

ẢNH HƯỞNG CỦA CẤU TRÚC SPUDT CỦA IDT ĐẾN SÓNG PHẢN XẠ CỦA CẢM BIẾN THỤ ĐỘNG KHÔNG DÂY DẠNG SÓNG ÂM BỀ MẶT

EFFECT OF THE SPUDT STRUCTURE OF IDT ON REFLECTED WAVES OF PASSIVE WIRELESS SURFACE ACOUSTIC SENSORS

Nguyễn Thu Hà^{1,*},
Bùi Lập Hiến¹, Hoàng Sĩ Hồng²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.310>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu phân tích sóng phản xạ hai cấu trúc IDT của cảm biến sóng âm bề mặt loại đường trễ phản xạ (SAW RDL) là hai hướng điện cực đơn và một hướng SPUDT. Mô hình cảm biến được thực hiện trên đế YZ-LiNbO₃, ba bộ phản xạ loại mạch hở và có 4 điện cực cho mỗi bộ, điện áp đặt tại IDT có tần số 870MHz. Mô phỏng FEM cho kết quả là cấu trúc một hướng SPUDT có biên độ sóng hồi đáp thứ nhất là 0,0313 (V), các hồi đáp thứ hai và thứ ba có dạng nhiễu loạn. Cấu trúc hai hướng có biên độ sóng hồi đáp thứ nhất, thứ hai và thứ ba tương ứng là 0,028 (V); 0,037 (V); 0,033 (V) được thể hiện rõ trên đồ thị tại các thời điểm tương ứng với ba bộ phản xạ theo tính toán lý thuyết.

Từ khóa: SAW; mô phỏng SAW; bộ phản xạ; cấu trúc IDT; thiết bị đọc.

ABSTRACT

This article analyzes the response waves in two IDT structures of the passive wireless surface acoustic wave sensor of reflective delay line (SAW RDL) are Bi-directional and Unidirectional SPUDT. The model used a YZ-LiNbO₃ substrate with three open-circuit type reflectors and four electrodes for each set. The voltage applied at the IDT has a frequency of 870MHz. In the SPUDT bidirectional structure, the first response wave amplitude is 0.0313 (V), and the second and third responses are in the form of disturbances. The bidirectional structure has first, second, and third response wave amplitudes of 0.028 (V), respectively; 0.037 (V); 0.033 (V) is shown on the graph clearly at times corresponding to three reflectors according to theoretical calculations.

Keywords: Passive wireless SAW, Simulation SAW, reflector, structure of IDT, reader.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: nguyen.ha@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 16/4/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 08/6/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2024

CHỮ VIẾT TẮT

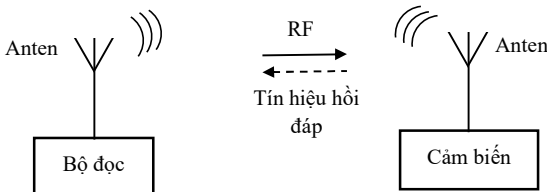
SAW	Surface Acoustic Wave
RDL	Reflective Delay Line
IDT	Inter Digital Transduce
SPUDT	Single Phase Unidirectional Transducer
UDT	Unidirectional inter Digital Transduce
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
IoT	Internet of Things

1. GIỚI THIỆU

Cảm biến thụ động không dây dạng sóng âm bề mặt (SAW) là một trong số các cảm biến được phát triển nhanh chóng trong thời gian gần đây và trở thành một phương án được lựa chọn khi thiết kế hệ thống cho các ứng dụng đo lường và nhận dạng [1]. SAW có thể được sử dụng với mục đích nhận dạng, cảm biến hoặc đảm nhiệm cả hai chức năng tích hợp [2]. Các dữ liệu từ cảm biến SAW gửi về bộ đọc bao gồm cả các thông tin đo và mã nhận dạng. Các thẻ SAW mang lại nhiều lợi thế bởi khả năng hoạt động không dây, không cần cấp nguồn cho phần tử cảm biến.

