

## Nghiên cứu ảnh hưởng của độ ẩm đến cảm biến SAW hóa học cấu trúc đa lớp Graphene /AlN/Si

### Studying the effect of humidity on the Graphene/AlN/Si multilayer structure of SAW chemical sensor

Nguyễn Hải Hà<sup>1,2</sup>, Trương Ngọc Tuấn<sup>2</sup>, Hoàng Sĩ Hồng<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Trường Điện – Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup> Trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, Việt Nam

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

#### Abstract

This study presents the 2D FEM simulation method and experimental fabrication of SAW- based on multilayer structure Graphene/AlN/Si changes with humidity. The chemical SAW sensor is a type of sensor based on the phenomenon of surface acoustic wave changes. Simulation results show that the center frequency decreases from 127.458 MHz to 127.431 MHz, when the humidity increases from 10% to 100%. This is completely consistent with the trend of the experimental results, the center frequency is also reduced from 127.634 MHz to 126.578 MHz. Both simulation and experimental results are consistent with the theory that when the humidity increases, the equivalent sensitivity layer thickness increases, and the average density of the sensitive layer changes (decreases) leading to a decrease in the center frequency.

**Keywords:** Surface acoustic wave , relative humidity, frequency response, piezoelectric materials, water vapor adsorption.

#### Ký hiệu

Symbols	Units	Description
$V_{SAW}$	m/s	Vận tốc sóng bề mặt
$f$	Hz	Tần số trung tâm (cộng hưởng)
$\Delta f$	Hz	Độ dịch tần
$\lambda$	m	Độ dài bước sóng
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	Khối lượng riêng

#### Các từ viết tắt

SAW	Surface Acoustic Wave
IDT	Inter-Digital Transducer
FEM	Finite Element Method
AlN	Aluminum Nitride
MEMS	Micro-Electro Mechanical Systems
FFT	Fast Fourier Transform
SEM	Scanning Electron Microscope
Si	Silicon
GO	Graphene Oxide
PR	Photoresist

#### Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày phương pháp mô phỏng FEM 2D và thực nghiệm chế tạo khảo sát cảm biến SAW có cấu trúc đa lớp Graphene/AlN/Si thay đổi theo độ ẩm. Cảm biến SAW hóa học là loại cảm biến dựa trên hiện tượng thay đổi sóng âm bề mặt. Kết quả mô phỏng cho thấy tần số trung tâm giảm từ 127.458 MHz xuống còn 127.431 MHz, khi độ ẩm tăng từ 10% đến 100%. Điều này hoàn toàn phù hợp với xu hướng của kết quả thực nghiệm, tần số trung tâm cũng giảm từ 127.634 MHz xuống 126.578 MHz. Cả hai kết quả mô

phỏng và thực nghiệm đều phù hợp với lý thuyết khi độ ẩm tăng thì chiều dày lớp nhạy tăng, khối lượng riêng trung bình lớp nhạy thay đổi (giảm), dẫn tới tần số trung tâm giảm.

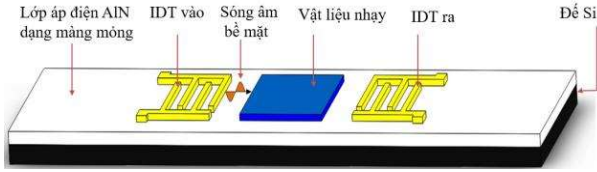
#### 1. Giới thiệu chung

Năm 1965, hai nhà khoa học Wohltjen và White đã phát minh là một loại cảm biến mới, đó là cảm biến sóng âm bề mặt (SAW) [1]. Vì có một số ưu điểm nổi bật như kích thước nhỏ, giá thành rẻ, độ tin cậy cao và đặc biệt rất nhạy với khí nên cảm biến SAW được sử dụng trong nhiều lĩnh vực như giao thông, công nghiệp, năng lượng, và môi trường [2]. Mặt khác, gần đây graphene được tìm ra và nhanh chóng đưa vào ứng dụng làm vật liệu nhạy và vật liệu mang nhạy trong cảm biến bởi vì tỷ lệ bề mặt trên thể tích lớn, độ linh động và mật độ hạt tải điện cao [3]. Do đó, việc dùng graphene và graphene oxide (GO) trong cảm biến SAW được nhiều nghiên cứu quan tâm như trong bài báo [4][5][6][7][8], đã dùng graphene và GO làm vật liệu nhạy khí NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, NH<sub>3</sub> và hơi TNT; trong công bố [9][10][11] graphene và GO được dùng làm vật liệu nhạy hơi ẩm. Tuy chung lại, các công trình này đều là thực nghiệm SAW trên đế áp điện dạng khối quartz, LiTO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub> có vận tốc sóng âm bề mặt thấp, mà chưa dùng đế áp điện dạng màng mỏng AlN có vận tốc sóng cao hơn để làm tăng độ nhạy. Vì vậy trong nghiên cứu trước của chúng tôi [12], đã dùng cấu trúc SAW dạng đa lớp với vật liệu áp điện màng mỏng AlN để cải thiện độ nhạy, dùng graphene làm vật liệu mang, vật liệu nhạy là Pd đo khí H<sub>2</sub>, tuy nhiên việc khảo sát ảnh hưởng của yếu tố môi trường đo như là độ ẩm chưa được đề cập tới. Độ ẩm cao tại Việt Nam luôn là vấn đề được quan tâm bởi vì gây ra sai số trong các phép đo của cảm biến khí. [13]. Do đó, trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát đặc tính vật liệu nhạy là graphene với cấu trúc SAW dạng đa lớp

