lọc
β		Trở kháng của môi trường truyền sóng âm bề mặt

Các từ viết tắt

SAW	Surface Acoustic Wave
SPUDT	Single Phase Unidirectional Transducer
IDT	Inter-Digital Transducer
EWC	Electrode-Width Controlled
DART	Distributed Acoustic Reflection Transducer
FEM	Finite Element Method
AlN	Aluminum Nitride
DWSF	Different – Width Split – Finger
TES	Triple electrode sections
COM	Coupling of Modes

Tóm tắt

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng FEM và Mason để đánh giá độ chọn lọc của bộ lọc thông dải kiểu SAW có cấu trúc bất đối xứng (SPUDT). Kết quả cho thấy khi thay đổi độ rộng của ngón tay bất đối xứng của bộ điện cực chuyển đổi IDT thì độ chọn lọc của bộ lọc thay đổi. Cụ thể khi độ rộng ngón tay bất đối xứng là 15 μm cho thấy độ chọn lọc tốt hơn cấu trúc tương đương có độ rộng ngón tay bất đối xứng là 5 μm . Kết quả cho thấy phù hợp với lý thuyết giải thích của các phương pháp nghiên cứu trước đây. Bên cạnh đó việc áp dụng thử nghiệm mô hình bất đối xứng cho mô hình Mason đã chỉ ra sự cải thiện về độ chọn lọc của bộ lọc SAW.

1. Giới thiệu chung

Bộ lọc SAW là một trong những phần tử quan trọng được sử dụng nhiều trong lĩnh vực ứng dụng liên quan đến truyền thông cho các bộ điều khiển không dây và các hệ thống điện tử viễn thông [1]. Bộ lọc kiểu sóng âm bề mặt (SAW) được sử dụng nhiều vì chúng có nhiều ưu điểm về tần số hoạt động cao và độ chọn lọc tốt so với bộ lọc tương tự sử dụng các phần tử thụ động thông thường từ nhiều năm trước đây [2, 3, 4]. Cấu trúc cơ bản của bộ lọc SAW đã được nhiều nghiên cứu giới thiệu, hầu hết dạng “delay-line” với hai bộ điện cực (IDT) đặt đối xứng cách nhau một khoảng xác định [5]. Mỗi bộ IDT gồm hai bộ điện cực kim loại hình răng lược đặt lồng xen kẽ và cách ly với nhau. Tất cả chúng được chế tạo trên nền đế vật liệu có tính chất áp điện (piezoelectric). Cấu trúc và phương pháp chế tạo cho bộ lọc SAW có cấu trúc đối xứng đã được nhóm nghiên cứu chúng tôi mô tả rõ trong những nghiên cứu trước đây [6, 7, 8]. Nguyên lý

chung của chúng là hoạt động trên hiệu ứng áp điện tại các bộ IDT để tạo ra sóng âm bề mặt có sự cộng hưởng trong một dải tần số của điện áp cấp cho IDT vào, khi đó năng lượng điện thu được ở IDT ra là lớn nhất. Nguyên lý đó như là một bộ lọc thông dải. Tuy nhiên chúng có đặc điểm chung là độ rộng ngón tay và khoảng cách giữa các ngón tay đều nhau. Cấu trúc đó được gọi là cấu trúc đối xứng.

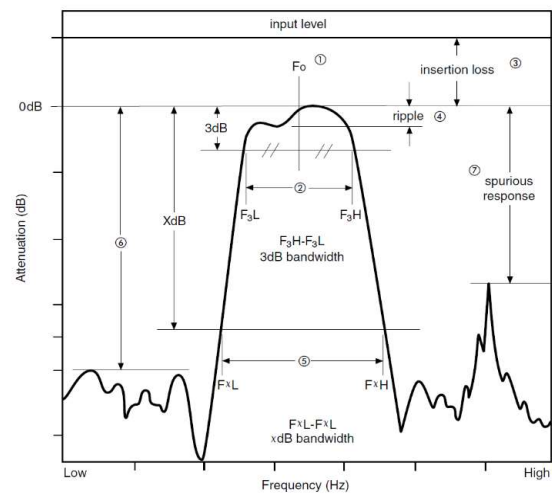
Với mong muốn cải thiện hơn nữa độ chọn lọc của bộ lọc thông dải dạng SAW, nhiều nhóm nghiên cứu trước đây đã đề xuất cấu trúc bất đối xứng của các bộ IDT. Cấu trúc đó gọi là SPUDT. Nghiên cứu [3, 9] đã chứng minh bộ lọc SPUDT có độ chọn lọc cao. Nghiên cứu [10] sử dụng cấu trúc này cải thiện được độ suy hao. Một số nghiên cứu khác đã chứng minh được với độ rộng ngón tay không đều, đặt ở vị trí phù hợp sẽ giảm được nhiều lần các sóng phản xạ không mong muốn, qua đó cải thiện độ chọn lọc của bộ lọc SAW. Cụ thể nghiên cứu kinh điển của Hanma năm 1976 [11], đã phân tích chất lượng của bộ lọc bị ảnh hưởng rất nhiều vì những sóng phản xạ không mong muốn và đã tìm ra cấu trúc bất đối xứng có thanh phản xạ cơ học có thể triệt tiêu được phản xạ thứ cấp nhằm làm giảm sóng phản xạ không mong muốn và nâng cao chất lượng bộ lọc. Tuy nhiên hầu hết những nghiên cứu dạng này đều sử dụng phương pháp mô phỏng truyền thống COM [12, 13]. Nhược điểm chung của phương pháp này là rất phức tạp, phải dùng tới các ma trận và nhiều phương trình để giải quyết bài toán [3, 13]. Trên cơ sở đó việc quy bài toán mô phỏng của cấu trúc điện cực về dạng một mạch điện tương đương (Mason) cho phép dễ dàng thực hiện mô phỏng bằng Matlab [8]. Nhưng hạn chế của phương pháp này là chỉ mới áp dụng cho cấu trúc đối xứng, đồng thời phải chọn trước tần số cộng hưởng trung tâm và các tham số cấu trúc gián tiếp của điện cực để mô phỏng được đáp ứng tần số của bộ lọc SAW, điều đó dẫn đến thiếu chính xác và tính khách quan do đó chỉ phù hợp với bài toán kiểm chứng hơn là thiết kế.