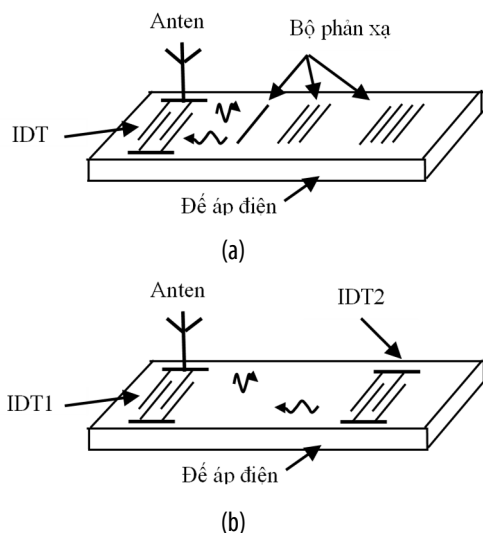
SAW được sử dụng trong các hệ đo độc lập hoặc trong hệ đa cảm biến, hoặc mỗi phần tử SAW là một nút trong mạng cảm biến. Trong hệ đa cảm biến, một bộ đọc sẽ nhận các tín hiệu trở về từ nhiều cảm biến thành phần, như vậy nó phải thực hiện nhiệm vụ cung cấp các thông tin tin cậy cho hệ thống có nghĩa là phải xác định tín hiệu đọc được là của cảm biến thành phần nào trong hệ. Cũng

như nhiều hệ thống không dây hiện nay, việc giao tiếp mạng trong hệ thống của các cảm biến SAW sử dụng các sóng RF với các dải tần tương đối rộng, từ cỡ MHz đến 2.5GHz. Điều này đòi hỏi các cảm biến SAW được thiết kế về cả cấu trúc phần cứng và thuật toán phần mềm phải đáp ứng được dải tần hoạt động nếu tham gia vào các nút mạng. Bởi tín hiệu từ SAW gửi trở lại bộ đọc mang các thông tin đo lường và nhận dạng, do đó biên độ của các tín hiệu này lớn để giảm ảnh hưởng từ các nhiễu bên ngoài là một yêu cầu quan trọng khi thiết kế cảm biến. Hình 1 là sơ đồ khối mô tả một SAW không dây, bao gồm hai khối chính là bộ đọc và phần tử cảm biến.



Hình 1. Sơ đồ khối của thiết bị cảm biến SAW không dây

Nguyên lý chung là bộ đọc phát ra một tín hiệu thăm vấn gửi đến cảm biến qua anten, cảm biến biến đổi thông tin thành tín hiệu tần số vô tuyến để có thể truyền tín hiệu trở lại bộ đọc thông qua anten gắn trên nó. Bộ đọc giải mã tín hiệu RF nhận được để có các thông tin về các đại lượng đo. Có thể sử dụng độ dịch tần số, trễ thời gian hoặc trễ pha từ các tín hiệu phản hồi của các bộ phản xạ trên để đánh giá được thông tin cần đo về đại lượng vật lý [2]. Về cấu trúc, SAW có thể có các dạng một cổng hoặc hai cổng, như mô tả trên hình 2.

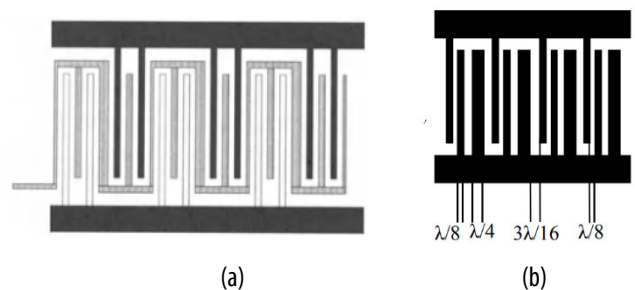


Hình 2. Cấu trúc cảm biến SAW: một cổng RDL (a), hai cổng (b)

Cấu trúc hai cổng gồm hai bộ IDT và sử dụng độ trễ thời gian giữa hai tín hiệu tại IDT đầu vào và IDT đầu ra phụ thuộc vận tốc lan truyền sóng cơ trên bề mặt để áp điện và khoảng cách giữa hai bộ IDT. Cấu trúc đường trễ