Graphene/AlN/Si. Mô phỏng 2D cơ chế ảnh hưởng tần số trung tâm theo độ ẩm của SAW bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Đây cũng là căn cứ để loại trừ tác động của yếu tố độ ẩm cho cảm biến theo nguyên lý sóng âm bề mặt với vật liệu mang là graphene đo khí.

## 2. Cơ sở lý thuyết

Cảm biến SAW hóa học dạng delay-line (hình 1) gồm 3 phần chính: Đế áp điện dùng màng AlN; điện cực rỗng lược IDT có độ rộng các ngón tay cách đều nhau, bằng một phần tư lần bước sóng, vật liệu làm điện cực là Al; vật liệu nhạy là graphene được phủ ở khoảng trống giữa IDT vào - IDT ra [14].



Hình 1. Cấu trúc cơ bản của SAW

Nguyên lý hoạt động của cảm biến SAW là sự dịch tần số trung tâm của sóng âm bề mặt khi đi từ IDT vào qua lớp vật liệu nhạy đến IDT ra [13][15]. Cụ thể, khi cấp cho IDT vào một xung điện áp xoay chiều với dải tần số xác định, do hiện tượng áp điện nghịch để AlN bị biến dạng cơ học liên tục theo điện áp, hình thành sóng lan truyền trên bề mặt với vận tốc xác định, vận tốc của sóng lan truyền gọi là  $V_{SAW}$  và tới IDT ra. Tại đây, do hiện tượng áp điện thuận, năng lượng cơ chuyển đổi thành năng lượng điện, hình thành điện áp xoay chiều trên IDT ra. Sự chuyển đổi qua lại giữa năng lượng điện sang cơ năng và ngược lại trên đế áp điện được mô tả qua định luật Hooke [16]:

$$\begin{aligned} T_{ij} &= C_{ijkl} \cdot S_{kl} - e_{ijk}^T \cdot E_k \\ D_i &= e_{ijk} \cdot S_{kl} + \epsilon_{ij}^S \cdot E_j \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó  $T_{ij}$  là vectơ ứng suất,  $C_{ijkl}$  là ma trận đàn hồi ( $N/m^2$ ),  $e_{ijk}^T$  là ma trận áp điện ( $C/m^2$ ),  $\epsilon_{ij}^S$  là ma trận điện môi ( $F/m$ ),  $E_k$  là vectơ điện trường ( $V/m$ ),  $S_{kl}$  là vectơ biến dạng,  $D_i$  là vectơ chuyển bị điện ( $C/m^2$ ).

Mặt khác, trên IDT ra có điện áp xoay chiều, hình thành sóng cơ học lan truyền ngược lại và cộng hưởng với sóng lan truyền thuận tại một tần số xác định. Tần số  $f$  này gọi là tần số trung tâm (cộng hưởng).

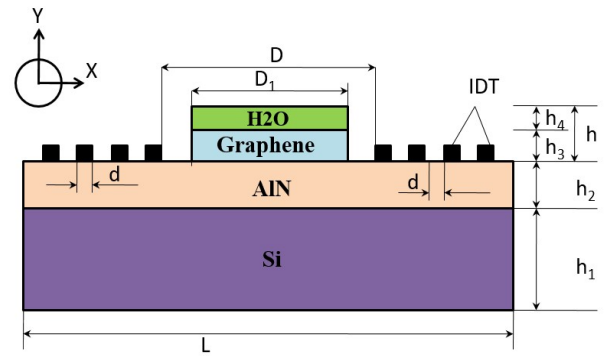
$$f = \frac{V_{SAW}}{\lambda} = \frac{V_{SAW}}{4d} \quad (2)$$

Với  $\lambda$  là bước sóng,  $d$  là độ rộng ngón tay của điện cực được giữ cố định. Vận tốc lan truyền  $V_{SAW}$  hoàn toàn phụ thuộc vào bản chất của vật liệu áp điện.