Gần đây phương pháp mô phỏng phân tử hữu hạn (FEM) thông qua những phần mềm mô phỏng thương mại có sẵn đã được nhiều nhóm áp dụng để mô phỏng đáp ứng tần số của bộ lọc [9, 14]. Ưu điểm của phương pháp này là cho phép thiết kế trực tiếp cấu trúc bộ lọc bất kì, đúng với các tham số hình thái cấu trúc của bộ IDT mong muốn. Tiến trình chuẩn bị bộ tham số vật liệu không phức tạp. Kết quả quan sát được dạng sóng, đáp ứng tần số khá chính xác với thực nghiệm [6]. Theo đó nghiên cứu trước đây của chúng tôi đã sử dụng FEM để mô phỏng thành công bộ lọc bất đối xứng (SPUDT) trên đế áp điện khối (1 lớp). Kết quả cho thấy bộ lọc có độ chọn lọc cao hơn so với cấu trúc đối xứng tương đương [9]. Tuy nhiên các luận chứng liên hệ kết quả đó với các cơ sở lý thuyết để giải thích cho sự cải thiện về độ chọn lọc chưa được phân tích rõ ràng. Hơn nữa quy luật bất đối xứng chưa được nghiên cứu mở rộng khi sử dụng FEM. Trên cơ sở đó trong nghiên cứu này chúng tôi chỉ giới hạn nghiên cứu sử dụng FEM để mô phỏng cho cấu trúc bộ lọc dạng thông dải trên nền đế áp điện hai lớp có độ rộng ngón tay bất đối xứng thay đổi ở mức đơn giản và tập trung nhiều hơn về cơ chế giải thích cho sự thay đổi độ chọn lọc. Đồng thời mở rộng sử dụng kết hợp mô phỏng Mason cho cấu trúc bất đối xứng để kiểm chứng rõ hơn về xu thế dạng sóng bề mặt liên quan đến cải thiện của độ chọn lọc. Qua đó đánh giá rõ hơn khả năng cải thiện độ chọn lọc của bộ lọc SPUDT.

2. Cơ sở lý thuyết và mô phỏng

2.1. Đáp ứng chung của bộ lọc sử dụng vật liệu áp điện

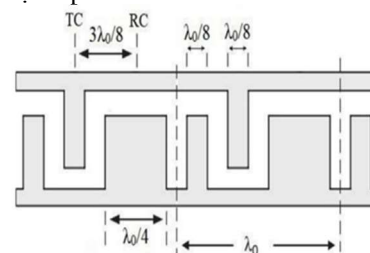
Nhìn chung đáp ứng của một bộ lọc thông dải sử dụng vật liệu áp điện được thể hiện như Hình 1 [15]. Tính chất quan trọng chúng ta cần quan tâm ở trong nghiên cứu này là độ chọn lọc của bộ lọc (selectivity). Độ chọn lọc được đánh giá thông qua độ dốc ở sườn phải và trái của đáp ứng. Bên cạnh đó một vài thông số khác cũng ảnh hưởng đến độ chọn lọc như độ suy hao dải dừng (Stopband Attenuation, kí hiệu số 6 ở Hình 1), hệ số chất lượng Q ($Q = f_c/\Delta f_{3dB}$). Trong đó f_c là tần số cộng hưởng trung tâm và $BW = \Delta f_{3dB}$ là dải thông ứng với độ suy hao 3 dB (Δf_{3dB} được kí hiệu số 2 ở trong Hình 1). Một bộ lọc có độ chọn lọc cao khi có tốc độ chuyển tiếp nhanh giữa những tần số bị loại bỏ và tần số tín hiệu được phép đi qua. Do vậy nếu bộ lọc áp điện có đáp ứng độ dốc lớn, hệ số chất lượng Q cao và độ suy hao dải dừng lớn có thể được coi là một bộ lọc có độ chọn lọc cao.



Hình 1: Đáp ứng của bộ lọc thông dải áp điện [15].

2.2. Cơ sở lý thuyết của SPUDT

Có nhiều loại cấu trúc SPUDT như DART (Hình 2 [9]), EWC SPUDT, DWSF, TED đã được nghiên cứu [3, 16, 17, 18, 19]. Tuy nhiên ở đây chúng tôi tập trung vào cấu trúc phổ biến nhất đó là DART. Có thể thấy ở Hình 2, cấu trúc hình học của DART gồm một chuỗi các ô giống hệt nhau có chiều rộng là λ_0 . Trong đó mỗi ô gồm có 2 điện cực có chiều rộng $\lambda_0/8$ và một điện cực có chiều rộng $\lambda_0/4$ [20]. Mỗi ô chứa các thanh phản xạ (reflector) và các bộ chuyển đổi (transducers) được bố trí tại tâm phản xạ (reflection center) và tâm bộ chuyển đổi (transduction center). Hai thành phần này hoạt động độc lập với nhau. Tâm bộ chuyển đổi là điểm mà sóng truyền theo hai hướng về phía trước và về phía sau có cùng biên độ và pha.



Hình 2: Cấu trúc hình học của SPUDT [9].

Tâm phản xạ là điểm thỏa mãn sóng đến ở cả hai hướng phía trước và phía sau có cùng hệ số phản xạ [9, 20].