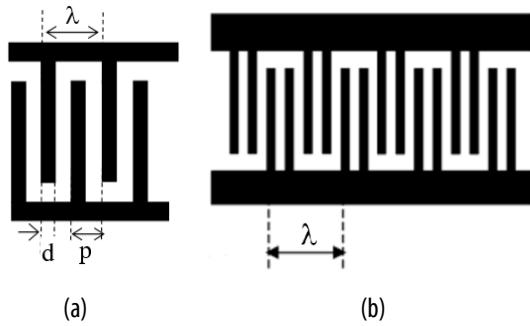
phản xạ một cổng SAW RDL được sử dụng rộng rãi trong hệ đơn và đa cảm biến thụ động không dây bởi ưu điểm là có thể triệt tiêu tất cả các tín hiệu nhiễu vọng từ môi trường do đường lan truyền sóng từ IDT đến bộ phản xạ được sử dụng hai lần. Phần tử cảm biến là SAW RDL được mô tả chi tiết trên hình 2a, anten được gắn trên IDT để phát và nhận tín hiệu, các bộ phản xạ nằm trên cùng một phía của IDT. Trong các ứng dụng SAW, phần tử cảm biến được thiết kế sao cho tín hiệu phản hồi trở lại IDT có biên độ lớn nhất để gửi lại bộ đọc. Các tín hiệu hồi đáp này ngoài việc bị ảnh hưởng bởi các yếu tố bao gồm môi trường truyền sóng điện từ, anten còn phụ thuộc vào cấu trúc của cảm biến, vật liệu để sử dụng, cấu trúc hình học của IDT và các bộ phản xạ [3-6].

IDT có cấu tạo làm từ các màng kim loại với cấu trúc cài răng lược, có vai trò tạo sóng âm bề mặt trên đế, các điện cực (hay còn gọi là ngón tay) của IDT có độ rộng d , tổng số cặp điện cực của IDT là N_p . Hình 3 mô tả IDT một hướng với hai loại: UDT nhiều pha (a) và một pha đơn hướng SPUDT (b) [7]. Loại UDT nhiều pha có dạng các điện cực tuần hoàn với khoảng cách giữa các điện cực là bằng nhau. Có thể sử dụng các điện áp đầu vào lệch pha nhau 120° (với loại 3 pha) hoặc 90° (với loại 2 pha). Một trong những yêu cầu quan trọng khi lựa chọn các cấu trúc IDT này là sự kết nối giữa các điện cực. Cùng với công nghệ chế tạo các điện cực thực hiện bằng kỹ thuật in quang khắc hiện nay, để kết nối các điện cực thứ ba với nhau (loại 3 pha), phải đưa ra kết nối nối tiếp của chúng hoặc cấu trúc khe hở không khí làm điện trở tăng dẫn đến tổn hao tăng. Loại SPUDT khắc phục được nhược điểm này bởi nhận điện áp đầu vào một pha, tuy nhiên SPUDT gồm ba hoặc bốn điện cực cho mỗi chu kỳ p_i , có sự chênh lệch giữa độ rộng các điện cực khá lớn, điểm này yêu cầu công nghệ chế tạo phải đảm bảo nên cũng là một vấn đề cần được xem xét kỹ lưỡng khi thiết kế cảm biến.



Hình 3. Cấu trúc của IDT một hướng; (a) loại UDT nhóm, (b) loại SPUDT [7]

IDT hai hướng chia làm hai loại: điện cực đơn và điện cực kép, mô tả trên hình 4. So với loại điện cực đơn có độ rộng ngón tay là $\lambda/4$ thì cấu trúc IDT loại điện cực kép có độ rộng ngón tay tương đối hẹp ($\lambda/8$).



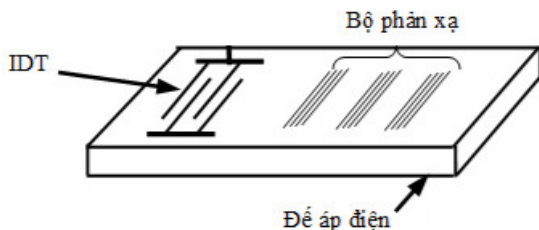
Hình 4. Cấu trúc IDT hai hướng; (a) điện cực đơn, (b) điện cực kép

Một số nghiên cứu về các yếu tố hình thái cấu trúc ảnh hưởng đến tín hiệu hồi đáp của cảm biến SAW đã được thực hiện, trong đó tác giả đã phân tích biên độ tín hiệu hồi đáp từ các bộ phản xạ [3], giảm khoảng cách từ IDT đến các bộ phản xạ nhằm giảm kích thước cảm biến [4, 5]. IDT đặt trên phần tử cảm biến có thể có các cấu trúc một hướng hoặc hai hướng, các công bố [3-6] đã nghiên cứu và đánh giá các tín hiệu được gửi trở lại bộ đọc với cùng vật liệu LiNbO₃ cho để cảm biến và sử dụng IDT hai hướng điện cực đơn, việc khảo sát so sánh về tín hiệu phản hồi ở cùng điều kiện giữa loại hai hướng và loại SPUDT chưa được thể hiện rõ ràng [8, 9].