## 3. Mô phỏng và thực nghiệm chế tạo

### 3.1. Mô phỏng

Cấu trúc của cảm biến SAW dùng để mô phỏng được trình bày qua hình 2



Hình 2. Cảm biến SAW với cấu trúc Graphene/IDTs/AlN/Si

Với các thông số kích thước hình học được tham khảo trong nghiên cứu trước của chúng tôi thực nghiệm cảm biến SAW cấu trúc đa lớp, đế áp điện AlN [12], thể hiện qua bảng 1

Bảng 1. Thông số hình học của cảm biến SAW

Kích thước	Giá trị
Chiều dài cảm biến L	8 mm
Độ dày của lớp đế Si, $h_1$	5 mm
Độ dày của lớp áp điện AlN, $h_2$	500 nm
Độ dày của lớp Graphene, $h_3$	50 nm
Độ dày của lớp nước ( $H_2O$ ), $h_4$	(1-14) nm
Độ rộng của lớp Graphene, $D_1$	1,5 mm
Độ rộng của điện cực, $d$	10 $\mu m$
Khoảng cách giữa IDT- IDT là D	5 mm
Số đôi điện cực IDT vào/ra	25

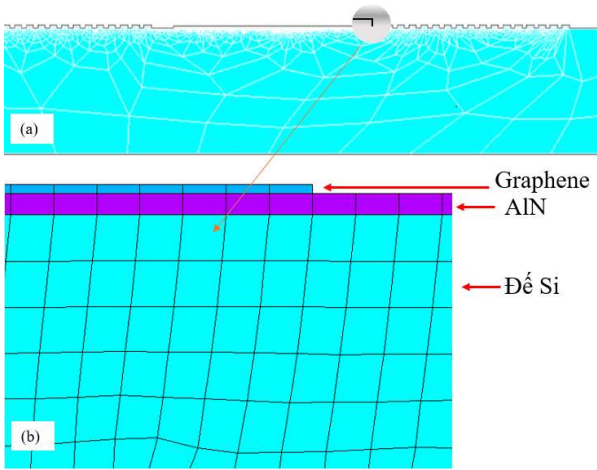
Các bước mô phỏng chính gồm: dựng mô hình, khai báo vật liệu, chia lưới, đặt tải và giải.

Bảng 2. Thông số vật liệu của cảm biến SAW [17], [18]

		Si	AlN	Graphene
Ma trận độ cứng, $c_{ij}$ (GPa)	$c_{11}$	165.64	410.06	800
	$c_{12}$	63.94	100.69	
	$c_{13}$		83.82	
	$c_{33}$		386.24	
	$c_{44}$	79.51	100.58	
	$c_{66}$		154.70	
Ma trận áp điện, $e_{ij}$ ( $C/m^2$ )	$e_{15}$		-0.48	
	$e_{31}$		-0.58	
	$e_{33}$		1.55	
Hằng số điện môi, $\epsilon_{ij}$	$\epsilon_{11}$	11.7	9	20
	$\epsilon_{33}$	11.7	11	20
Khối lượng riêng, $\rho$ ( $kg/m^3$ )		2329	3260	2267
Hệ số Poisson				0.272

Sau khi xây dựng xong mô hình hình học, khai báo vật liệu là chia lưới. Để đảm bảo độ chính xác cho quá trình giải thì khuyến cáo chia từ 20-50 phần tử trên một bước sóng, tất nhiên việc chia nhỏ hơn thì càng tốt. Do sóng Rayleigh truyền chủ yếu trên bề mặt nên chia các vùng vật liệu áp điện, vật

liệu nhạy là nhỏ cỡ 40 phần tử/ bước sóng (tương ứng với độ dài 1 phần tử cỡ 1µm), phần lớp Si các phần tử lớn hơn rất nhiều, như hình 3. Cả mô hình chia làm 228203 phần tử.



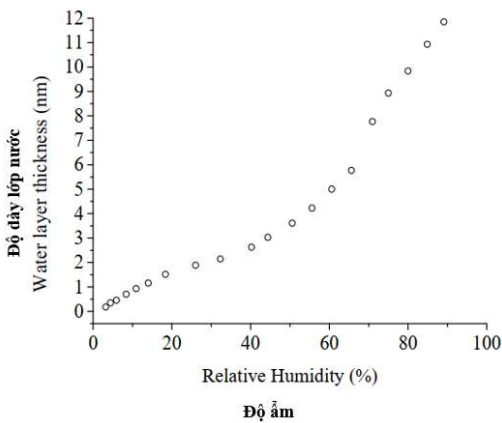
**Hình 3.** Quá trình chia lưới SAW với cấu trúc Graphene/AlN/Si (a); phóng to tại mô hình (b)

Phương pháp phần tử hữu hạn chia miền bài toán thành các miền nhỏ hơn, dễ dàng giải. Để giải bài toán ta phải giả thiết các điều kiện biên về cơ học và điện áp.

**Bảng 3.** Điều kiện biên

	Điều kiện biên về cơ học	Điều kiện biên về điện áp
Bề mặt cảm biến	Tự do	0
Dưới đáy cảm biến	Cố định	Nối đất
Đường tiếp giáp 2 lớp vật liệu	Tự do	Liên tục
Cạnh bên cảm biến	Tự do	Tự do

Bài toán được giải dưới chế độ transient (biến đổi theo thời gian) để tìm ra đáp ứng xung của mô hình và các thông số quan tâm. Mô phỏng lớp vật liệu nhạy graphene hấp thụ hơi ẩm nên khối lượng riêng và độ dày thay đổi. Theo [19] [20] [21], các phân tử nước (hơi ẩm) đọng trên bề mặt của lớp vật liệu nhạy graphene, khi mô hình hóa vật lý ta có thể coi lượng nước trên bề mặt này như một lớp vật chất đồng nhất và phụ thuộc vào nồng độ hơi ẩm như hình 4.



