



Universitatea Națională de  
Știință și Tehnologie  
POLITEHNICA București



Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații  
și Tehnologia Informației

Decizie nr. 28 din 26.03.2024

# TEZĂ DE DOCTORAT REZUMAT

Ing. George BOLDEIU

---

**Dispozitive SAW realizate pe semiconductori  
de tip III – Nitruri pentru aplicații în senzori și în  
cuplarea undelor acustice cu undele de spin**

---

## COMISIA DE DOCTORAT

<b>Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU</b> Univ. Politehnica din București	Președinte
<b>CSI. Dr. Alexandru MÜLLER</b> Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
<b>Prof. Dr. Ing. Liviu GORAS</b> Univ. Tehnica „Gheorge Asachi” Iasi	Referent
<b>CSI. Dr. Adrian DINESCU</b> INCD pt Microtehnologie București	Referent
<b>Prof. Dr. Ing. Gheorge BREZEANU</b> Univ. Politehnica din București	Referent

**BUCUREȘTI 2024**

# Cuprins

<b>Obiectivele si sumarul tezei.....</b>	<b>2</b>
<b>1 Dispozitive cu unde acustice de suprafata (SAW).....</b>	<b>3</b>
<b>2 Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe AlN/Si si AlN/sticla....</b>	<b>4</b>
2.1 Situatiia actuala .....	4
2.2 Masurarea si caracterizarea senzorilor SAW de temperatura .....	5
2.3 Senzori de temperatura AlN/Si.....	5
2.4 Senzori de temperatura pe AlN/Borosilicat .....	9
<b>3 Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe GaN/SiC si GaN/safir.....</b>	<b>11</b>
3.1 Senzori de temperatura pe GaN/SiC.....	11
3.2 Senzori de temperatura pe GaN/safir.....	13
<b>4 Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe ScAlN/Si.....</b>	<b>15</b>
<b>5 Analiza experimentală a senzorilor magnetici si a cuplajului undelor acustice de suprafata cu undele de spin utilizand dispozitive SAW realizate pe compusi de tip III – nitruri.....</b>	<b>17</b>
5.1 Generalitati.....	17
5.2 Senzorul magnetic de tip SAW pe ScAlN/Si.....	18
5.3 Interactiunea undelor acustice de suprafata cu undele de spin realizata prin intermediul unei structuri de tip SAW pe $Sc_{0.3}Al_{0.7}N/Si$ avand un strat magnetostriktiv de nichel intre IDT-uri.....	20
<b>6 Contributii la progresul domeniului, lucrarile publicate, contributii originale, participarea personala la lucrarile publicate in cadrul colectivului de autori.....</b>	<b>26</b>
<b>7 Concluzii si perspective.....</b>	<b>28</b>

## Obiectivele si sumarul tezei

Dupa aparitia traductorului interdigitat in 1965, dispozitivele cu unde acustice de suprafata (SAW) si-au gasit o larga utilizare in aplicatiile implicand frecventele inalte, cum ar fi: dispozitive pentru compresia pulsurilor radar, oscilatoare, filtre pentru televiziune, aplicatii radio speciale, si mai recent comunicatii prin satelit si telefonie mobila. Filtrele de tip SAW si FBAR (film bulk acoustic resonators) se folosesc in telefoanele mobile datorita dimensiunilor reduse, stabilitatii si fiabilitatii. Pentru fabricarea acestora se folosesc materiale piezoelectrice nonsemiconductoare (cuart, niobat de litiu, tantalat de litiu etc.) si sunt folosite pe scara industriala, in special, datorita proprietatilor piezoelectrice foarte bune. De asemenea dispozitivele SAW fabricate pe aceste materiale sunt folosite si pentru senzori de temperatura senzori de gaze, presiune si umiditate datorita sensibilitatii si fiabilitatii mari. Pe aceleasi materiale au fost realizate si primele structuri de tip SAW utilizate in demonstrarea cuplajului intre undele acustice de suprafata si undele de spin. Calitatea suprafetei face extrem de dificila utilizarea tehnicilor nanolitografice avansate in fabricatia dispozitivelor, pe aceste materiale. Din aceasta cauza dispozitivele de tip SAW realizate pe aceste materiale au frecventa de rezonanta limitata la valori de ordinul 2 – 2,5 GHz. Sistemele de comunicatii moderne (5G, 6G, etc.), implica frecvente de rezonanta mai mari ale dispozitivelor SAW. O frecventa de rezonanta mai mare este benefica , si pentru senzorii de tip SAW pentru diversi parametri fizici, deoarece sensibilitatea creste odata cu frecventa de rezonanta, fiind proportionala cu patratul acesteia pentru senzorii de masa, umiditate si gaze si proportionala cu frecventa de rezonanta pentru senzorii de temperatura si presiune. Si in aplicatiile legate de cuplajul undelor acustice de suprafata cu undele de spin o frecventa de rezonanta mai mare ( in domeniul 4-10 GHz) a dispozitivului SAW este benefica deoarece se poate folosi frecventa de rezonanta fundamentala a SAW -ului ( si nu armonici superioare ) pentru cuplajul cu undele de spin.

Limitarile in ceea ce priveste frecventa de rezonanta a dispozitivelor SAW realizate pe aceste materiale clasice, au dus in ultimii ani, la dezvoltarea tehnologiilor de realizare a SAW-urilor pe straturi subtiri semiconductoare de banda interzisa larga de tip III-nitruri (GaN, AlN, ScAlN) depuse sau crescute pe substraturi semiconductoare (siliciu, carbura de siliciu, diamant) sau dielectrice (safir).

Topica acestei teze va tinti, pe de o parte, dezvoltarea tehnologiei dispozitivelor SAW pe materiale constituite din straturi subtiri semiconductoare de tip III-nitruri,(GaN, AlN, ScAlN) depuse /sau crescute pe semiconductori clasici de volum precum (SiC, Si) si dielectrici (safir); pe de alta parte se va urmari proiectarea/simularea, fabricarea si caracterizarea acestor dispozitive SAW realizate pe aceste noi materiale, pentru utilizarea lor ca senzori de temperatura ,si senzori magnetici . De asemenea, se va analiza cuplarea undelor acustice de suprafata ,a cu undele de spin utilizand o structura SAW pe ScAlN/Si, rezultatele obtinute fiind spectaculoase. O atentie speciala s-a

acordat tehnicilor de simulare, domeniu in care autorul acestei lucrari a avut o activitate importanta si inainte de inceperea studiilor doctorale.

Lurarea este structurata in 7 capitole, capitolele 2-5 fiind esentialmente conectate la rezultatele noi, originale si publicate de mine in calitate de autor/coautor legate de aceasta teza.

Primul capitol, cel introductiv, este axat pe un sumar legat de unde elastice, proprietatile materialelor piezoelectrice, moduri de propagare si simularea dispozitivelor SAW. Capitolele 2, 3 si 4 sunt dedicate simularii si caracterizarii senzorilor de temperatura noi bazati pe dispozitive SAW realizati pe diverse materiale de tip III – nitruri. Capitolul 5 cuprinde rezultatele originale legate de un sensor magnetic si realizarea pentru prima data a cuplajului undelor acustice de suprafata cu undele de spin utilizand o structura de SAW pe  $Sc_{0,3}Al_{0,7}N/Si$  avand un strat magnetostrictiv de nichel centrat in spatial dintre IDT-uri. In capitolul 6 sunt prezentate o sinteza a rezultatelor originale, a publicatiilor si a contributiilor mele la publicatii. Ultimul capitol, 7, Concluzii, prezinta concluziile si planurile de viitor.

## Capitolul 1

### Dispozitive cu unde acustice de suprafata (SAW)

**Scurt istoric.** Efectului piezoelectric a fost descoperit de catre fratii Curie in anul 1880 iar in anul 1885, Lord Rayleigh a aratat ca undele acustice se pot propaga la suprafata si au o viteza mai mica ca a undelor transversale de volum. Descoperirea, din anul 1965 a lui White si Voltmer, a traductorului interdigitat deus pe un material piezoelectric a fost o piatra de hotar pentru dispozitivele acustice de suprafata[1].

**Undele elastice.** Principalele caracteristici ale undelor acustice sunt: frecventa si amplitudinea, viteza de faza si de grup, lungimea de unda, deplasarea si stresul de-a lungul frontului de unda, tipul undei: transversal (perpendicular cu directia de propagare) sau longitudinal (paralel cu directia de propagare) [1][2].