Bài báo này mô phỏng và so sánh tín hiệu phản xạ giữa cấu trúc một hướng SPUDT và cấu trúc hai hướng của IDT đặt trên đế áp điện LiNbO₃ với 3 bộ phản xạ của cảm biến thụ động không dây SAW loại đường trễ một cổng.

2. MÔ PHỎNG CẢM BIẾN SAW RDL

Mô hình mô phỏng FEM được thực hiện trên công cụ Ansys cho hai loại cấu trúc IDT một hướng SPUDT và hai hướng điện cực đơn, đế áp điện là vật liệu YZ-LiNbO₃ có độ dày 80μm, ba bộ phản xạ có cấu trúc dạng mạch hở, mỗi bộ gồm 4 thanh nhôm có độ dày h và độ rộng d là 1μm. Khoảng cách từ biên trái tới IDT là 800μm bằng khoảng cách từ bộ phản xạ thứ 3 tới biên phải. Bộ phản xạ thứ nhất đặt cách IDT 200μm, các bộ phản xạ đặt cách đều nhau với khoảng 200μm.



Hình 5. Mô hình mô phỏng của SAW RDL

Mô hình mô phỏng cho trường hợp IDT gồm 10 cặp ngón tay, cấu trúc hai hướng điện cực đơn (mô tả trên hình hình 4a) có độ rộng ngón tay là 1μm, bước sóng

$\lambda = 4\mu\text{m}$, đế YZ-LiNbO₃ có vận tốc sóng bề mặt lan truyền là $v = 3480\mu\text{m}$ [6] như vậy tần số trung tâm f_c được mô tả trong công thức (1) [10]:

$$f_c = \frac{v}{\lambda} = 870(\text{MHz}) \tag{1}$$

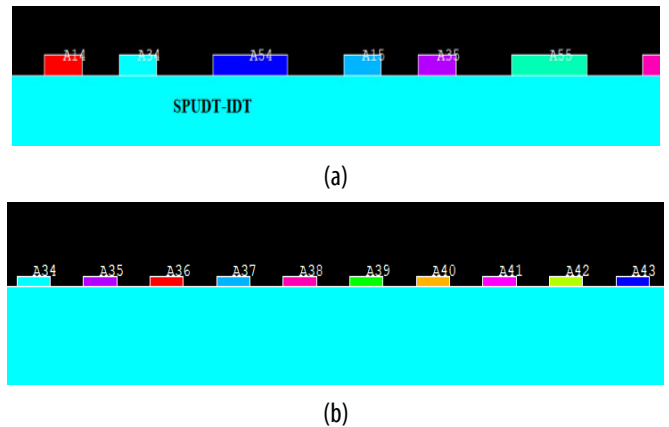
Nghiên cứu không đề cập đến sự ảnh hưởng về các thông số của anten, các quá trình năng lượng và sóng điện từ lan truyền giữa bộ đọc và IDT, giả thiết tín hiệu đặt vào IDT chính là tín hiệu thấm vắn từ bộ đọc. Tín hiệu điện áp đặt vào IDT là $u(t)$, mô tả trong công thức (2):

$$u(t) = 2\cos(2\pi * 870 * 10^6 * t)\text{rect}(t - \tau) \tag{2}$$

Trong đó hàm $\text{rect}(x) = 1$ khi $|x| < \frac{1}{2}$, ngoài khoảng này

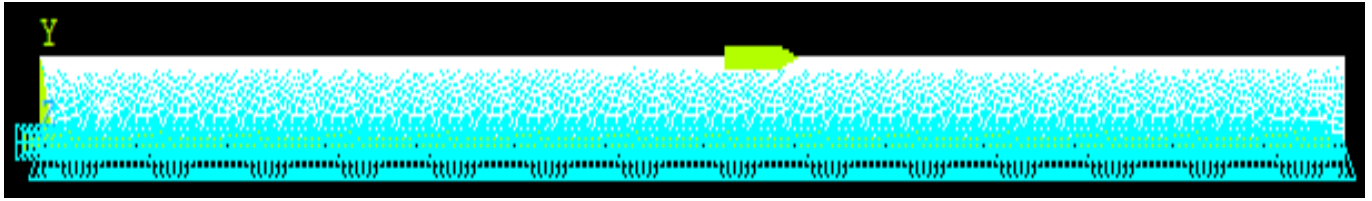
$\text{rect}(x) = 0$; τ là độ rộng xung điện áp đặt vào IDT. Các thông số của vật liệu YZ-LiNbO₃ bao gồm hệ số ma trận đàn hồi c_{ij} , hệ số ma trận áp điện e_{ij} , ma trận hằng số điện môi ϵ_{ij} trong [9] được nhập vào khi cấu hình thiết bị trong Ansys. Khối lượng riêng của YZ-LiNbO₃ là 4700 (kg/m³), của điện cực nhôm là 2679 (kg/m³), hệ số Poisson là 0,345 và hệ số Young là 70,3 (GPa).