Gọi d là khoảng cách giữa tâm phản xạ và tâm chuyển đổi. Khi đó $d = 3\lambda_0/8$. Nếu ta gọi hệ số phản xạ là R (phần ảo) thì hệ số chuyển đổi là $\sqrt{1 - |R|^2}$ (phần thực dương). Bộ chuyển đổi khi bị tác động sẽ tạo ra sóng giống hệt nhau lan truyền về hai phía và sóng lan truyền sang phải bị phản xạ lại khi gặp thanh phản xạ. Do vậy sóng ở bên trái sẽ tỷ lệ với $1 + \text{Re}^{-2i}$ trong đó $k = 2\pi/\lambda_0$, sóng phản xạ tăng cường với sóng lan truyền theo hướng sang trái khi d thỏa mãn $d = (2n \pm 1/2)\lambda_0/4$. Biên độ sóng ở bên trái sẽ tỷ lệ với $1 + |R|$, còn biên độ sóng sang phải tỷ lệ với $|R|$. Khi R là phần ảo âm, chọn $n = 1$ thì $d = 3\lambda_0/8$ ứng với cấu trúc DART [20].

Mặt khác, nếu gọi Z_i là vị trí của các điện cực, f là tần số trung tâm của bộ chuyển đổi và V_1 vận tốc sóng âm của SAW. Thì đáp ứng tần của mỗi bộ chuyển đổi (IDT) là [4, 21]:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N w_i * e^{j2\pi \frac{Z_i f}{V_1}} \quad (1)$$

$$\text{Đặt } \beta = x = 2 \frac{\pi f}{V_1}$$

Với w_i là độ chồng lấn của hai bộ điện cực
 Đáp ứng tần số của bộ lọc là tích đáp ứng tần số của bộ chuyển đổi (IDT) đầu vào và bộ chuyển đổi (IDT) đầu ra:
 $H(\omega) = H_1(\omega) * H_2(\omega)$.
 Vì vậy ta có đáp ứng của bộ lọc là:

$$H(f) = \left[\sum_{i=1}^N w_i * e^{j\beta Z_i} \right] \left[\sum_{j=1}^M w_j * e^{j\beta Z_j} \right] \quad (2)$$

Nếu thiết kế 2 bộ IDT có cấu trúc giống nhau và độ chồng lấn của các điện cực giống nhau khi đó $w_i = w_j = k$ với mọi i, j và $M = N$. Thì (2) sẽ tương đương với:

$$H(\omega) = k * \left(\left[\sum_{i=1}^N e^{j\beta Z_i} \right] \right)^2 \quad (3)$$

$$e^{jx} = (\cos(x) + j\sin(x)) \quad (4)$$

Vì vậy đáp ứng tần của bộ lọc thông dải bất đối xứng dạng SAW ở (3) có thể quy về dạng sau:

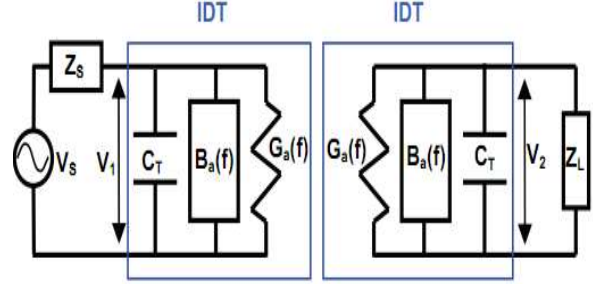
$$\begin{aligned} H(\omega) &= \left(\left[\sum_{i=1}^N (\cos(x * Z_i) + j\sin(x * Z_i)) \right] \right)^2 \\ &= \left(\left[\sum_{i=1}^N \cos(x * Z_i) \right] \right)^2 - \left(\left[\sum_{i=1}^N \sin(x * Z_i) \right] \right)^2 + \\ &2j \left[\sum_{i=1}^N \sin(x * Z_i) * \sum_{i=1}^N \cos(x * Z_i) \right] = \\ &\left(\left[\sum_{i=1}^N \cos(x * Z_i) \right] \right)^2 - \left(\left[\sum_{i=1}^N \sin(x * Z_i) \right] \right)^2 + \\ &j \left[\sum_{i=1}^N \sin 2(x * Z_i) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Như vậy qua biểu thức (5), đáp ứng tần số của bộ lọc SAW bất đối xứng (SPUDT) là kết hợp phức tạp của các sóng dạng $\sin^2(x)$, $\cos^2(x)$ và dạng sóng dạng $\sin(2x)$.

2.3. Cơ sở lý thuyết theo phương pháp Mason

Mô hình mạch tương đương Mason thực chất là phương pháp quy đổi cấu trúc bộ lọc về dạng tương đương RLC truyền thống [22, 23]. Cấu trúc delay line sử dụng nguyên lý SAW trong đó hai bộ IDT được chuyển tương đương thành mạch điện với các thành phần cơ bản: C_T , G_a , B_a . Trong đó C_T là điện dung tổng tương đương (total capacitance), $B_a(f)$ là độ cảm ứng âm (acoustic susceptance) và độ dẫn bức xạ $G_a(f)$ (radiation conductance). Mô hình mạch điện tương

đương Mason như Hình 3. Với bộ lọc SAW có cấu trúc delay line được thiết kế có các thông số như: f_0 là tần số trung tâm, k là hệ số cặp áp điện, D là khoảng cách delay line tính theo bước sóng, C_s là điện dung của mỗi cặp điện cực, N_p là số cặp điện cực (number of finger pairs).



Hình 3: Mô hình Mason cho cấu trúc đối xứng delayline [22].