**Efectul piezoelectric - ecuatii constitutive.** Un corp solid devine polarizat electric sub actiunea unei forte mecanice (efectul direct) si poate fi deformat mecanic sub actiunea unui camp electric [3].

**Proprietatiile generale ale compusilor de tipul III - Nitruri.** Semiconductoarele compusilor de tipul III - nitruri sunt materiale folosite in optoelectronica si in electronica de putere [4]. **Nitrura de Aluminiu AlN** este un material preferat pentru aplicatiile de microunde datorita proprietatilor piezoelectrice[5]. **Nitrura de Galiu - GaN** este unul din cele mai studiate materiale din grupa nitrurilor. **Nitrura de Aluminiu dopata cu Scadiu - ScAlN.**

Daca nitrura de aluminiu se dopeaza cu scandiu (Sc), noul material (ScAlN) devine un material mai bun piezoelectric pentru microelectronica, dispozitive SAW, senzori, etc. [6].

**Simularea dispozitivelor de tip SAW - Cuplarea Modurilor.** O metoda de simulare a acestor tipuri de structuri se numeste Cuplarea Modurilor (COM), este utilizata in optica si studiaza comportamentul pe o structura periodica. Metoda se bazeaza de obicei pe trei simulari piezoelectrice: simularea de scurt circuit, simularea de mers in gol si simularea in frecventa [7].

## Capitolul 2

### Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe AlN/Si si AlN/sticla

#### 2.1 Situatia actuala

Doua din cele mai importante avantaje ale folosirii senzorilor SAW constau in compatibilitatea lor cu transmiterea fara fir a datelor ("wireless") si posibilitatea de a opera fara conectarea la o sursa de tensiune, avantaje ce sunt esentiale in cazul utilizarii lor in medii ostile[8][9][10].

Compatibilitate senzorilor SAW de temperatura pe III - nitruri cu procesele tehnologice permite plasarea lor langa dispozitivele ce trebuiesc monitorizate ("hot spot"), precum si miniaturizarea lor. Cresterea frecventei de rezonanta are ca prim efect cresterea sensibilitatii senzorului si posibilitatea determinarii mai precise a temperaturii. Aceasta este si ratiunea pentru care este utila dezvoltarea senzorilor SAW pe compusi III - nitruri. Dezvoltarea senzorilor de temperatura de tip SAW, pe AlN/Si, AlN/sticla, GaN/SiC, GaN/safir constituie unul din obiectivele tezei. Utilizarea unui IDT cu latimea digitului/interdigitului de ordinul 100...200 nm duce la marirea sensibilitatii [11]. Primul senzor de temperatura de tip SAW cu un singur port a fost realizat in anul 1990 [12] si se bazeaza pe schimbarea frecventei de rezonanta cu temperatura. In 2003 Palacios analizeaza avantajele senzorilor pe AlN si GaN precum si stabilitatea acestor materiale in functie de temperature [13].

Palacios este primul care introduce aceste doua materiale in constructia de senzori SAW si face primele determinari experimentale al coeficientului de temperatura al frecventei pentru GaN si AlN. In 2010 Ye prezinta senzori de temperatura pe materialele clasice piezoelectrice [14]. In anul 2011 Binder prezinta un senzor de temperatura si un sistem integrat de transmiterea datelor "wireless" [15]. in anul 2014, Müller si colectivul din care fac parte acum, dezvoltă un senzor de

temperatura cu un substrat de GaN/Si; frecventa de rezonanta peste 5 GHz [16][17]. Colegii mei continua activitatea in domeniu, in anul urmator, unde studiaza modul de propagare Sezawa pentru un senzor de temperatura [18]. Prima lucrare cu un senzor de temperatura AlN/6HSiC a fost publicata in 2017 de catre Wang [19] cu frecventa de rezonanta de aproximativ 550 MHz. Anul urmator colectivul din care fac parte realizeaza un senzor de temperatura de AlN/6H-SiC cu frecventa de operare intre 3,2 si 5,5 GHz [20]. In 2020 am realizat si publicat senzori de temperatura de tip SAW pe AlN/Si si AlN/sticla. Masuratorile au fost facute intr-un interval de temperatura de 6K si 423K [21] (revista Q2). Sensibilitatile rezultate au fost mari. Prin utilizarea metodei COM modificata, concordanta simularilor cu experimentul a dus la erori de sub 1% pe un interval larg de temperaturi. In 2022 o noua lucrare, la care, de aceasta data, am fost prim autor prezinta un senzor de temperatura pana la 773 K folosind GaN/SiC si GaN/safir [22] (Q2). In anul 2024 am publicat realizarea unui senzor de temperatura pe ScAlN/Si [23].

## 2.2 Masurarea si caracterizarea senzorilor SAW de temperatura

Masurarea parametrilor S ale SAW-urilor se face cu un Vector Network Analyzer (VNA MS46122A) produs de catre Anritsu asociat cu un sistem de masura "on wafer" realizat de KarlSüss.



*Figura 2.1: Sistem de masurare a senzorilor de temperatura utilizat in laborator*

## 2.3 Senzorii de temperatura de tip SAW pe AlN/Si

Rezultatele originale ale cercetarilor prezentate in acest subcapitol si cel urmator au fost publicate in [21] revista IEEE (Ultrasonics.Q2), articol la care sunt coautor.

AlN este un material semiconductor de banda interzisa larga. Banda interzisa este de 6 eV la temperatura camerei. Siliciul (111) de inalta rezistivitate are o banda interzisa de 1,12 eV. Conductivitatea termica este de 149 W/mK, fiind potrivit pentru aplicatii in care este folosit ca substrat pentru AlN. Borosilicatul sau sticla este un

material izolator cu constanta dielectrica electrica de 4,6. Am realizat, simulat si caracterizat, senzori de temperatura pe AlN/Si si AlN/sticla.

In studiul experimental, comparat cu rezultatul simularilor, s-a inceput cu analiza influentei metalizarii (material si grosime) asupra vitezei de faza a undelor Rayleigh in AlN. S-au folosit doua metale extrem de utilizate in metalizarile dispozitivelor semiconductoare, Au si Al cu grosimile metalizarilor variind in domeniul 25 – 200 nm.

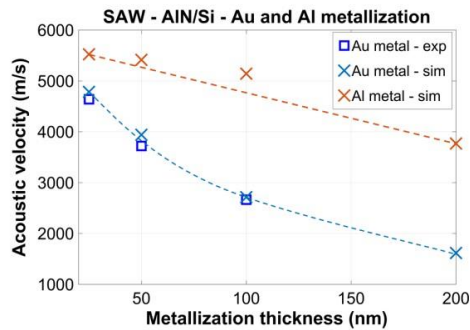


Figura 2.2: Viteza acustica in functie de grosimea de metalizare [21] (@2020 IEEE)

In figura 2.2 sunt reprezentate valorile vitezelor acustice calculate din determinarile experimentale si din simulari pentru structura cu  $w = 170$  nm cu diferitele grosimi ale metalizarii [21]. Dupa cum se poate observa, vitezele au un trend descrescator pe masura ce metalizarea este mai groasa rezultat util in proiectarea senzorilor. Se constata un comportament total diferit fata de GaN/Si, in cazul metalizarii cu Aur.

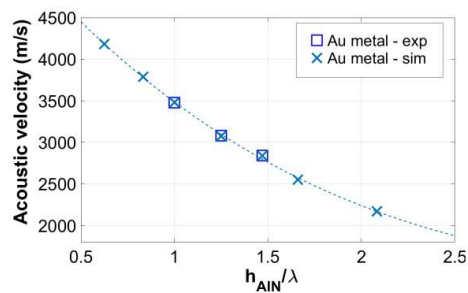


Figura 2.3: Variatia vitezei acustice in functie de lungimea de unda [21] (@2020 IEEE)

In figura 2.3 sunt prezentate valorile experimentale si cele simulate in functie de raportul  $h_{AlN}/\lambda$  cu metalizarea constanta. Se observa ca atat in simulare cat si in experiment valoarea vitezei de faza a undelor descreste odata cu descrestea lungimii de unda[21]. Si aici se observa o foarte buna concordanta intre simulare si

experiment, mentionand metoda cu multe elemente originale pe care am dezvoltat-o, descrisa in lucrare.