Mô hình mô phỏng cho trường hợp IDT cấu trúc một hướng SPUDT (mô tả trên hình 3b) có bước sóng $\lambda = 4\mu\text{m}$, các điện cực lần lượt là $\lambda/4 = 1\mu\text{m}$; $\lambda/8 = 0,5\mu\text{m}$; $3\lambda/16 = 0,75\mu\text{m}$, điện áp đặt vào IDT mô tả trong công thức (2). Hình 6 là hình ảnh điện cực IDT đặt trên đế áp điện. Điện cực ở cấu trúc một hướng SPUDT có độ rộng không bằng nhau (hình 6a) còn ở cấu trúc hai hướng có độ rộng như nhau (hình 6b).

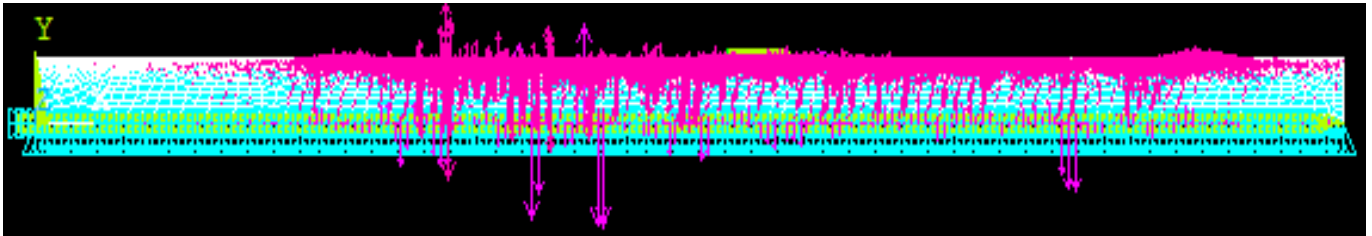


Hình 6. Điện cực IDT đặt trên đế; một hướng SPUDT (a); hai hướng (b)

Hình 7 là hình ảnh mô hình sau chia lưới và đặt điều kiện biên, trong đó bề mặt của đế và tại vị trí đặt IDT và các bộ phản xạ được chia dày hơn, đáy và hai cạnh bên của đế áp điện được chia mỏng hơn nhằm giảm thời gian giải.



Hình 7. Mô hình sau chia lưới và đặt điều kiện biên



Hình 8. Mô hình sau khi giải

Tín hiệu điện áp thu được ở bộ IDT đầu ra là tín hiệu tương tự, tuy nhiên khi mô phỏng trên máy tính thì dạng tín hiệu thu được là dạng tín hiệu rời rạc do máy tính xử lý dạng số. Do vậy, các mẫu sẽ được lấy với chu kỳ T_e , giá trị của T_e được chọn sao không bị mất thông tin và có thể khôi phục tín hiệu ban đầu một cách chính xác, thỏa mãn điều kiện lấy mẫu Shannon như mô tả ở công thức (3):

$$T_e \leq \frac{1}{2f_{\max}} \rightarrow f_e \geq 2f_{\max} \quad (3)$$

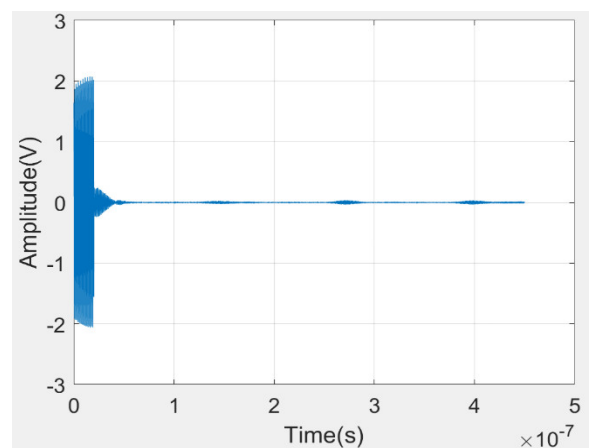
Chọn $f_e = 10000\text{MHz} \approx 12f_{\max}$ nên:

$$T_e = \frac{1}{f_e} = 0,1(\text{ns}) \quad (4)$$

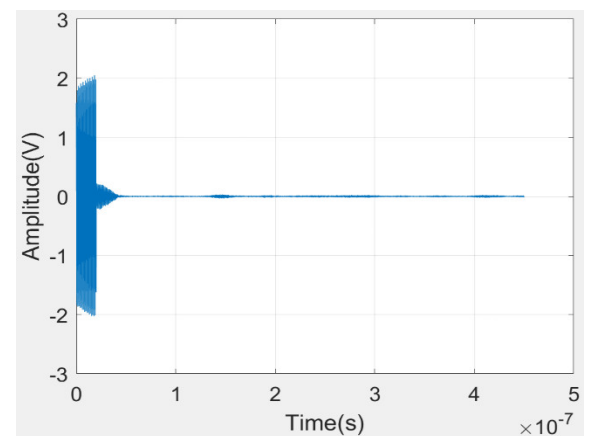
Để giảm khối lượng tính toán, số bước giải chọn là 4500 nên thời gian mô phỏng là 450 ns. Với số bước tính toán là 4500 bước thì có thời gian giải là $450 \cdot e^{-9}$. Xung điện áp đặt vào IDT trong thời gian 20ns. Hình 8 là hình ảnh sau khi giải.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 9 là điện áp đọc tại IDT với cấu trúc hai hướng (hình 9a) và một hướng SPUDT (hình 9b) trong cùng điều kiện mô phỏng và giữ nguyên các thông số còn lại. Đồ thị điện áp cho thấy, với cấu trúc IDT hai hướng có ba đỉnh sóng phản xạ lớn nhất tại các thời điểm $t_{11} = 0,1466\mu\text{s}$; $t_{12} = 0,27\mu\text{s}$; $t_{13} = 0,399\mu\text{s}$ với các giá trị của điện áp xấp xỉ tương ứng là 0,028 (V); 0,037 (V); 0,033 (V). Các vị trí thời gian này chính là thời điểm sóng cơ lan truyền với vận tốc $v = 3480\text{m/s}$ trên bề mặt đế YZ-LiNbO₃ tính theo lý thuyết. Trích xuất ba đỉnh phản xạ này được thể hiện trên hình 10. Tại vị trí của bộ phản xạ thứ nhất, cả hai cấu trúc đều cho biên độ lớn nhất ở thời điểm $t = 0,14\mu\text{s}$ phần thập phân sai lệch rất nhỏ có do trễ lan truyền khi cấu trúc một hướng có số điện cực nhiều hơn so với cấu trúc hai hướng.



(a)

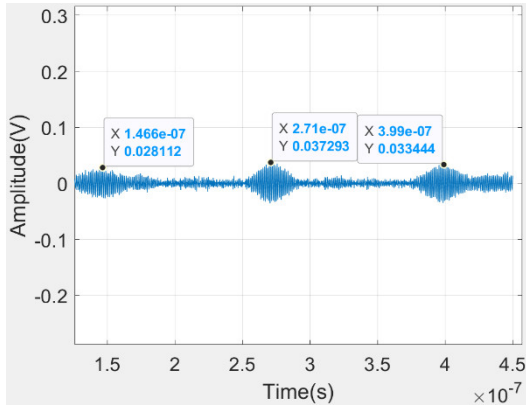


(b)

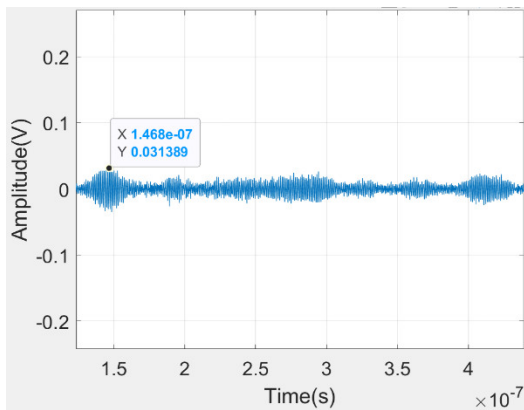
Hình 9. Điện áp tại IDT; (a) hai hướng; (b) một hướng SPUDT

Biên độ của sóng điện áp, tại bộ phản xạ thứ nhất của cấu trúc một hướng là 0,0313 (V) lớn hơn so với cấu trúc hai hướng là 0,0281 (V), tuy nhiên sóng hồi đáp tại hai bộ phản xạ còn lại không rõ ràng ở cấu trúc một hướng SPUDT, như thể hiện trên hình 10b, tín hiệu hầu như bị suy hao trong quá trình lan truyền sau khi qua bộ phản xạ thứ nhất. Hình 11 mô tả trích xuất phản hồi của bộ phản xạ thứ nhất tại IDT trên cùng một đồ thị.