**Hình 4.** Quan hệ giữa độ dày lớp nước và độ ẩm [21]

Do độ dày  $h_4$  lớp nước rất mỏng so với độ dày lớp vật liệu chất nhạy  $h_3$  của graphene và phần mềm mô phỏng gặp giới hạn về kích thước vật lý khi chia lưới (chỉ tới cỡ 50nm), vì vậy ta có thể quy đổi lớp hai lớp  $h_3, h_4$  thành một lớp vật liệu nhạy tương đương graphene-nước có khối lượng riêng trung bình tương đương là  $\rho_{tb}$ . Một số thông số vật liệu không thay đổi theo bảng 2, trong đó độ dày tương đương  $h$  được xác định:

$$h = h_3 + h_4 \tag{3}$$

Từ đó suy ra khối lượng riêng  $\rho_{tb}$  trung bình tương đương biểu diễn theo công thức đề xuất sau:

$$\rho_{tb} = \frac{h_3 \rho_{graphene} \times h_4 \rho_{H_2O}}{h_3 + h_4} \tag{4}$$

Từ hình 4, tra ngược được độ dày  $h_4$  lớp nước tương quan với độ ẩm. Kết hợp với công thức (4) ta có bảng 4.

**Bảng 4.** Thông số lớp nhạy tương đương

Độ ẩm (%)	Độ dày lớp vật liệu nhạy graphene $h_3$ (nm)	Độ dày lớp nước $h_4$ (nm)	Độ dày tương đương $h$ (nm)	Khối lượng riêng lớp vật liệu nhạy $\rho_{graphene}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Khối lượng riêng lớp nước $\rho_{H_2O}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Khối lượng riêng trung bình tương đương $\rho_{tb}$ (kg/m <sup>3</sup> )
10	50	1	51	2267	1000	2242
20	50	1.5	51.5	2267	1000	2230
30	50	2.5	52.5	2267	1000	2207
40	50	3	53	2267	1000	2195
50	50	4	54	2267	1000	2173
60	50	5	55	2267	1000	2152
70	50	8	58	2267	1000	2092
80	50	10	60	2267	1000	2056
90	50	12	62	2267	1000	2022
100	50	14	64	2267	1000	1990

Dùng thông số độ dày  $h$  và khối lượng riêng  $\rho_{tb}$  của vật liệu nhạy graphene-nước theo bảng trên nhập vào khai báo ban đầu cho mỗi lần mô phỏng bằng ANSYS

### 3.2. Thực nghiệm chế tạo điện cực, phủ graphene và cài đặt hệ đo

#### 3.2.1. Chế tạo điện cực

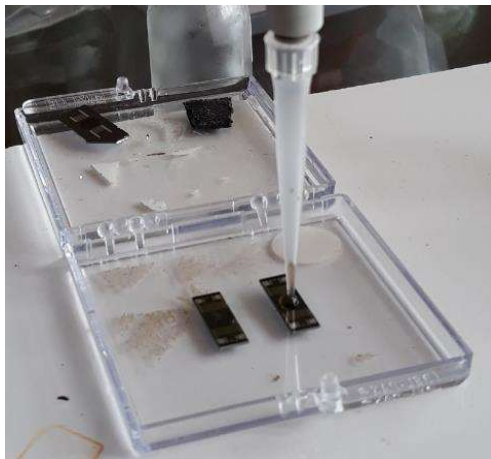
Cảm biến SAW được chế tạo theo công nghệ MEMS tại phòng sạch Viện ITIMS, Đại học Bách Khoa Hà Nội. Để cộng hưởng SAW theo cấu trúc hình 2 và kích thước hình học theo bảng 1. Quy trình chế tạo gồm 7 bước (hình 5), sau đó phủ vật liệu nhạy là graphene. Bước 1: Đế Si/AlN được rửa bằng axeton, nước sạch và sau đó sấy khô ở nhiệt độ 100°C. Bước 2: Phủ Al bằng máy phun xạ với công suất 150W, trong 20 phút, độ dày được 300nm. Bước 3: Phủ PR đặt trên máy ly tâm tốc độ 1000 vòng/phút, trong vòng 15s. Sau đó sấy ở 95°C trong vòng 90s. Bước 4: Chiếu chùm điện tử hội tụ lên mask với thời gian 15s. Sấy tại nhiệt độ là 125°C, sau khi quang khắc trong 10-15 phút. Bước 5: Loại bỏ phần PR không được chiếu, sau đó rửa sạch bằng nước và để khô. Bước 6: Ấn mòn Al bằng hỗn hợp axit theo tỉ lệ: CH<sub>3</sub>COOH/HNO<sub>3</sub>/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O:1/4/4/1. Bước 7: Tẩy PR bằng acetone