In continuare s-a investigat comportamentul acestor dispozitive de tip SAW in sensul analizei variatiei frecventei de rezonanta in functie de temperatura. Pentru inceput, se prezinta coeficientii de reflexie  $S_{11}$  (Figura 2.4) pentru structurile cu latimea digitului IDT-ului de 170,200 si 250 nm la temperatura camerei (subcapitolul 2.2) [21]. La temperatura camerei frecventele de rezonanta sunt: 3,48 GHz pentru  $w = 250$  nm, 3,85 GHz pentru  $w = 200$  nm si 4,18 GHz pentru  $w = 170$  nm [21]. Se poate observa ca cea mai mica frecventa de rezonanta este in cazul structurii cu  $w = 250$  nm, creste pentru cazul  $w = 200$  nm si ajunge la valoarea maxima in cazul nostru pentru structura cu valoarea latimii IDT-ului  $w = 170$  nm [21].

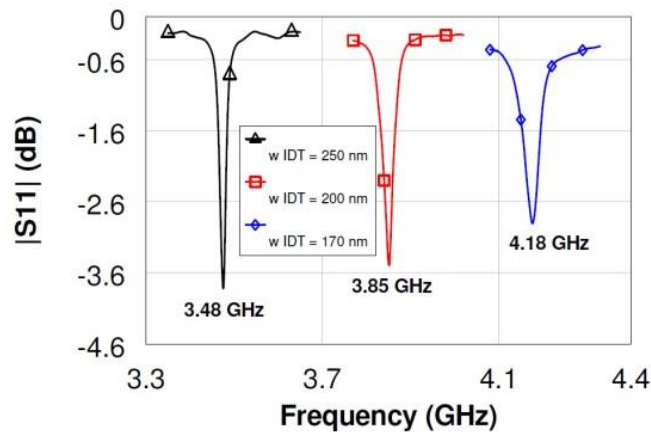


Figura 2.4: Parametrii  $S$  pentru cele trei structuri analizate [21] (@2020 IEEE)

In figura 2.5 a) este reprezentata variatia frecventei de rezonanta in functie de temperatura pe intervalul  $-268^{\circ}\text{C} \div +150^{\circ}\text{C}$ . Se observa ca sensibilitatea este mai mare in intervalul pozitiv de temperatura [21].

Pentru temperaturi sub  $-258^{\circ}\text{C}$  (15 K), frecventa de rezonanta descreste odata cu scaderea temperaturii si semnul TCF-ului se schimba [21]. Acest lucru a fost observat pe GaN/Si de catre grupul nostru [11].

Din comportamentul linear al celor trei structuri la temperaturi in domeniul  $0^{\circ} \div +150^{\circ}\text{C}$  (figura 2.5 b), din datele experimentale, se calculeaza sensibilitatea si TCF-ul. Sensibilitatea structurilor de AlN/Si prezinta valori ridicate pentru structura cu lungime de unda mica ( $w = 170$  nm), de  $490$  kHz/ $^{\circ}\text{C}$ . Pentru  $w = 200$  nm avem o valoare a sensibilitatii de  $443$  kHz/ $^{\circ}\text{C}$



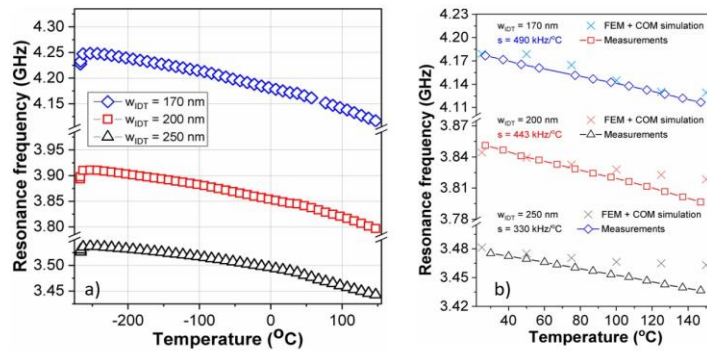


Figura 2.5: Variatia frecventei de rezonanta cu temperatura a) pe intervalul  $-268^{\circ} \div 150^{\circ}C$  b) comparatie experiment vs simulare pe intervalul  $0^{\circ} \div 150^{\circ}C$  [21] (@2020 IEEE)

iar si ultima structura are  $330\text{kHz}/^{\circ}C$ . Acelasi trend se pastreaza si pentru valorile TCF-ului care au valorile de: 117, 114 si  $95 \text{ ppm}/^{\circ}C$ .

Se observa o buna concordanta dintre datele experimentale si cele simulate cu procedura FEM+COM. Simularile au oferit rezultate comparabile cu cele ale masuratorilor. in figura 2.5 b) sunt prezentate comparativ rezultatele simularilor cu cele experimentale ale frecventei de rezonanta in functie de temperatura. Frecventele de rezonanta obtinute din simulare sunt foarte apropiate de cele experimentale. Erorile depind de latimea IDT-ului: pentru 250 nm avem erori cuprinse intre 0,12% si 0,77%, pentru 200 nm erorile sunt cuprinse intre 0,04 si 0,57%, iar pentru ultima structura,  $w = 170 \text{ nm}$  intre 0,05 si 0,3% [21].

## 2.4 Senzorii de temperatura de tip SAW pe AlN/Borosilicat

Pe o placheta de Borosilicat (sticla) furnizata de catre University Wafer Inc. s-a fabricat urmatoarea serie de dispozitive SAW. Grosimea stratului de AlN este de  $1 \mu\text{m}$ , grosimea IDT-urilor este de  $5/95 \text{ nm}$  avand Ti/Au. Ca si in cazul AlN/Si s-au fabricat trei tipuri de structuri cu latimea de 170 nm, 200 nm si 250 nm avand lungimea de  $50 \mu\text{m}$ . in figura 2.6 avem masuratorile pentru parametrii  $S_{11}$  pentru cele trei structuri la temperatura camerei. Se observa ca frecventa de rezonanta creste odata cu descresterea latimii, a.i. structura cu latimea de 170 nm are cea mai mare frecventa.

In figura 2.7 sunt reprezentate valorile variatiei frecventei in functie de temperatura pentru toate cele trei structuri. Cain cazurile precedente se observa ca frecventa de rezonanta scade odata cu cresterea temperaturii[21].Sau calculat sensibilitatea si TCF-ul. S-a confirmat inca odata ca structurile mai compacte au sensibilitati si TCF-uri mai mari.

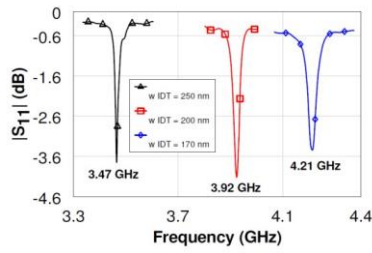


Figura 2.6: Parametrii  $S_{11}$  la temperatura camerei [21](@2020 IEEE)

In figura 2.8 sunt prezentate frecventele de rezonanta, masuratori vs simulari, in functie de temperatura ( $\theta \in 0^\circ \div +150^\circ \text{ C}$ ) pentru toate cele trei structuri. Se poate observa excelenta concordanta dintre valorile experimentale si cele rezultate din simulari prin utilizarea metodei COM modificate de mine, pe o gama extrem de larga de temperaturi.