Số điện cực nhiều hơn trong cấu trúc một hướng SPUDT là một yếu tố gây nên sự suy giảm sóng lan truyền và phản xạ. Xét phản xạ tại một thanh của điện cực IDT như mô tả trên hình 12 [7], trong đó A_{in} là biên độ của sóng tới một phần sóng này phản xạ tại biên trái và biên phải của thanh với các biên độ tương ứng là A_- và A_+ biểu diễn bởi phương trình (5) và (6) [7].

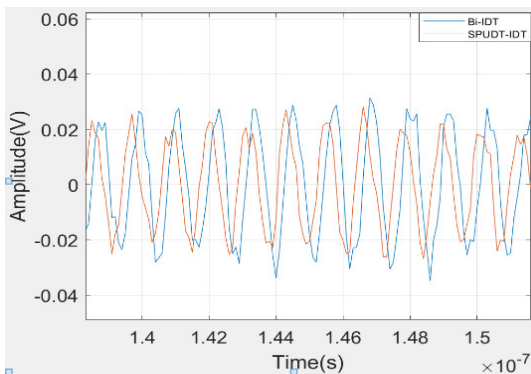


(a)



(b)

Hình 10. Trích xuất ba đỉnh của điện áp phản hồi tại IDT: (a) hai hướng; (b) một hướng SPUDT



Hình 11. Trích xuất đỉnh của tín hiệu phản xạ tại IDT của bộ phận xạ thứ nhất của hai cấu trúc

$$A_- = r_- A_{in} \exp\left\{-2j\beta_2\left(L - \frac{w}{2}\right)\right\} \quad (5)$$

$$A_+ \cong r_+ A_{in} \exp\{-j(2\beta_2 L + \beta_1 w)\} \quad (6)$$

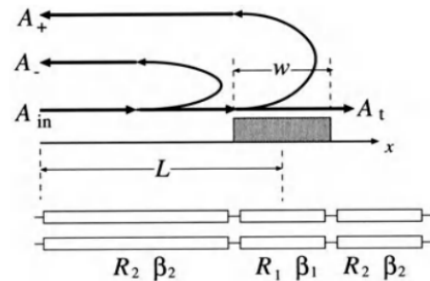
Trong đó, r_- và r_+ là hệ số phản xạ tại biên trái và biên phải của điện cực, phụ thuộc vào trở kháng sóng R_1 và R_2 theo công thức (7).

$$r_- = -r_+ = \frac{(R_1 - R_2)}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

Do $|r_{\pm}| \ll 1$ nên hệ số phản xạ trên toàn bộ lưới của IDT là [7]:

$$\Gamma_s = \frac{A_+ + A_-}{A_{in}} \cong 2jr_- \sin(\beta_1 w) \exp(-2j\beta_2 L) \quad (8)$$

Theo lý thuyết về sóng, xảy ra sự nhiễu loạn nhỏ của các sóng trong quá trình lan truyền. Ở một số dải tần nhất định, các sóng phân tán cùng pha nên tổng của chúng sẽ gây ra phản xạ rất mạnh gọi là phản xạ Bragg [7], mô tả trên hình 12.