Hình 5. Chế tạo điện cực Al trên nền AlN/Si

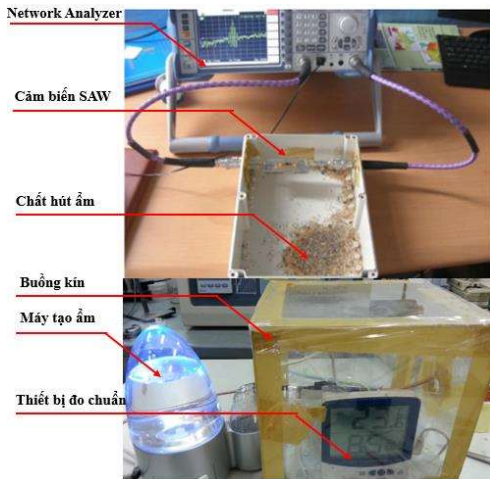
3.2.2. Phủ graphene

Graphene được dùng làm vật liệu nhạy được khử từ graphene oxit (GO) thương phẩm [12]. Khuấy 25mg GO trong 25 mL nước cất, sau đó thêm vào 3mL Benzylamin. Đun nóng và duy trì hỗn hợp ở 90°C trong 120 phút. Sau đó lắp gan bằng ly tâm, rửa huyền phù bằng nước khử ion, quá trình lặp lại 3-4 lần. Chất rắn thu được thì phân tán trong dung dịch bằng siêu âm, thêm 2g NaBH<sub>4</sub> và 1 g KOH vào hỗn hợp. Sau đó gia nhiệt đến tầm 70°C duy trì trong 120 phút, sau đó rửa sạch thì thu được graphene tái tổ hợp (reduce graphene oxide = rGO = graphene) ở dạng rắn, sau đó phân tán trong dung dịch N-methylpyrrolidon. Nhỏ dung dịch graphene này với nồng độ thích hợp lên đế SAW, sau đó làm khô, gia nhiệt thì thu được cảm biến với lớp phủ graphene (hình 6).



Hình 6. Nhỏ hỗn hợp dịch graphene lên đế SAW

3.2.3. Xây dựng hệ đo

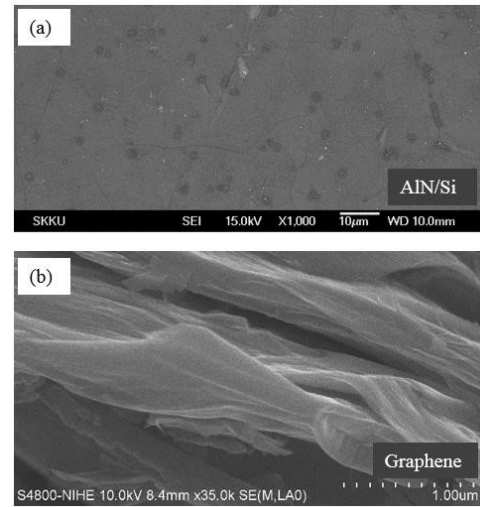


Hình 7. Thiết lập hệ đo độ ẩm tại điều kiện phòng

Tiến hành khảo sát cảm biến SAW sau khi chế tạo được bằng hệ thống các thiết bị gồm: Máy phân tích phổ Network Analyzer, hộp nhựa kín tạo môi trường chứa các hạt hút ẩm và thiết bị chuẩn đo độ ẩm, máy tạo hơi ẩm như hình 7. Cảm biến được nối với hai đầu dây đo của máy Network Analyzer để phân tích tần số trung tâm. Bom hơi ẩm vào hộp kín đạt độ ẩm 100% thì dừng lại, khi đó do các hạt hút sẽ tác dụng làm độ ẩm bên trong hộp giảm dần theo thời gian. Với mỗi nấc giảm của độ ẩm thì máy Network Analyzer đo được tần số trung tâm của cảm biến SAW.

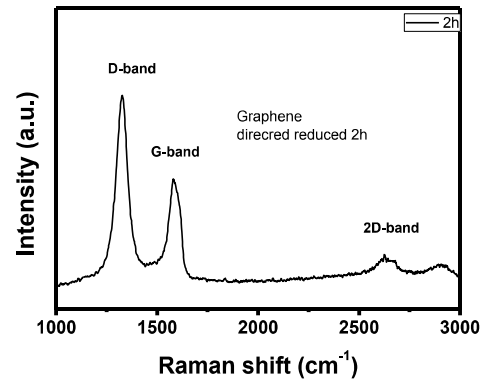
4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả chế tạo cảm biến



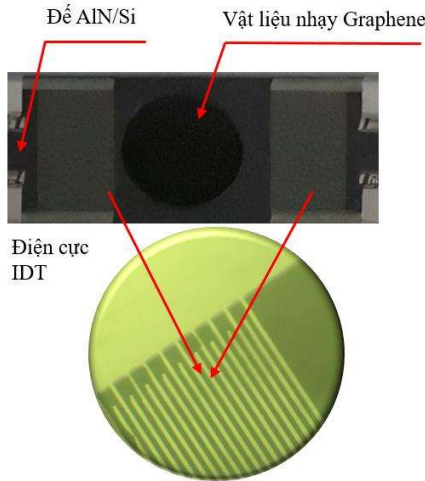
Hình 8. Ảnh SEM của cảm biến: AlN/Si (a), Graphene (b)