Se poate observa comportamentul linear al frecventei de rezonanta pentru toate cele trei structuri si pe tot intervalul de temperaturi ( $\theta \in 0^\circ \div +150^\circ \text{ C}$ )

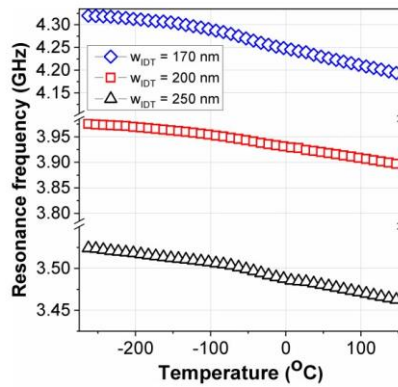


Figura 2.7: Variatia frecventelor de rezonanta in functie de temperatura [21](@2020 IEEE)

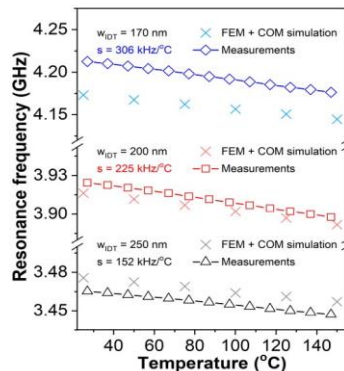


Figura 2.8: Variatia frecventei de rezonanta cu temperatura (in domeniul  $0^\circ \div 150^\circ \text{ C}$ ) pentru cele trei structuri realizate pe AlN/sticla [21](@2020 IEEE)

## Capitolul 3

### Sezori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe GaN/SiC si GaN/safir

Carbura de Siliciu este un semiconductor, pe cand safirul este un izolator, cu banda interzisa larga care permite utilizarea lor ca substrat pentru realizarea de senzori de temperatura pe GaN capabili de a opera la temperaturi pana la  $500^{\circ}\text{C}$  si chiar mai mult. Concentratia intrinseca a Siliciului ( $1,45 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$  la temperatura camerei) face imposibila utlizarea senzorilor de temperatura de GaN/Si la temperaturi de peste  $200 \dots 250^{\circ}\text{C}$  datorita faptului ca Siliciul devine intrinsic conductor, chiar daca GaN este material cu banda interzisa larga.

#### 3.1 Senzori de temperatura de tip SAW pe GaN/SiC

Rezultatele originale din acest capitol au fost publicate in revsita IEEE Access [22] (Q2) intr-un articol in care sunt prim autor.

Senzorii GaN/SiC s-au fabricat pe plachete cumparate de la NTT-AT Japonia. Placheta de SiC are urmatorii parametrii geometrici: o grosime de  $375 \mu\text{m}$ , stratul GaN (piezoelectric) are o grosimea de  $0,7 \mu\text{m}$  ce contine si un strat de  $0,2 \mu\text{m}$  de acomodare ("buffer") a retelei cristaline de la SiC la GaN [22] S-a ales latimea digitului (si a distantei digit/interdigit) din cadrul IDT-ului de  $400 \text{nm}$ , lungimea digitilor a fost de  $50 \mu\text{m}$ ; grosimea stratului de metal a fost de  $80 \text{nm}$  ( $5/75 \text{nm Ti/Au}$ ) [22]. intregul IDT este format din  $75$  de perechi de digiti, adica  $150$  de digiti. Structura IDT-ului a avut  $50$  de reflectoare situate in stanga si dreapta IDT-ului [22].

In figura 3.1 se vede raspunsul in frecventa pentru structura GaN/SiC pe un interval de temperatura cuprins intre temperatura camerei si  $-266^{\circ}\text{C}$ . Se observa ca frecventa de rezonanta creste odata cu scaderea temperaturii [22].

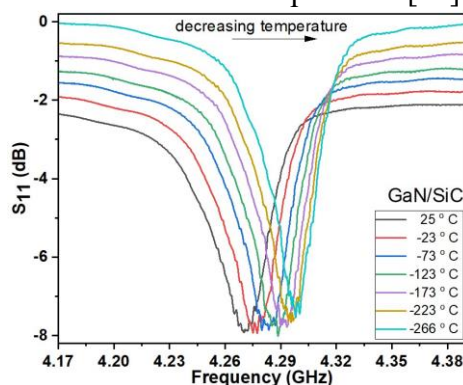


Figura 3.1: Parametrii S la diferite temperaturi pentru structura realizata pe GaN/SiC [22] (@2022 IEEE)

## Masuratori la temperatura inalta

Masuratorile la temperaturi inalte au fost facute la NASA Glenn Research Centre.

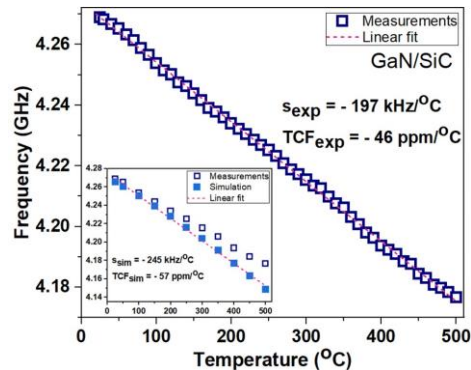


Figura 3.2: Variatia frecventei in functie de temperatura pentru structura GaN/SiC; comparatie simulare vs experiment in inset [22] (@2022 IEEE)

Se observa un comportament liniar pe intervalul de temperaturi pozitive (figura 3.2). Acelasi comportament a reiesit si din simulari, rezultatele comparative experiment simulare sunt prezentate in casuta din figura 3.2. Eroarea relativa dintre experiment si simulare este de 0,65% la temperatura camerei si o eroare de 3,5% la 500°C.

### 3.2 Senzori de temperatura pe GaN/safir

A fost fabricat si analizat (experimental si simulare) un nou senzor de temperatura de tip SAW ce a fost fabricat pe un strat de GaN deasupra safirului (GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Din punct de vedere al stabilitatii termice, safirul este un material ce permite lucrul la temperaturi inalte. Placheta de GaN/safir a fost cumparata de la NTT-AT Japonia. Procesul de fabricare este similar cu cel descris in subcapitolele precedente.

Parametrii geometrici ai plachetei sunt: grosimea stratului de GaN este de 1  $\mu\text{m}$  si grosimea plachetei de safir este de  $525 \pm 25 \mu\text{m}$  in ceea ce priveste geometria senzorului avem: grosimea metalizarii, Ti/Au, este de 5/75 nm, latimea IDT-ului de 500 nm ( $\lambda = 2 \mu\text{m}$ ) si o lungime de 50  $\mu\text{m}$ .

Masuratorile in temperatura s-au facut in intervalul  $-266^\circ\text{C} \div 25^\circ\text{C}$  [22].

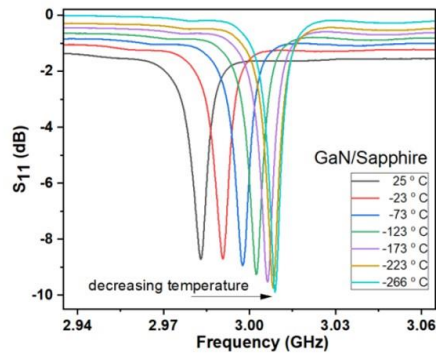


Figura 3.3: Parametrii  $S_{11}$  functie de frecventa pentru dispozitivul pe GaN/safir [22](@2022 IEEE)

In figura 3.3 sunt prezentate valorile experimentale ale parametrilor  $S_{11}$  in functie de frecventa la diferite temperaturi. Se observa si in acest caz ca valoarea frecventei de rezonanta scade odata cu cresterea temperaturii [22].

Experimentele pentru temperaturi inalte au fost facute tot la NASA Glenn Research Center.

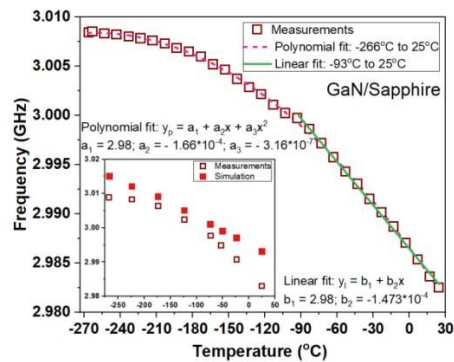


Figura 3.4: Variatia frecventei de rezonanta pe intervalul negativ de temperatura pentru senzorul pe GaN/safir [22](@2022 IEEE)

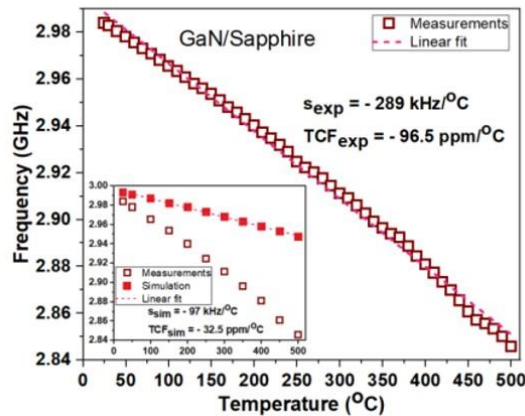


Figura 3.5: Variatia frecventei de rezonanta pe intervalul pozitiv de temperatura: in casuta sunt prezentate comparativ frecventele din simulare si experimente [22](@2022 IEEE)

Figura 3.5 prezinta valorile frecvetnelor de rezonanta in functie de temperatura iar inset avem compatia dintre masuratori si simulari.