Đáp ứng tần số (hàm truyền) của bộ lọc SAW đối xứng được tính theo công thức sau [8, 22]:

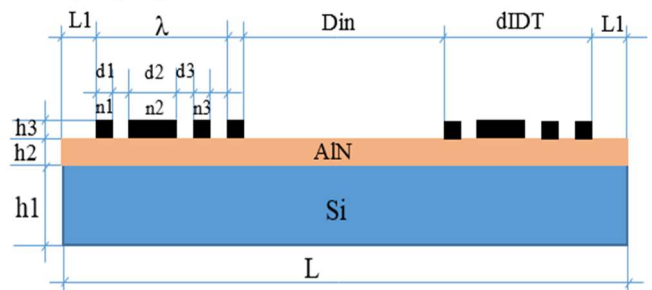
$$H(f) = 4k^2 C_s f_0 N_p^2 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 e^{-j \left(\frac{N_p + D}{f_0} \right)} \quad (6)$$

Trong đó thành phần x là một hàm số của số cặp điện cực và tần số trung tâm của bộ lọc, X được xác định theo công thức [22]:

$$X = N_p \pi \frac{(f - f_0)}{f_0}$$

2.4. Lựa chọn cấu trúc và mô phỏng SPUDT theo FEM

Đối với cấu trúc mô phỏng, nhóm mở rộng chọn để áp điện hai lớp là AlN/Si để nghiên cứu mô phỏng vì đây là để áp điện có vận tốc sóng bề mặt cao, hệ số trôi tần số cộng hưởng theo nhiệt độ thấp và tuyến tính. Đồng thời trước đây nhóm đã nghiên cứu mô phỏng và chế tạo thành công để áp điện này với cấu trúc đối xứng [6]. Thông số nghiên cứu này chọn cấu trúc hoàn toàn tương tự như Bảng 1 ở công bố trước đây của nhóm [6]. Trong mô phỏng này nhóm chọn số cặp ngón tay là 50 cặp và độ dày của vật liệu áp điện AlN là 0.5 μm . Quá trình mô phỏng chi tiết và bộ thông số ma trận đàn hồi, ma trận điện môi, ma trận áp điện là tương tự như nghiên cứu trước đây của nhóm [7]. Trên cơ sở đó nhóm chọn cấu trúc bộ lọc bất đối xứng DART SPUDT như Hình 2. Thông số chi tiết được kí hiệu và mô tả ở Hình 4 và Bảng 1 tương ứng ở phía dưới.



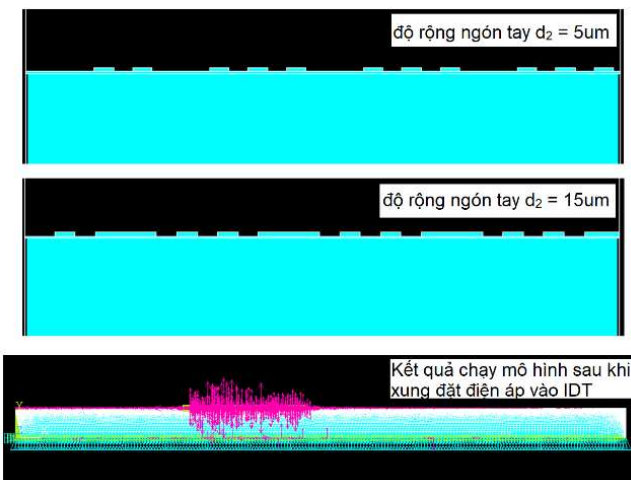
Hình 4: Cấu trúc hình học của SPUDT mô phỏng.

Về cơ bản, cấu trúc bất đối xứng được chọn có bước sóng (Lamda = 40 μm). Chỉ có độ rộng ngón tay d_2 của điện cực n_2 thay đổi để tạo ra sự bất đối xứng lần lượt là 5 μm và 15 μm .

Bảng 1: Thông số cấu trúc hình học của SPUDT mô phỏng

Thông số cấu trúc	Ký hiệu	Kích thước
Số cặp IDT (cặp)	numIDT	50
Chiều dài bộ lọc SAW(μm)	L	10000
Lambda: λ (μm)	λ	40
Độ dày lớp Si (μm)	h1	500
Độ dày lớp áp điện AIN (μm)	h2	0.5
Chiều cao IDT (μm)	h3	1
Khoảng cách các ngón tay (μm)	d0	5
Độ rộng ngón tay n1 (μm)	d1	5
Độ rộng ngón tay bất đối xứng n2 (μm)	d2	5 và 15
Độ rộng ngón tay n3 (μm)	d3	5
Kh. cách giữa hai IDT (μm)	Din	280
Chiều rộng của IDT (μm)	dIDT	2000
Khoảng cách hai mép (μm)	L1	2860

Các bước mô phỏng được thực hiện cơ bản như sau: xây dựng cấu trúc, nhập các ma trận hệ số áp điện, hệ số vật liệu, chia lưới, đổi lớp vật liệu, đặt điện áp lên IDT và đặt điều kiện biên. Hình ảnh mô phỏng bằng FEM được mô tả như Hình 5.

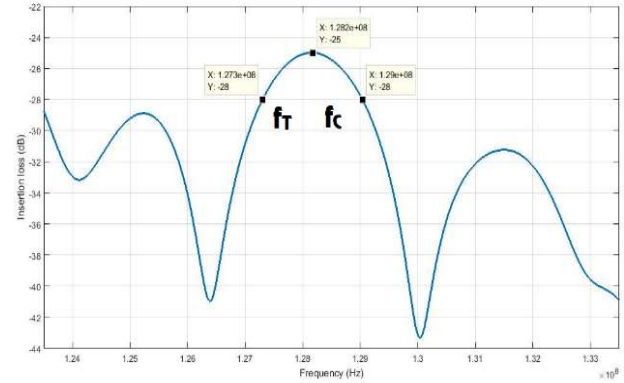
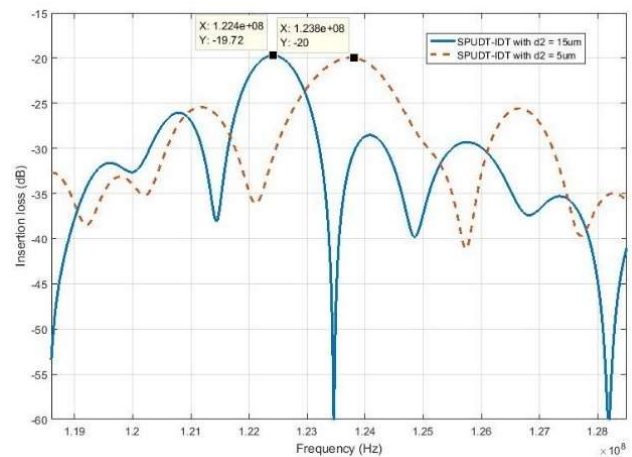
**Hình 5:** Hình ảnh mô phỏng bằng phương pháp FEM.