Hình 8a là ảnh SEM của đế áp điện bao gồm lớp áp điện AlN/Si. Hình 8b là ảnh SEM của graphene tổng hợp được, ta quan sát thấy gồm nhiều lớp xếp chồng lên nhau. Độ dày của một lớp cỡ vài chục nm. Hình 9 là phổ Rama của lớp graphene tại dải G ở vị trí 1593 cm<sup>-1</sup> tương ứng với các dao động mức E<sub>2g</sub> có trong các nguyên tử lai hóa sp<sup>2</sup> trong cấu trúc lục lăng của graphene. Cường độ giải D có xấp xỉ 1350 cm<sup>-1</sup>, tương quan trực tiếp với số lượng liên kết sp<sup>3</sup> có mặt trong graphene cũng như các khuyết tật trong các nguyên tử các bon (C). Đây là các đặc trưng phổ của graphene.



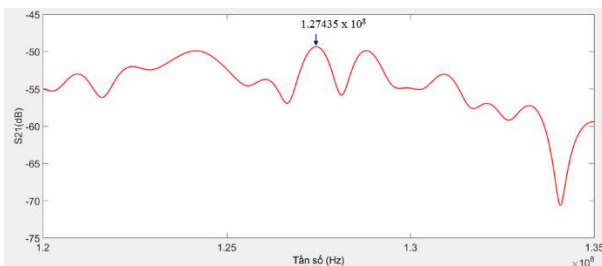
Hình 9. Phổ Rama của graphene

Hình 10 là kết quả chế tạo cảm biến SAW, biên dạng vật liệu lớp nhạy graphene có dạng tròn. Phóng to điện cực IDT ta thấy các ngón tay rất đều và không có dị tật.



Hình 10. Cảm biến SAW được chế tạo thành công và phủ graphene dùng để khảo sát độ ẩm

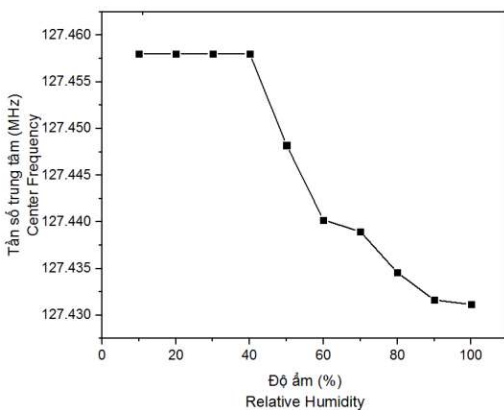
4.2. Kết quả mô phỏng



Hình 11. Tần số trung tâm khi mô phỏng SAW tại độ ẩm 80% bằng FEM

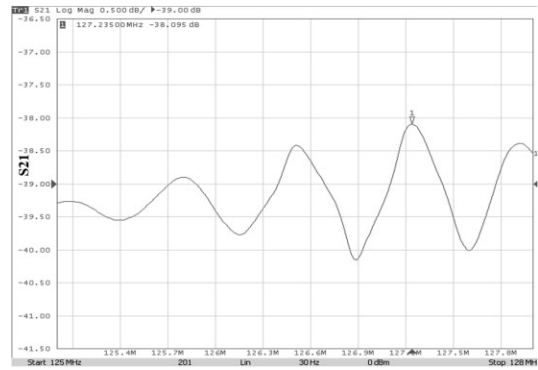
Kết quả mô phỏng bằng phần mềm ANSYS đối với cảm biến SAW ở trường hợp có lớp graphene thì thu được trên IDT ra bộ số liệu điện áp theo thời gian. Sau đó tiến hành phân tích phổ FFT trên phần mềm Matlab bộ số liệu này thì được tần số trung tâm của cảm biến SAW tại độ ẩm 80% là 127.435 MHz (hình 11)

Hình 12 chỉ ra rằng khi độ ẩm tăng thì tần số trung tâm giảm, cụ thể độ ẩm tăng 10% đến 100% thì tần số trung tâm của SAW giảm từ 127.458 MHz xuống còn 127.431 MHz, độ nhạy trung bình là S = 0.298 kHz/%.



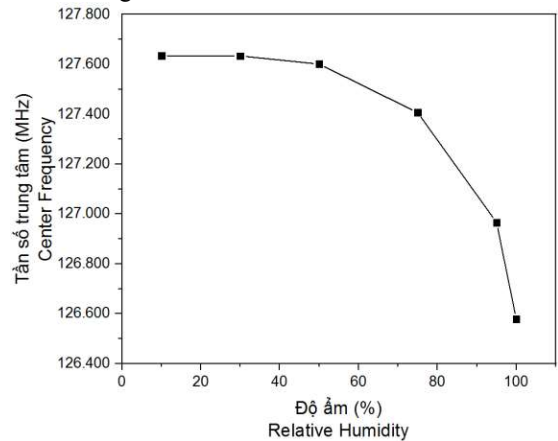
Hình 12. Tần số trung tâm cảm biến SAW giảm khi độ ẩm tăng

4.3. Kết quả thực nghiệm khảo sát độ ẩm



Hình 13. Tần số trung tâm khi đo thực nghiệm SAW tại độ ẩm 80%

Hình 13 là kết quả chụp màn hình trên máy phân tích phổ Analyzer, chỉ ra rằng tần số trung tâm của cảm biến SAW tại độ ẩm 80% có giá trị là 127.235 MHz.