Din masuratorile de parametri S s-au calculat valorile factorului de calitate  $Q$  si cuplajului electromecanic  $k_{eff}^2$  pentru intervalul de temperatura  $-266^\circ\text{C}\div 500^\circ\text{C}$ . La temperatura camerei s-au obtinut valorile de 182 si 2,8% pentru  $Q$  si respectiv  $k_{eff}^2$  pentru dispozivele cu GaN/SiC. Pentru GaN/safir factorul de calitate este mai mare si are o valoare de 757 pe cand valoarea lui  $k_{eff}^2$  este de 0,62% [22]. Un lucru interesant a fost observat ,si anume ca dispozitivul GaN/safir are o valoarea a TCF-ului ( $-96,5\text{ppm/}^\circ\text{C}$ ) mai mare comparativ cu valoarea dispozitivului GaN/SiC ( $-46\text{ppm/}^\circ\text{C}$ ) chiar daca frecvent,a de rezonant,a este mai mica.

## Capitolul 4

### Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N/Si}$

Rezultatele originale au fost publicate in proceedings-ul prestigioasei conferinte Transducers 2023 si intr-un articol publicat in IEEJ in 2024 [25], Q4, lucrari la care sunt coautor.

S-a observat ca daca AlN este dopat cu Sc, noul material (ScAlN) are proprietati piezoelectrice superioare fata de AlN, si fata de ceilalti compusi din categoria III-nitruurilor.

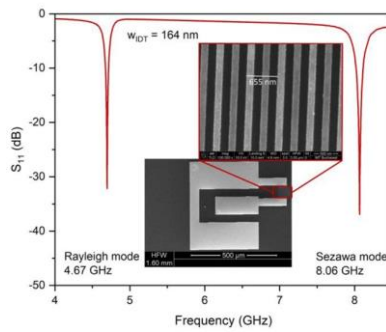


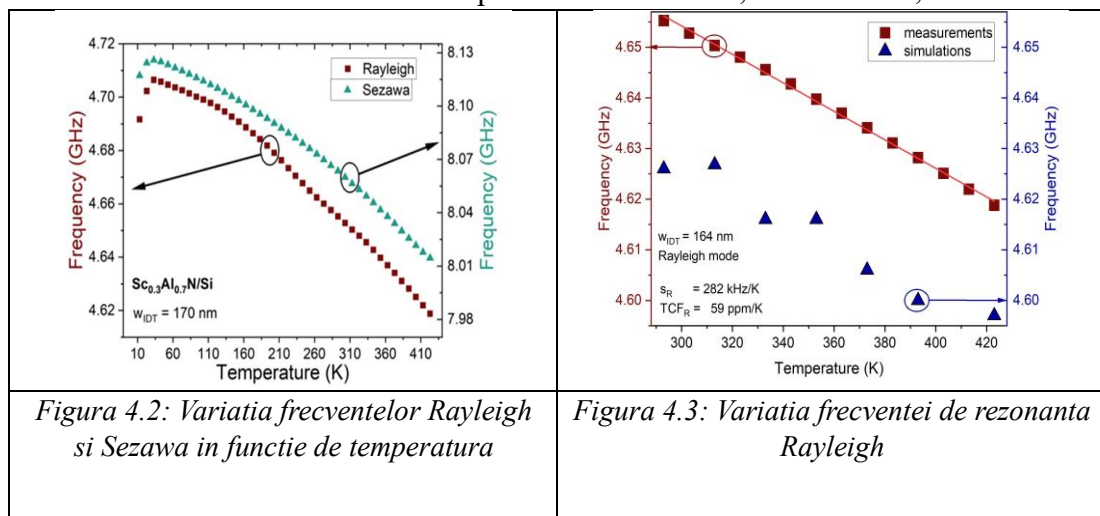
Figura 4.1: Masuratori parametri  $S$  la temperatura camerei si fotografie SEM a structurii de sensor de temperatura pe  $Sc_{0,3}Al_{0,7}N/Si$

In acest capitol este abordat un senzor de temperatura de tip SAW fabricat pe, nitrura de aluminiu dopata cu scandiu ( $ScAlN$ ), in ideea de a compara performantele in materie de sensibilitate si coeficient de temperature al frecventei obtinute de noi si de alti autori pe senzori te tip SAW realizati straturi de  $GaN$  si  $AlN$ , precum si a analiza, comportamentul modului Sezawa, in ceea ce priveste cei doi parametrii specificati, lucru facut pentru prima data, in cadrul colectivului din care fac parte.

Masuratorile efectuate la temperatura camerei au pus in evidenta doua frecvente de rezonanta, una la 4,69 GHz ce corespunde modului Rayleigh si a doua la 8,06 GHz pentru modul Sezawa (figura 4.1). In aceeaasi figura este prezentata si o fotografie SEM a structurii experimentale. Din masuratorile experimentale rezulta ca viteza de faza in  $Sc_{0,3}Al_{0,7}N/Si$  are o valoare de 3083 m/s, mult mai mica ca viteza de faza a suntetului a siliciu de 5200 m/s [24], astfel ca aparitia modului Sezawa era de asteptat.

In figura 4.2 sunt prezentate valorile frecventei de rezonanta pentru intrega gama de temperaturi masurate (intre 6 K si 430 K) si pentru ambele moduri de propagare.

In figura 4.3 sunt prezentate valorile experimentale si de asta data si cele simulate pentru intervalul de temperaturi de cel mai mare interes (de la 0 °C la 150 °C). Se observa o eroare foarte mica intre experiment si simulare, ea fiind de 0,6%.



In acest domeniu de temperatura se poate face o regresie liniara. Sensibilitatea este de 282 kHz/K iar valoarea TCF-ului este de 59 ppm/K (pentru modul Rayleigh). Pentru modul Sezawa eroarea relativa dintre masuratori si simulari este cuprinsa intre 1,5...1,8%. Valoarea sensibilitatii este de 383 kHz/K iar a TCF-ului este de 47 ppm/K.

## Capitolul 5

### **Analiza experimentală a senzorilor magnetici și a cuplajului undelor acustice de suprafață cu undele de spin utilizând dispozitive SAW realizate pe compusi de tip III - nitruri**

#### **5.1 Generalități**

Al 5-lea capitol al tezei este dedicat comportamentului dispozitivelor SAW în câmp magnetic. Două obiective sunt urmărite: primul constă în analiza experimentală a variației frecvenței de rezonanță în câmp magnetic și realizarea experimentală și caracterizarea unui senzor de tip SAW în câmp magnetic; al doilea obiectiv (și cel principal) constă în analiza cuplajului dintre undele acustice și cele de spin. Această interacțiune are loc prin intermediul undelor de spin (magnoni) și reprezintă excitații colective ale momentelor magnetice.

Interacțiunea dintre undele de spin și undele acustice prin intermediul magnetoelasticității a fost propusă prima dată de către Kittel în anul 1950 [26], care a demonstrat teoretic cuplajul dintre undele acustice și cele de spin. Cuplajul se obține atunci când frecvențele de rezonanță ale SAW-ului și ale undelor de spin, (aceasta din urmă foarte apropiate de frecvența de rezonanță feromagnetică -FMR) sunt egale și de asemenea vectorul de undă  $k$ , al celor două unde este egal [26][27]. Generarea undelor de spin în zona frecvenței FMR prin intermediul undelor acustice, sau generarea undelor acustice cu ajutorul undelor de spin cu un câmp RF magnetic a fost studiată, sporadic și teoretic în ultimele decenii [27]. În ultimii 10-15 ani, această temă a arătat un potențial puternic pentru aplicații de stocare de date, spintronica și magnonica astfel că interesul a crescut și primele rezultate experimentale au început să apară [27][28].