Hình 12. Mô tả quá trình sóng tại một điện cực IDT

Cấu trúc một hướng SPUDT có ưu điểm là năng lượng sóng tập trung lan truyền theo một hướng dẫn đến biên độ sóng có thể lớn hơn tại bộ phận xạ thứ nhất, tuy nhiên do số thanh của một cặp điện cực lớn hơn là một yếu tố làm tăng sóng phản xạ đồng thời tăng sự nhiễu loạn sóng lan truyền trên bề mặt dẫn đến sóng tới các bộ phận xạ thứ hai và thứ 3 suy giảm. Xét ở góc độ chế tạo cảm biến, loại một hướng SPUDT có độ rộng điện cực xấp xỉ $\lambda/8$, nếu dải tần số làm việc của cảm biến SAW lớn thì độ rộng thanh điện cực rất nhỏ nên công nghệ chế tạo đòi hỏi rất cao để hạn chế việc đứt gãy trong quá trình quang khắc. Hiện nay, các SAW không dây được thiết kế để sử dụng tương đối nhiều trong các hệ đa cảm biến, đòi hỏi bộ đọc nhận dạng tín hiệu phản hồi mang thông tin cả về mã của cảm biến. Điều này liên quan đến phương pháp mã hóa cảm biến, sử dụng số bộ phận xạ và cấu trúc của các bộ phận xạ. Để đáp ứng được yêu cầu này thì bộ đọc không chỉ nhận tín hiệu phản hồi từ bộ phận xạ thứ nhất mà còn phải nhận các tín hiệu trở về từ các bộ phận xạ phía sau.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô phỏng hai cấu trúc IDT là hai hướng và một hướng SPUDT sử dụng vật liệu nhôm đặt trên đế YZ-

LiNbO_3 trong cùng điều kiện các thông số về độ dày đế, bộ phản xạ và các điều kiện biên. Biên độ của điện áp sinh ra bởi sóng hồi đáp của các bộ phản xạ trong cấu trúc SPUTD lớn hơn ở bộ thứ nhất (có giá trị 0,0313 (V)) so với cấu trúc hai hướng (có giá trị 0,028 (V)) nhưng suy hao ở hai bộ phản xạ còn lại. Với cấu trúc hai hướng, biên độ của sóng hồi đáp thấp hơn tại bộ thứ nhất nhưng lớn hơn và sắc nét tại hai bộ còn lại. Hiện nay các công nghệ không dây đang phát triển rất mạnh mẽ, mức độ phổ biến ngày càng tăng của các công nghệ cảm biến không dây trong hệ vận vật tương tác (IoT), việc sử dụng nhận dạng tần số vô tuyến (RFID) là một giải pháp thú vị và phổ biến để khai thác các hệ thống IoT hoặc mạng cảm biến phân tán. Khi đó các cảm biến SAW cần được thiết kế để đáp ứng được yêu cầu mã hóa từng cảm biến trong hệ, như vậy đòi hỏi sóng phản hồi lớn từ các bộ phản xạ. Yêu cầu này là một vấn đề cần được cân nhắc lựa chọn cấu trúc nào cho IDT kết hợp với các thông số khác của cảm biến SAW để có thiết kế tối ưu cho ứng dụng.

[9]. Nguyen Thu Ha, Phan Dang Hung, Tran Manh Hung, Nguyen Hoang Nam, Nguyen Thanh Huong, Cung Thanh Long, Hoang Si Hong "A FEM simulation of the influence of the reflector on the response of the passive wireless SAW structure", *Vietnam Japan Microwave 2017 Conference (VJMW)*, 99-103, 2017.

[10]. Colin Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications*. Academic Press, 1989.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thu Ha¹, Bui Lap Hien¹, Hoang Si Hong²

¹Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

²School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Saldanha N., Malocha D.C., "Pseudo-orthogonal frequency coded wireless SAW RFID temperature sensor tags," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 59(8), 1750-1758, 2012.

[2]. Alfred Pohl, "A Review of Wireless SAW Sensors," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47, 2, 317-332, 2002.

[3]. Kalinin V., et al., "Resonant SAW torque sensor for wind turbines," in *2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, IEEE, 462-465, 2013.

[4]. Shahla Arabshahi, Massoud Dousti, Hassan Feshki Farahani, "Simulation of A Surface Acoustic Wave RFID Tag with Reduction of Size and Data Capacity Consistency," *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2, 6, 1409-1412, 2012.

[5]. S. Lehtonen, J. Koskela, V. P. Plessky, M. M. Salomaa, "Second Harmonic Reflectors," in *2000 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No.00CH37121)*, 215-218, 2000.

[6]. Saku Lehtonen, Victor P. Plessky, Martti M. Salomaa, "Short Reflectors Operating at the Fundamental and Second Harmonics on 128°LiNbO_3 ," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, 51, 3, 343-351, 2004.

[7]. K.Y. Hashimoto, *Surface acoustic wave devices in telecommunications - Modelling and Simulation*. Springer Berlin, Heidelberg, 2000.

[8]. Nguyen Thu Ha, Phan Dang Hung, Hoang Si Hong, Nguyen The Truyen, "A study of the effect of IDTs and input signals on the amplitude of propagation waves of the passive SAW structure", in *2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, IEEE, 453-457, 2017.