Hình 14. Sự phụ thuộc tần số trung tâm vào độ ẩm

Hình 14 chỉ ra rằng khi độ ẩm tăng từ 10% đến 100% thì tần số trung tâm của cảm biến SAW giảm từ 127.634 MHz xuống 126.578 MHz, trong đó độ ẩm đoạn từ 10% đến 50% tần số trung tâm thay đổi không đáng kể, đoạn từ 50% trở đi thì độ ẩm tăng, tần số trung tâm giảm rất mạnh. Rõ ràng điều này hoàn toàn tương đồng với kết quả mô phỏng hình 12. Theo [22][23] thì quan hệ giữa độ ẩm và độ dịch tần của tần số trung tâm được biểu diễn theo công thức:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \times h \times K \tag{5}$$

Trong đó K là hằng số cố định, h là độ dày lớp nhạy tương đương (ở trên), f<sub>0</sub> là tần số trung tâm ban đầu, Δf là độ dịch tần số, ρ<sub>0</sub> là khối lượng riêng ban đầu vật liệu lớp nhạy (chính là ρ<sub>b</sub> lúc độ ẩm bằng 0), Δρ là độ biến thiên khối lượng riêng của vật liệu lớp nhạy. Theo công thức (3)(4) và bảng 3, khi độ ẩm tăng thì khối lượng riêng ρ<sub>b</sub> trung bình tương đương của lớp graphene-nước giảm nhưng độ dày h tăng. Mặt khác theo (5), tần số trung tâm phụ thuộc cả khối lượng riêng và độ dày lớp nhạy, hoàn toàn phù hợp với kết quả của cả quá trình mô phỏng và thực nghiệm trên.

Tuy nhiên có một vài điểm lưu ý: Một là, khi độ ẩm dưới 50% thì ảnh hưởng đến tần số trung tâm của cảm biến SAW có phủ graphene là hầu như không đáng kể. Khi độ ẩm trên 50% thì ảnh hưởng rất mạnh, khuyến cáo các nghiên cứu sau cần quan tâm đến vấn đề này. Hai là, giữa mô phỏng và thực nghiệm có tương đồng về hình dáng xu thế; nhưng vẫn có khoảng cách

nhất định độ dịch tần số của thực nghiệm lớn hơn rất nhiều so với mô phỏng. Lý do của sự sai khác nhau là việc mô phỏng là 2D (do điều kiện máy tính), trong thực tế có thêm thông số của kích thước chiều rộng cảm biến; các thông dùng để mô phỏng FEM trong bảng 2 là lý tưởng, chưa sát với bộ số liệu của vật liệu thương phẩm.

## 5. Kết luận

Trong nghiên cứu này đã mô phỏng được tần số trung tâm của cảm biến SAW cấu trúc đa lớp Si/AlN/Graphene thay đổi theo độ ẩm từ 10% đến 100% giảm từ 127.458 MHz xuống còn 127.431 MHz. Đã chế tạo được cảm biến SAW với cấu trúc trên và khảo sát thực nghiệm ảnh hưởng của độ ẩm từ 10% đến 100% thì tần số trung tâm giảm từ 127.634MHz xuống 126.578 MHz. Kết quả này đóng góp đáng kể cho các nhóm nghiên cứu khác khi khảo sát ảnh hưởng của không khí môi trường thì có thể tham chiếu loại trừ yếu tố ảnh hưởng của độ ẩm. Tuy nhiên còn một số hạn chế như biên dạng của mô phỏng FEM 2D chưa sát với kết quả thực tế, chưa đánh giá được ảnh hưởng của nhiệt độ - là một tác nhân gây nhiễu rất lớn, đối với cảm biến SAW cấu trúc đa lớp có để áp điện là màng AlN/Si. Vì vậy trong nghiên cứu tiếp, chúng tôi sẽ định hướng mô phỏng FEM dạng 3D cho cấu trúc SAW đa lớp và khảo sát thêm ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ.

## Acknowledgement

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia Việt Nam (NAFOSTED) theo tài trợ số 103.02-2018.33