## 5.2 Senzorul magnetic de tip SAW pe $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N}/\text{Si}$

In acest subcapitol se prezinta realizarea unui sensor magnetic de tip SAW pe  $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N}/\text{Si}$ . Structura de SAW este cu un singur port una; fiind analizata variatia frecventei de rezonanta cu campul magnetic prin parametrul  $S_{11}$ . Traductorul interdigitat este metalizat cu un material magneostriktiv (Ni); in felul acesta campul magnetic va induce stresul mecanic direct in stratul de  $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N}$ . Grosimea substratului de siliciu este de  $525 \mu\text{m}$ , stratul de  $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N}$  (piezoelectric) are  $0,8 \mu\text{m}$  iar grosimea metalizarii este de  $45\text{nm}/5\text{nm}$  format din Ni/Au. Rolul aurului este acela de a proteja nichelul de oxidare; in felul acesta se evita pierderea proprietatilor feromagnetice ale Ni.

Latimea IDT-ului este de  $140 \text{ nm}$  ceea ce corespunde unei lungimi de unda de  $560 \text{ nm}$  a dispozitivului. Numarul total de digiti este de 150.

Masuratorile in camp magnetic au fost facut cu ajutorul unui criostat Janis folosit si pentru masuratori la diverse temperaturi, magnetul este EM 4V with 643 Power Supply de la LakeShore cu un camp magnetic maxim de  $460 \text{ mT}$ .

Criostatul Janis este plasat intre polii celor doi magneti [29].

Parametri  $S_{11}$  au fost masurati la temperatura camerei precum si la temperaturile de  $150$  si  $100 \text{ K}$  variind campul magnetic intre  $-300 \text{ mT}$  si  $+300 \text{ mT}$  cu un pas de  $0,7 \text{ mT}$ .

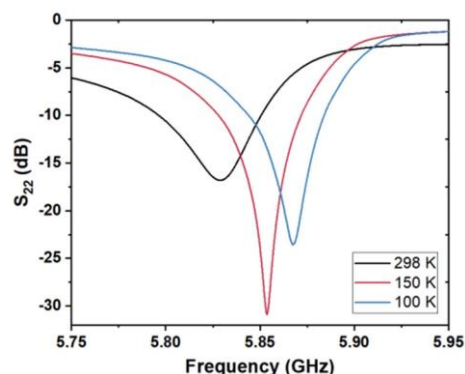


Figura 5.1: Valorile lui  $S_{11}$  in functie de frecventa pentru cele trei temperaturi si fara camp magnetic aplicat [29] (@IEEE 2022)

In figura 5.1 sunt prezentate valorile lui  $S_{11}$  pentru campul magnetic nul, pentru temperaturile de  $298$ ,  $150$  si  $100 \text{ K}$ . Aceste valori sunt luate ca referinta pentru fiecare temperatura in parte atunci cand campul magnetic este aplicat.

Folosind valorile in camp magnetic si valorile de referinta s-a calculat sensibilitatea  $\Delta f/f_0$  folosind formula:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_r(B) - f_r(B = 0)}{f_r(B = 0)} \quad (5.1)$$

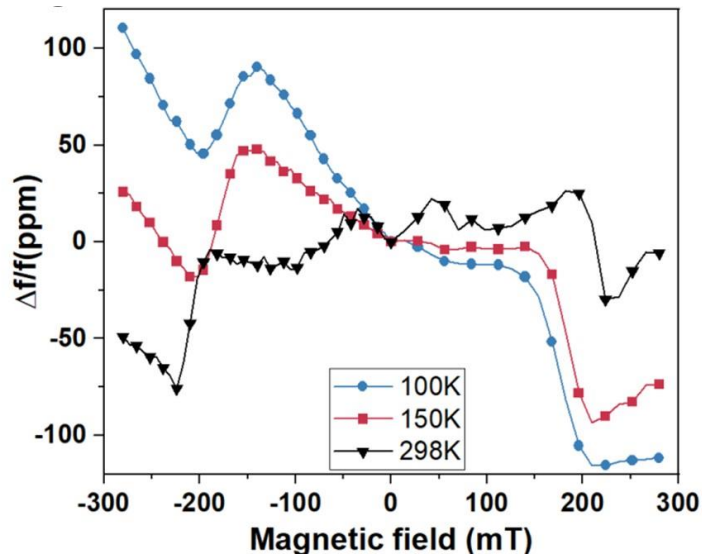


Figura 5.2:  $\Delta f/f_0$  in functie de campul magnetic pentru cele trei temperaturi (@IEEE 2022)

Daca ne uitam la axa pozitiva a campului magnetic se observa ca avem o valoare  $\Delta f/f_0$  crescuta la temperatura de 100 K (albastru) de peste 100 ppm, la 150 K (rosu) avem 90 iar pentru temperatura camerei (negru) cea mai scazuta de 25ppm. Punctul de maxim de pe axa negativa corespunde unui unghi de  $45^\circ$  dintre campul magnetic aplicat si momentul magnetic al IDTului de nichel [29].

In figura 5.3 este calculata sensibilitatea normalizata (ppm/mT) cu ajutorul formulei:

$$s = \frac{1}{f_0} \frac{df}{dB} \quad (5.2)$$

Din figura 5.3 se observa ca sensibilitatea are o comportare liniara pentru valorile campului magnetic cuprins intre  $-300\text{mT}$  si  $-200\text{ mT}$  si pentru

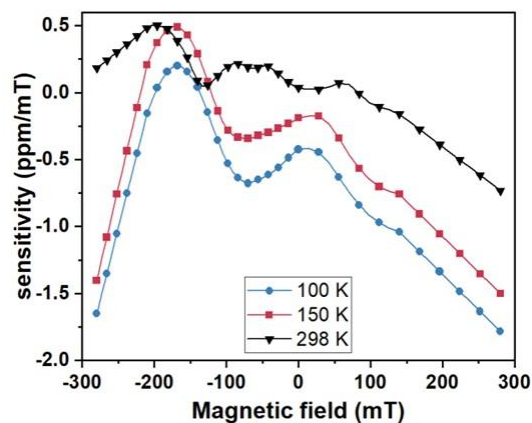


Figura 5.3: Variatia sensibilitatii in functie de campul magnetic [29] (@IEEE 2022)

intervalul pozitiv între +100mT și +300 mT. Pentru prima dată s-au fabricat, măsurat și analizat influența câmpului magnetic asupra frecvenței de rezonanță pe o structură ScAlN/Si cu electrozi de nichel și mai ales s-au furnizat măsurători de parametri S la temperaturi joase. Rezultatele noi au fost prezentate și publicate la conferința IEEE CAS 2022, lucrare la care sunt autor principal.

### **5.3 Interacțiunea undelor acustice de suprafață cu undele de spin realizată prin intermediul unei structuri de tip SAW pe $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N/Si}$ având un strat magnetostrictiv de nichel între IDT-uri**

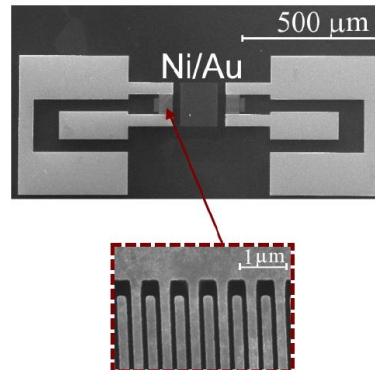
Interesul pentru topica cuplajului undelor acustice cu undele de spin a crescut enorm în ultimii 10-15 ani ceea ce a dus la apariția primelor rezultatelor experimentale legate de această topica. Ca și în cazul altor aplicații ale dispozitivelor SAW și în acest caz primele rezultate au apărut pe niobat de litiu deși nu există o fitare între frecvența de rezonanță a SAW-urilor realizate pe acest material și rezonanța feromagnetică ultima fiind cuprinsă în domeniul GHz-ilor pentru materialele magnetostrictive uzuale.

În toate experimentele din literatura realizate utilizând niobatul de litiu și tantalatul de litiu pentru evidențierea cuplajului SAW/SW, datorită diferenței mari între frecvența de rezonanță Rayleigh a SAW-ului și FMR este necesar să se utilizeze armonici superioare ale SAW-ului care au dezavantajul unei amplitudini mai mici, cu efecte negative asupra cuplajului SAW/SW.

Se prezintă în acest (sub)capitol al tezei, un dispozitiv SAW cu două porturi realizat pentru prima dată pe un strat subțire semiconductor de tip III-nitru depus pe siliciu de mare rezistivitate (ScAlN/Si), destinat cuplării undelor acustice de suprafață cu undele de spin. Cuplajul se realizează prin intermediul stratului magnetostrictiv din nichel plasat între IDT-urile dispozitivului SAW. Sunt prezentate rezultatele a două lucrări publicate.