Quá trình chia lưới, đặt điều kiện biên, nhập các bộ thông số ma trận áp điện, các thông số vật liệu được thực hiện trên phần mềm mô phỏng phân tử hữu hạn tương tự như công bố trước đây của nhóm chúng tôi [7]. Cụ thể là lưới được tạo cũng đảm bảo mật độ lưới dày nhất tại gần bề mặt và thưa khi xuống dần phía đáy. Do mật độ khối của điện cực nhôm (2710 kg/m^3) là nhỏ so với đế áp điện AIN (3260 kg/m^3) nên ảnh hưởng khối lượng của IDT có thể bỏ qua được, do vậy các điện cực được coi như một tập các nút được nhóm lại với nhau có cùng điện áp trên bề mặt để áp điện để giảm khối lượng tính toán cũng như không ảnh hưởng đến độ chính xác của bài toán. Bước chia lưới là $\lambda/40 = 1 \mu\text{m}$, số phần tử sau khi chia là: 178218 (giá trị này cho kết quả đầu ra hội tụ khi mô phỏng). Điều kiện biên cụ thể như sau: mặt trên cảm biến có điều kiện cơ học là tự do, điều kiện điện áp bằng không. Đáy dưới cảm biến có điều kiện cơ học là cố định và điều kiện điện áp là nối đất. Lớp tiếp giáp giữa hai vật liệu có điều kiện cơ học là tự do và điện áp là liên tục. Tất cả cạnh bên về cảm biến có điều kiện là tự do.

3. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Kết quả mô phỏng sử dụng FEM của bộ lọc đối xứng với bước sóng lambda là $40 \mu\text{m}$ cho cấu trúc áp điện AIN/Si và điện cực IDT làm bằng nhôm có tần số cộng hưởng trung

tâm (f_c) khoảng 128 MHz như Hình 6. Theo đó vận tốc sóng âm bề mặt $V = \lambda * f_c = 5120 \text{ m/s}$. Kết quả này là phù hợp với lý thuyết và các kết quả nghiên cứu trước đây của nhóm chúng tôi [7]. Kết quả mô phỏng FEM tương ứng của hai bộ lọc bất đối xứng SPUDT có độ rộng ngón tay bất đối xứng (d_2) tương ứng $5 \mu\text{m}$ và $15 \mu\text{m}$ thể hiện ở Hình 7. Tất cả bộ lọc này đều có bước sóng Lambda như nhau là $40 \mu\text{m}$. Bộ lọc thông dải SAW có nhiều tham số thể hiện tính chất của nó, tuy nhiên trong nghiên cứu này chúng tôi tập trung chính vào độ chọn lọc (F_s - Filter Selectivity) để đánh giá.

**Hình 6:** Đáp ứng của bộ lọc đối xứng.**Hình 7:** Đáp ứng của các bộ lọc bất đối xứng (SPUDT).

Theo bộ lọc lý tưởng có độ chọn lọc là tốt nhất khi độ dốc đáp ứng tại tần số cắt là 90° . Hay nói cách khác đồ thị biên độ - tần số của hàm truyền đạt càng dốc thì độ chọn lọc càng gần lý tưởng. Cụ thể hơn chúng ta sẽ chọn tần số F_s cắt thấp (f_T) và cao (f_c) trên đáp ứng tại dải thông với độ suy hao -3 dB so với độ suy hao của tần số trung tâm (Hình 1 và 6). Tại tần số cắt đó, độ dốc được đánh giá thông qua công thức (7)

$$F_s = - \left. \frac{d|H(j\omega)|}{d\omega} \right|_{\omega = \omega_c} \quad (7)$$

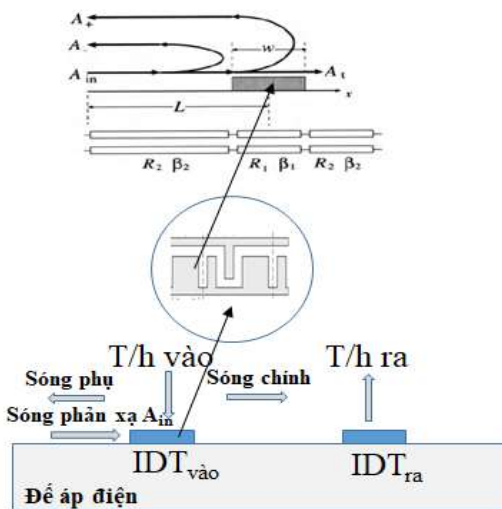
Áp dụng công thức (7) với số liệu từ đáp ứng ở Hình 7, kết quả tính toán độ dốc của hai bộ lọc được thể hiện ở Bảng 2. Như vậy kết hợp quan sát độ dốc ở Hình 7 và các kết quả tính toán độ dốc ở Bảng 2, cho thấy tăng độ rộng ngón tay bất đối xứng thì độ dốc của đáp ứng tăng và hệ số chất lượng Q tăng, điều đó có nghĩa là tăng độ chọn lọc của bộ lọc bất đối xứng SPUDT. Tuy nhiên bộ lọc có độ rộng ngón tay bất đối xứng tăng có dải thông (bandpass) ứng với suy hao 3 dB nhỏ hơn so khi độ rộng ngón tay bé hơn.

Bảng 2: Kết quả tính toán độ dốc của đáp ứng tần số bộ lọc SAW SPUDT

STT	Bộ lọc	Độ dốc trái [dB/Hz]	Độ dốc phải [dB/Hz]	Hệ số chất lượng Q (dải thông tính theo MHz)
1	Bất đối xứng với $d_2 = 5 \mu\text{m}$	0.00000812	-0.00000934	91
2	Bất đối xứng với $d_2 = 15 \mu\text{m}$	0.00001412	-0.00001359	129

Hơn nữa cũng từ Hình 7 dễ thấy độ suy hao dải dừng của bộ lọc có ngón tay bất đối xứng $15 \mu\text{m}$ lớn hơn khoảng 3 dB so với bộ lọc có ngón tay $5 \mu\text{m}$. Tất cả cho thấy cơ bản độ chọn lọc đã cải thiện đáng kể khi tăng độ rộng ngón tay bất đối xứng trong trường hợp này. Để giải thích điều này chúng ta cần áp dụng và phân tích cơ sở lý thuyết dựa trên nghiên cứu trước đây [19].