## Tài liệu tham khảo

- [1] R. M. White and F. W. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 7, no. 12, pp. 314–316, 1965, doi: 10.1063/1.1754276.
- [2] B. Liu *et al.*, "Surface acoustic wave devices for sensor applications," *J. Semicond.*, vol. 37, no. 2, 2016, doi: 10.1088/1674-4926/37/2/021001.
- [3] A. Nag, A. Mitra, and S. C. Mukhopadhyay, "Graphene and its sensor-based applications: A review," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 270, pp. 177–194, 2018, doi: 10.1016/j.sna.2017.12.028.
- [4] S. Thomas *et al.*, "Graphene-coated Rayleigh SAW Resonators for NO<sub>2</sub> Detection," *Procedia Eng.*, vol. 87, no. 2, pp. 999–1002, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.328.
- [5] K. S. Pasupuleti *et al.*, "Boosting of NO<sub>2</sub> gas sensing performances using GO-PEDOT:PSS nanocomposite chemical interface coated on langasite-based surface acoustic wave sensor," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 344, no. 2, p. 130267, 2021, doi: 10.1016/j.snb.2021.130267.
- [6] R. Arsat *et al.*, "Graphene-like nano-sheets for surface acoustic wave gas sensor applications," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 467, no. 4–6, pp. 344–347, 2009, doi: 10.1016/j.cplett.2008.11.039.
- [7] X. Sun *et al.*, "Enhanced sensitivity of SAW based ammonia sensor employing GO-SnO<sub>2</sub> nanocomposites," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 375, no. October 2022, p. 132884, 2023, doi: 10.1016/j.snb.2022.132884.
- [8] J. Yang, W. Gao, T. Wang, C. Zhu, P. Dong, and X. Wu, "A novel coupling-activated GO nanocomposites based on surface acoustic wave for assessing capture molecules and detection of explosive gases," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 372, no. May, p. 132665, 2022, doi: 10.1016/j.snb.2022.132665.
- [9] Y. J. Guo, J. Zhang, C. Zhao, P. A. Hu, X. T. Zu, and Y. Q. Fu, "Graphene/LiNbO<sub>3</sub> surface acoustic wave device based relative humidity sensor," *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 19, pp. 5800–5802, 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.06.090.
- [10] X. Li, Q. Tan, L. Qin, L. Zhang, X. Liang, and X. Yan, "Sensors and Actuators : A . Physical A high-sensitivity MoS<sub>2</sub> / graphene oxide nanocomposite humidity sensor based on surface acoustic wave," *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 341, no. March, p. 113573, 2022, doi: 10.1016/j.sna.2022.113573.
- [11] Y. Su *et al.*, "Surface acoustic wave humidity sensor based on three-dimensional architecture graphene/PVA/SiO<sub>2</sub> and its application for respiration monitoring," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 308, no. December 2019, p. 127693, 2020, doi: 10.1016/j.snb.2020.127693.
- [12] N. H. Ha, N. H. Nam, D. D. Dung, N. H. Phuong, P. D. Thach, and H. S. Hong, "Hydrogen Gas Sensing Using Palladium-Graphene Nanocomposite Material Based on Surface Acoustic Wave," *J. Nanomater.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/9057250.
- [13] S. H. Hoàng *et al.*, "Cảm biến hoá học hoạt động trên cơ sở sóng âm bề mặt và ứng dụng đo độ ẩm Chemical sensors based on surface acoustic wave and its application for humidity measurement Abstract : VCCA-2011 VCCA-2011," pp. 582–586, 2011.
- [14] J. Devkota, P. R. Ohodnicki, and D. W. Greve, "SAW sensors for chemical vapors and gases," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 4, pp. 13–15, 2017, doi: 10.3390/s17040801.
- [15] A.D'AmicoE.Verona, "SAW sensors," *Sensors Actuators A. Phys.*, vol. 30, no. 17, pp. 55–66, 1989, doi: 10.1016/0250-6874(89)80064-2.
- [16] J. Kirschner, "Surface Acoustic Wave Sensors (SAWS)," *Micromechanical Syst.*, pp. 1–11, 2010.
- [17] A. B. Randles, J. M. Tsai, P. Kropelnicki, and H. Cai, "Temperature Compensated AlN Based SAW," *J. Autom. Control Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 191–194, 2014, doi: 10.12720/joace.2.2.191-194.
- [18] Q. Cao *et al.*, "A review of current development of graphene mechanics," *Crystals*, vol. 8, no. 9, 2018, doi: 10.3390/cryst8090357.
- [19] Y. J. Guo, J. Zhang, C. Zhao, P. A. Hu, X. T. Zu, and Y. Q. Fu, "Graphene/LiNbO<sub>3</sub> surface acoustic wave device based relative humidity sensor," *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 19, pp. 5800–5802, 2014, doi: 10.1016/j.ijleo.2014.06.090.
- [20] X.-D. Lan, S.-Y. Zhang, L. Fan, and Y. Wang, "Simulation of SAW Humidity Sensors Based on ( 112<sup>-</sup>0 ) ZnO/R-Sapphire Structures," *Sensors*, vol. 16, no. 11, p. 1112, 2016, doi: 10.3390/s16111112.
- [21] X. D. Lan, S. Y. Zhang, Y. Wang, L. Fan, and X. J. Shui, "Humidity responses of Love wave sensors based on (112<sup>-</sup>0) ZnO/R-sapphire bilayer structures," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 230, pp. 136–141, 2015, doi: 10.1016/j.sna.2015.04.014.
- [22] C. Caliendo, E. Verona, and V. I. Anisimkin, "Surface acoustic wave humidity sensors: A comparison between different types of sensitive membrane," *Smart Mater. Struct.*, vol. 6, no. 6, pp. 707–715, 1997, doi: 10.1088/0964-1726/6/6/007.
- [23] T. M. Ha and N. T. Truyen, "Research on effect of humidity on frequency response of SAW filter using ZnO / AlN / Si structure," pp. 422–426, 2016.