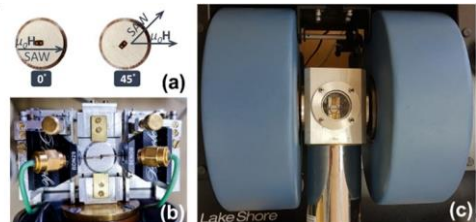
În procesare s-au folosit plăchete de  $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N/Si}$ , substratul de siliciu este de înaltă rezistivitate. Grosimea materialului piezoelectric a fost de  $0,8 \mu\text{m}$  iar grosimea siliciului a fost de  $526 \mu\text{m}$ . IDT-ul este compus din 75 de perechi de digiti și 50 de reflectoare plasate în stânga și dreapta IDT-urilor. Din punct de vedere geometric, lățimea unui IDT este de  $0,17 \mu\text{m}$  ceea ce corespunde unei lungimi de undă de  $0,68 \mu\text{m}$ . Grosimea metalizării IDT-urilor este de  $5/45 \text{ nm}$ , (Ti/Au) și sunt fabricate prin litografia cu fascicul de electroni. Distanța dintre cele două IDT-uri este de  $200 \mu\text{m}$ . Între cele două IDT-uri este depus un strat feromagnetic de nichel de  $12 \text{ nm}$  grosime acoperit cu un strat foarte subțire de aur ( $3 \text{ nm}$ ) cu rolul de a proteja stratul de nichel de oxidare, proces care ar duce la pierderea proprietăților feromagnetice ale acestuia. Stratul feromagnetic are dimensiunile de  $140 \times 166 \mu\text{m}$  [30][31].

O fotografie SEM a structurii experimentale cu un detaliu al procesului de nanolitografie e prezentat in figura 5.4.



*Figura 5.4 Poza SEM a structurii SAW cu doua porturi utilizat pentru demonstrarea cuplajului [30] (@IEEE2022)*

Structurile SAW au fost taiate, apoi in cipuri si lipite pe o ambaza (figura 5.5 a)) ce poate fi rotita, astfel incat sa se masoare parametri de transmisie ( $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ), in camp magnetic la diferite unghiuri intre directia campului magnetic aplicat si vectorul vitezei undei acustice de suprafata. In figura 5.5 b) este prezentat dispozitivul special construit in cadrul laboratorului, dispozitiv ce permite masurarea parametrilor  $S$ . In figura 5.5 c), criostatul Janis ce contine si dispozitivul special (figura 5.5 b) este plasat intre polii unui electromagnet de tipul EM 4V 643 Power Supply de la LakeShore. Campul magnetic maxim ce se poate obtine la nivelul dispozitivului, (avand in vedere ca criostatul este plasat intre polii electromagnetului) este de 420 mT.



*Figura 5.5: Ambaza circulara necesara pentru rotirea structurilor la diverse unghiuri (a); dispozitivul special construit in cadrul laboratorului capabil sa masoare parametrii  $S$  (b); criostatul Janis si polii magnetului LakeShore [30] (@IEEE2022)*

In figura 5.6 a) sunt prezentati parametri  $S_{11}$  pentru acest dispozitiv, in camp magnetic nul si se observa aparitia a doua rezonante: Rayleigh la 4,67 GHz si Sezawa la 8,05 GHz. Se mai observa ca amplitudinea semnalului in cazul Sezawa este mult mai mare fata de Rayleigh. Parametri de transmisie, pentru modul Rayleigh si Sezawa sunt prezentati in figura 5.6 a) [30].

O masura a cuplajului intre undele acustice si undele de spin consta in absorbtia de energie din undele acustice, observabila prin descresterea lui  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  (parametri de transmisie), la rezonanta, evident in camp magnetic. Masuratorile se fac la frecvente in vecinatatea rezonantelor (zonele incercuite din figura 5.6 b)) [30].

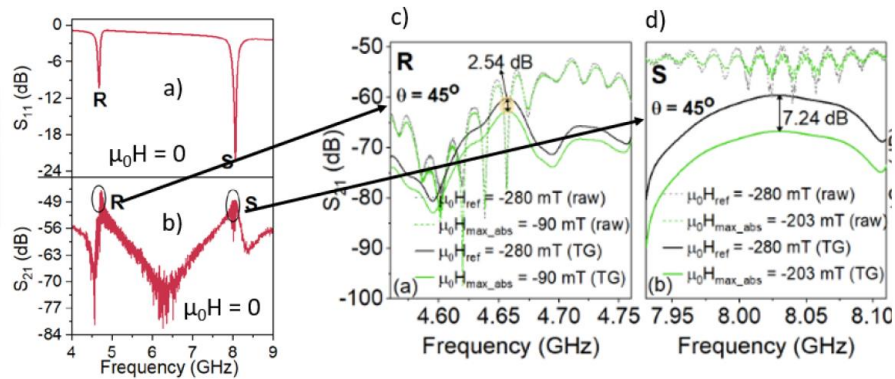


Figura 5.6: Valorile  $S_{21}$  masurate la valoarea de referinta a  $\mu_0 H_{ref}$  (curba neagra intrerupta) si la  $\mu_0 H_{max abs}$ , valoarea la care absorbtia maxima a fost observata (curba verde intrerupta) pentru Rayleigh (stanga) si Sezawa -dreapta (masuratori "raw"); masuratori TDR (liniile verzi ,si negre continue ) [30] (@IEEE2022)

Cuplajul maxim dintre undele acustice de suprafata si cele de spin apare acolo unde amplitudinea lui  $S_{21}$  descreste cel mai mult.

In figura 5.6 c) si d) sunt detaliate masuratorile efectuate in camp magnetic la  $\theta = 45^\circ$ , pentru cele doua moduri, Rayleigh ,si respectiv Sezawa.

Aceste masuratori s-au facut dupa rigoarele masuratorilor magnetice, considerand ca valoare de referinta, a valoarea minima a campului la care s-au inceput masuratorile (-280 mT) ,si nu valoarea  $B=0$  [30].

In figura 5.6 c) se poate observa descresterea lui  $S_{21}$  in jurul valorii de rezonant, a  $B= -90$  mT - curba verde punctata, comparata cu curba neagra punctata corespunzatoare valorii de referinta de  $-280$  mT, pentru modul Rayleigh [30].

Similar, in figura 5.6 d) se poate observa descresterea lui  $S_{21}$  in jurul valorii de rezonant, a  $B=-203$  mT - curba verde punctata, comparata cu curba neagra punctata corespunzatoare valorii de referinta de  $-280$  mT, pentru modul Sezawa [30].

Aceste determinari se refera la valorile brute ("raw") ale valorilor lui  $S_{21}$ . Este evidenta, vizual descresterea (chiar din masuratorile brute); aceasta descrestere e mai pronuntata pentru modul Sezawa.

La acest gen de masuratori sunt necesare determinari mai precise care constau in "time gated determinations" obtinute prin "time domain reflectometry" cu rolul de a elimina semnalele electromagnetice parazite. Rezultatele acestor determinari sunt prezentate in figura 5.6 c) respectiv 5.6 d). E vorba de curbele verzi continue pentru campurile la rezonanta, comparate cu curbele negre continue aferente campului de referinta. Cu ajutorul acestora putem aprecia o scaderea semnalului cu 2,54 dB pentru

modul Rayleigh si 7,24 dB pentru modul Sezawa, rezultate deosebit de spectaculoase; pentru modul Sezawa acestea au fost puse in evidenta pentru prima data [30].

Cuplajul maxim dintre undele acustice de suprafata si cele de spin apare acolo unde amplitudinea lui  $S_{21}$  descreste cel mai mult. In figurile 5.7 sunt prezentate valorile masurate pentru  $S_{21}$  in functie de frecventa la un unghi de  $45^\circ$  pentru ambele moduri. Astfel in figura 5.7 a) avem valorile lui  $S_{21}$  pentru modul Rayleigh atunci cand campul magnetic este de 280 mT (referinta) si pentru valoarea de  $-90$  mT, acolo unde a fost observata cea mai mare absorbtie. In figura 5.7 b) este prezentat pentru cazul Sezawa si valoarea unde  $-203$  mT a campului magnetic acolo unde apare cea mai mare absorbtie. Se mai poate observa si scaderea semnalului cu 2,54 dB pentru Rayleigh si 7,24 dB pentru Sezawa [30].