Nguyên lý được mô tả như hình Hình 8 dưới đây. Trong Hình 8, β_1 và R_1 là trở kháng của ngón tay điện cực bằng kim loại phủ trên đế áp điện và hệ số phản xạ của thanh kim loại. β_2 và R_2 là trở kháng của đế áp điện và hệ số phản xạ tương ứng. Khi cung cấp tín hiệu vào cần lọc cho một bộ điện cực IDT_{vào}, do hiệu ứng áp điện năng lượng đó sẽ biến thành năng lượng sóng cơ bề mặt lan truyền theo hai hướng. Hướng sóng chính là hướng năng lượng sóng được truyền từ IDT_{vào} sang IDT_{ra} để thu được tín hiệu có dải tần cần lọc ra ngoài. Tại IDT_{vào}, hướng còn lại là sóng phụ đi ra môi trường ngoài. Theo [19], quá trình truyền sóng sẽ xuất hiện sự phản xạ khi gặp môi trường truyền sóng có trở kháng thay đổi.



Hình 8: Nguyên lý phản xạ sóng trên bề mặt bộ lọc SAW.

Theo đó khi sóng phụ truyền trên bề mặt vật liệu áp điện của bộ lọc SAW gặp môi trường không khí hoặc bộ giảm chấn ở mép ngoài của bộ lọc thì sẽ xuất hiện sự phản xạ. Theo Hình 8 sóng phản xạ đó gọi là A_{in} (truyền trong môi trường áp điện có trở kháng β_2), và hướng ngược lại đến bộ IDT_{vào}. Khi A_{in} gặp điện cực ngón tay bất đối xứng đầu tiên (vật liệu kim loại/áp điện có trở kháng β_1). Khi đó tại mép trái của điện cực ngón tay này do sự thay đổi trở kháng ($\beta_1 \neq \beta_2$) nên sẽ xuất hiện phản xạ sóng A_- , năng lượng còn lại tiếp tục truyền trong môi trường kim loại/áp điện của ngón tay bất đối xứng đến mép phải khi gặp môi trường truyền sóng là đế áp điện, tại đó do gặp sự thay đổi trở kháng nên lại chia thành hai thành phần (một phần năng lượng phản xạ lại là A_+ và năng

lượng tiếp tục truyền đi là A_t). Như vậy năng lượng phản xạ đi vào trung tâm A_t là thành phần không mong muốn có thể gây nhiễu loạn đến biên độ và pha dẫn đến suy hao hoặc giảm một số tính chất của bộ lọc [19]. Với một điều kiện bên ngoài không đổi, thì A_{in} là hằng số ($A_{in} = (A_+ + A_- + A_t)$), khi đó nếu tăng năng lượng phản xạ của A_+ và A_- thì thành phần năng lượng sóng gây nhiễu loạn đi vào trung tâm là A_t sẽ giảm. Do vậy nếu thiết kế ngón tay bất đối xứng sao cho hệ số phản xạ của ngón tay (R) tăng để tăng $(A_+ + A_-)$ điều đó có nghĩa A_t giảm và đáp ứng của bộ lọc SAW sẽ được cải thiện.

Theo [19] ta có phương trình biên độ sóng phản xạ ở mép phải và mép trái ở ngón tay phản xạ là A_+ và A_- với A_{in} là biên độ sóng tới.

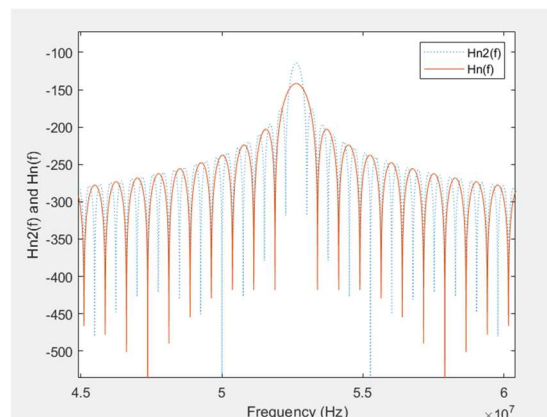
$$A_- = r_- * A_{in} * e^{-2j\beta_2(L-\frac{w}{2})} \tag{8}$$

$$A_+ = r_+ * A_{in} * e^{-2j\beta_2(L-\frac{w}{2})} \tag{9}$$

$$\text{Trong đó : } r_- = r_+ = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \tag{10}$$

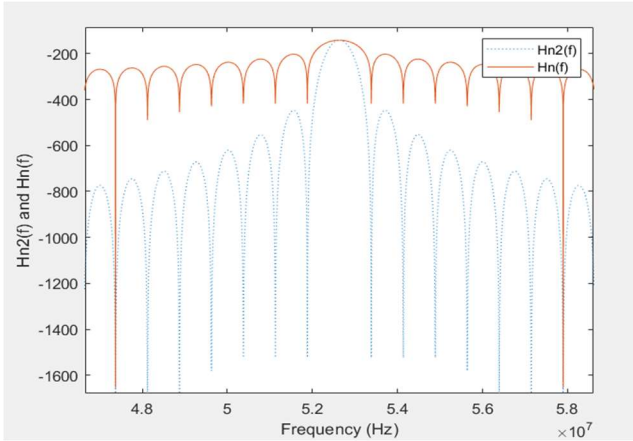
Từ (8) (9) và (10) ta có: R_1 là hệ số phản xạ của ngón tay bất đối xứng, giá thiết R_2 không đổi. Theo đó khi tăng độ rộng của ngón tay bất đối xứng (d_2) thì hệ số phản xạ R_1 sẽ tăng, khi đó với giá trị R_1 và R_2 thích hợp sẽ cho r_- hoặc r_+ cũng tăng tuyến tính theo R_1 dẫn đến hệ số phản xạ chung $|R|$ cũng tăng theo. Sóng lan truyền sang trái tỷ lệ với $1+|R|$ do vậy khi tăng độ rộng ngón tay bất đối xứng trong một số trường hợp thì năng lượng sóng theo chiều sang trái cũng tăng theo (A_- , A_+ tăng). Khi đó phần năng lượng gây nhiễu loạn còn lại là A_t đi vào trung tâm sẽ giảm. Nói cách khác, kết quả mô phỏng sử dụng FEM ở Bảng 2 là phù hợp với lý thuyết vừa được phân tích. Điều đó giải thích tại sao khi tăng độ rộng ngón tay bất đối xứng thì có thể dẫn đến tăng độ chọn lọc bộ lọc SAW.

Một nghiên cứu trước đây của chúng tôi [9] cũng như một số nghiên cứu khác, đã cho thấy độ chọn lọc của cấu trúc bất đối xứng sẽ tốt hơn cấu trúc đối xứng. Mặc dù điều đó cũng đã được lý giải qua sự phân tích sử dụng phương pháp truyền thống phức tạp trước đây [19], theo đó trong phần này trên cơ sở sử dụng kết quả lý thuyết đó chúng tôi thử nghiệm áp dụng cho mô hình Mason [22] để mô phỏng kiểm chứng. Từ công thức (6), rõ ràng đã cho thấy đáp ứng tần số của bộ lọc SAW bất đối xứng là kết hợp của nhiều thành phần sóng dạng $(\cos^2(x) - \sin^2(x)) = (1 - 2\sin^2(x))$ và $\sin(2x)$.



Hình 9: Đáp ứng tần số kiểu Mason của bộ lọc với sóng dạng $\sin(2x)$.

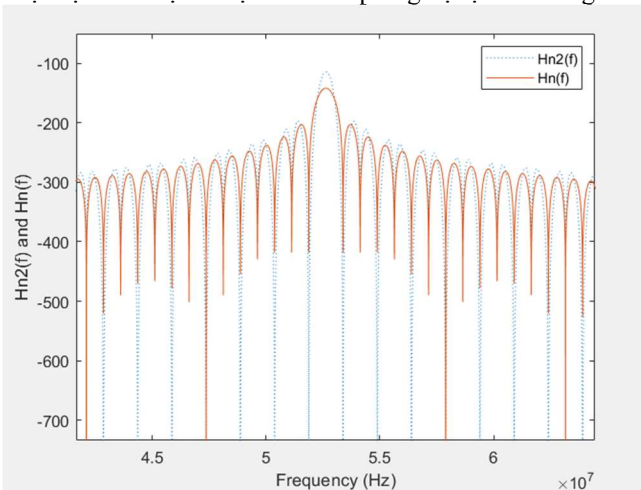
Theo đó chúng tôi thử nghiệm áp dụng các thành phần sóng dạng này cho đáp ứng Mason để đánh giá đáp ứng cho bộ lọc bất đối xứng. Để đơn giản, chúng tôi lần lượt thay các dạng sóng có bậc nói trên vào thành phần $\sin(x)$ ở công thức Mason (6) để mô phỏng kiểm chứng bằng Matlab. Các tham số khác trong công thức (6), chúng tôi chọn tương quan như trong nghiên cứu trước đây của chúng tôi [9]. Một số kết quả được thể hiện lần lượt ở Hình 9 và 10.



Hình 10: Đáp ứng tần số kiểu Mason của bộ lọc với sóng dạng $\sin^2(x)$.

Ở Hình 9, $Hn(f) = F\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ là đáp ứng của bộ lọc SAW đối xứng theo công thức Mason (7). thay thế thành phần $\sin(x)/x$ bằng $\sin 2x/2x$ để thể hiện cho đáp ứng bất đối xứng ta có $Hn2(f) = F\left(\frac{\sin 2x}{2x}\right)^2$. Kết quả cho thấy đáp ứng đặc trưng cho cấu trúc bất đối xứng có độ chọn lọc cải thiện rõ rệt so với đáp ứng bộ lọc đối xứng. Điều này phù hợp với một số kết quả đánh giá sử dụng phương pháp COM trước đây [13, 19].

Ở Hình 10, $Hn(f) = F\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ là đáp ứng của bộ lọc SAW đối xứng theo công thức Mason (7). thay thế thành phần $\sin(x)/x$ bằng $\sin^2(x)/x$ để thể hiện cho đáp ứng bất đối xứng ta có $Hn2(f) = F\left(\frac{\sin x}{x}\right)^4$. Kết quả cho thấy đáp ứng đặc trưng cho cấu trúc bất đối xứng với dạng sóng này có độ chọn lọc cải thiện rõ rệt so với đáp ứng bộ lọc đối xứng.



Hình 11: Đáp ứng tần số của bộ lọc kiểu Mason với sóng dạng $\sin(x)$ và $\sin(2x)$.

Ở Hình 11, $Hn(f) = F\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ là đáp ứng của bộ lọc SAW đối xứng theo công thức Mason (7). Thay thế thành phần $\sin(x)/x$ bằng $(\sin(x) + \sin(2x))/2x$. Kết quả cho thấy đáp ứng đặc trưng cho cấu trúc bất đối xứng với dạng sóng này có độ chọn lọc cũng cải thiện so với đáp ứng bộ lọc đối xứng. Như vậy nhìn chung qua kết quả Hình 9, 10 và 11 cho thấy vận dụng hàm tiếp cận theo lý thuyết trước đây về các dạng sóng bề mặt bậc cao hơn với mô hình mạch tương đương kiểu Mason đều cho thấy khi mô phỏng có triển vọng về sự cải thiện độ chọn lọc của bộ lọc thông dải SAW có cấu trúc điện cực bất đối xứng. Đây cũng là một cơ sở cho thấy có thể áp dụng Mason để mô phỏng nhanh cho bộ lọc bất đối xứng SAW SPUDT

3. Kết luận

Bài báo đã tiến hành mô phỏng FEM các bộ lọc SAW sử dụng để áp điện AlN trên nền silicon với bộ điện cực IDT bằng nhôm có ngón tay bất đối xứng. Bước đầu cho thấy khi thay đổi độ rộng ngón tay bất đối xứng với hai giá trị lần lượt là 5 μm và 15 μm , kết quả chỉ ra đáp ứng bộ lọc có độ chọn lọc tăng đáng kể với giá trị 15 μm . Lí do là ngón tay bất đối xứng sẽ tiếp nhận sóng phản xạ gây nhiễu từ hai biên của bộ lọc truyền về. Khi tăng độ rộng ngón tay thì tăng hệ số phản xạ nên có xu thế triệt tiêu sóng nhiễu không mong muốn truyền về trung tâm. Ngoài ra nghiên cứu cũng khai thác phân tích hàm truyền của bộ lọc bất đối xứng để bước đầu thử nghiệm áp dụng cho mô hình mô phỏng Mason. Kết quả thử nghiệm với những sóng dạng $\sin^2(x)$, $\sin(2x)$ hoặc kết hợp $(\sin(x) + \sin(2x))$ đều cho kết quả cải thiện về độ chọn lọc của bộ lọc thông dải SAW có cấu trúc bất đối xứng. Mặc dù kết quả bước đầu đã giải thích được cơ chế cải thiện độ chọn lọc, nhưng sóng truyền trên bề mặt SAW với cấu trúc bất đối xứng là khá phức tạp, các quy luật về vị trí, độ rộng có ảnh hưởng đến cơ chế truyền sóng của các ngón tay bất đối xứng cần phải tiếp tục nghiên cứu sâu hơn. Đây chính là các mục tiêu cần giải quyết trong những nghiên cứu tiếp theo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (Nafosted) trong đề tài mã số 103.02-2018.33

Tài liệu tham khảo

- [1] Api Technologies (2019) *Introduction to SAW Filter Theory & Design Techniques*. Microwave journal
- [2] Wright PV, Wilkus SA (1983) *A Prototype Low-Loss Filter Employing Single-phase Unidirectional Transducers*. IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 72-76
- [3] Garber EM, Yip DS, Henderson DK (1994) *Design of high selectivity DART SPUDT filters on quartz and lithium tantalate*. Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, vol. 1, pp. 7-12
- [4] Jiang H, Lu WK, Shen SG, Xie ZG (2013) *Study of a Low Insertion Loss SAW Filter with SPUDT Structure Using YZ-LiNbO3*. Appl. Mech. Mater., vol. 251, pp. 139-142
- [5] Waldemar S (1998) *Design of SAW delay lines for sensors*. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 67, Issues 1-3
- [6] Ha TM, Truyện NT, Phương NH, Toán NV, Hồng HS (2017) *Nghiên*

- cứu thiết kế bộ lọc và bộ cộng hưởng cao tần kiểu sóng âm bề mặt.*
Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số 52, Trang 89-96
- [7] Hong HS (2015) *Mô phỏng bộ cộng hưởng sóng âm bề mặt có cấu trúc hai lớp sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn.* Chuyên san Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa, trang 31-36
- [8] Hong HS (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
- [9] Ha TM, Hue NT, Huy DQ, Hong HS (2017) *FEM Analysis of high-selectivity SAW filter using SPUDT structure.* Journal of Science & Technology (123), tháng 11, trang 14-18
- [10] Kodama T, Kawabata H, Yasuhara Y, Sato H (1986) *Design of Low-Loss SAW Filters Employing Distributed Acoustic Reflection Transducers.* IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 59-64.
- [11] Hanma K, Hunsinger B (1976) *A Triple Transit Suppression Technique.* IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 328-331
- [12] Hartmann CS, Abbott BP (1989) *Overview of design challenges for single phase unidirectional SAW filters,* IEEE Ultrasonic Symp., pp. 79-89
- [13] Wright PV (1989) Analysis and design of low-loss SAW devices with internal reflections using coupling-of-modes theory. Proc. IEEE Ultrasonics Symp., vol. 1, Montreal, P.Q., Canada, Oct, pp. 141-152
- [14] A. K. Namdeo and H. B. Nemade (2011) FEM Study on the Effect of Metallic Interdigital Transducers on Surface Acoustic Wave (SAW) Velocity in SAW Devices. Proceeding of the COMSOL conference in Bangalore
- [15] Changpuak (2016) *Piezo Fiter Introduction.* MuRata
- [16] Abbott BP, Hartmann CS, Malocha DC (1990) *Matching of single-phase unidirectional SAW transducers.* IEEE Ultrasonics Symp. Proc., pp.45-54
- [17] Nakamura H, Yamada T, Igaki T, Nishimura K, Ishizaki T, Ogawa K (2000) *A practical SPUDT design for SAW filters with different-width split-finger inter digital transducers.* IEEE Ultrason. Symp.
- [18] Chvets B, Ivanov PG, Makarov VM, Orlov VS (1997) *Low-loss SAW filters using new SPUDT structures.* IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium, pp. 69-72 vol.1
- [19] Hashimoto KY (2000) *Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunication - Modelling and Simulation.* Springer
- [20] Morgan D (2010) *Surface Acoustic Wave Filters: With Applications to Electronic Communications and Signal Processing.* Academic Press
- [21] Garber EM (1985) *Surface acoustic wave single-phase unidirectional transducers and phase weighting.* Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- [22] Wilson WC, Atkinson GM (2007) *Rapid SAW Sensor Development Tools.* NASA Tech. reports, pp. 1-7
- [23] Rasolomboahanginatovo AH, Domingue F, Dahmane AO (2013) *A New SAW Device Simulator Based on Mason's Equivalent Circuit Model.* Fourth Int. Conf. Sens. Device Technol. Appl., vol. 4, no. 3, pp. 59-63