Pentru a masura transferul de energie dintre domeniul acustic catre cel magnetic se face diferenta dintre  $S_{21}$  pentru fiecare camp magnetic si  $S_{21}$  de referinta masurat la valoarea campului magnetic de  $\mu_0 H_{ref} = -280$  mT:

$$\Delta S_{21} = \left| S_{21}^{\mu_0 H_n} - S_{21}^{\mu_0 H_{ref}} \right| \quad (5.3)$$

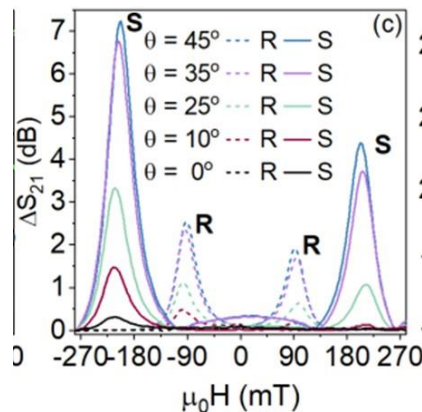


Figura 5.8: Transferul de energie  $\Delta S_{21}$  pentru tot intervalul campului magnetic si cele 5 unghiuri alese (@IEEE2022)

In figura 5.8 sunt prezentate valorile  $\Delta S_{21}$  pentru toate unghiurile si pentru cele doua frecvente de rezonanta. Se observa ca efectul maxim apare la ambele rezonante si este mai mare pentru cazul Sezawa si la unghiul de  $45^\circ$  [30].

O scadere de 4 ori mai mare in amplitudine se poate observa pentru modul Sezawa atunci cand valoarea campului magnetic este de 203 mT, pentru un unghi de  $45^\circ$ . Pentru modul Rayleigh apare o scadere de 2 ori a amplitudinii la un camp magnetic de 90 mT [30]. Valorile absorbtiei sunt foarte mari pentru undele Rayleigh, dupa opinia noastra comparabile cu cele mai bune rezultate obtinute pana acum (raportate asa cum am aratat doar pe substraturi piezoelectrice clasice). Valorile absorbtiei pe modul Sezawa reprezinta insa "state of the art" fiind substantial mai mari decat ce s-a raportat pana la ora actuala e drept doar pentru modul Rayleigh deoarece lucrarile raportate pana acum

nu au putut beneficia de modul Sezawa inexistent pe “nonlayered structures” [30]. Consideram ca rezultatele raportate aici sunt cele mai bune rezultate cu privire la transferul de energie de la undele SAW la undele de spin pana la momentul publicarii lucrarii.

Lucrarile la aceasta topica am publicat in calitate de coautor o lucrare la revista IEEE Electron Device Letters si o lucrare la conferinta IEEE CAS 2021.

## Capitolul 6

### **Contributii la progresul domeniului, lucrarile publicate, contributii originale, participarea personala la lucrarile publicate in cadrul colectivului de autori**

Topica acestei teze a urmarit, pe de o parte, dezvoltarea tehnologiei dispozitivelor SAW pe materiale realizate din straturi subtiri semiconductoare de tip III- nituri, (GaN, AlN, ScAlN) depuse /sau crescute pe semiconductori clasici de volum precum (SiC, Si) sau dielectrics (safir).

Abordand o topica actuala pe plan mondial, cu utilizarea unor tehnologii avansate, in conditiile integrarii colectivului in colaborari internationale, in cadrul unor programe europene de cercetare, au putut fi obtinute rezultate noi, interesante, originale, unele reprezentand chiar actuala stare actuala a artei, precum si realizarea de publicatii in reviste prestigioase.

**Lucrarile publicate in timpul scolii doctorale si a caror topica este analizata in teza:**

#### **A. Reviste (R) cotate ISI**

**R1:** Nicoloiu, Alexandra, George E. Stan, Claudia Nastase, **George Boldeiu**, Cristina Besleaga, Adrian Dinescu, and Alexandru Müller. “*The Behavior of Gold Metallized AlN/Si- And AlN/Glass-Based SAW Structures as Temperature Sensors.*” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 68(5):1938–48. 2021.(Q2)

**R2: Boldeiu George**, George E. Ponchak, Alexandra Nicoloiu, Claudia Nastase, Ioana Zdru, Adrian Dinescu, and Alexandru Müller. “*Investigation of Temperature Sensing Capabilities of GaN/SiC and GaN/Sapphire Surface Acoustic Wave Devices.*” IEEE Access 10:741–52. 2022 .(Q2)

**R3:** Zdru, I., C. Nastase, L. N. Hess, F. Ciubotaru, A. Nicoloiu, D. Vasilache, M. Dekkers, M. Geilen, C. Ciornei, **G. Boldeiu**, A. Dinescu, C.

Adelmann, M. Weiler, P. Pirro, and A. Müller. “A GHz Operating CMOS Compatible ScAlN Based SAW Resonator Used for Surface Acoustic Waves/Spin Waves Coupling.” IEEE Electron Device Letters 43(9):1551–54. 2022.(Q1)

**R4:** Alexandra Nicoloiu, **George Boldeiu**, Claudia Nastase, Monica Nedelcu, Cristina Ciornei, Ioana Zdru, George Stavrinidis, Dan Vasilache, Antonis Stavrinidis, Adrian Dinescu, George Konstantinidis, Alexandru

**R5:** Pati Tripathi, S., Bonen, S., Bharadwaj, A., Jager, T., Nastase, C., Iordanescu, S., **Boldeiu, G.**, Pa, steanu, M., Nicoloiu, A., Zdru, I., Mller, A., & Voinigescu, S. P. (2022). ”Characterization and Modeling of Quantum Dot Behavior in FDSOI Devices”. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 10.(Q2) <https://doi.org/10.1109/JEDS.2022.3176205>

**R6:** Aldrigo, M., Dragoman, M., Iordanescu, S., **Boldeiu, G.**, Crippa, P., Biagetti, G., Turchetti, C., Pierantoni, L., Mencarelli, D., Xavier, S., Gangloff, L., & Ziaei, A. (2022). ”Tunable and Miniaturized Micro Variable Capacitors”. IEEE Transactions on Nanotechnology, 21, 118–130. <https://doi.org/10.1109/TNANO.2022.315wave3561> Filters Using Carbon Nanotube-Based (Q2)Müller, “Experimental analysis of Rayleigh and Sezawa modes resonance frequencies in SAW devices manufactured on Sc0.3Al0.7N/Si”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering Japan, 2024 (Q4)

## B. Conferinte (C) cotate ISI

**C1:** Alexandra Nicoloiu, **George Boldeiu**, Claudia Nastase, Monica Nedelcu, Cristina Ciornei, Ioana Zdru, George Stavrinidis, Dan Vasilache, Antonis Stavrinidis, Adrian Dinescu, George Konstantinidis and Alexandru Müller “Temperature Behaviour of Rayleigh, Sezawa and Lamb Mode Resonance Frequencies of 30% ScAlN/Si SAW Devices”, pp. 1608-1611, Transducers 2023 Kyoto, JAPAN, 25 - 29 June 2023

**C2:** **Boldeiu, G.**, C. Nastase, A. Nicoloiu, A. Florescu, I. Zdru, D. Vasilache, A. Dinescu, and A. Müller. 2022. “Resonance Frequency vs. Magnetic Field Analysis for ScAlN/Si SAW Resonators with Magnetostrictive Metalization on the Nanolithographic IDTs.” in Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS. Vols. 2022-October.



**C3:** Vasilache, D., A. Nicoloiu, **Boldeiu, G.**, I. Zdru, T. Kostopoulos, M. Nedelcu, A. Stavrinidis, C. Nastase, G. Stavrinidis, G. Konstantinidis, A. Dinescu, and A. Müller. 2022. “*Development of High Frequency SAW Devices Devoted for Pressure Sensing.*” in Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS. Vols. 2022-October.

**C4:** Nicoloiu, A., C. Nastase, I. Zdru, D. Vasilache, **G. Boldeiu**, M. C. Ciornei, A. Dinescu, and A. Müller. 2021. “*Novel ScAlN/Si SAWType Devices Targeting Surface Acoustic Wave/Spin Wave Coupling.*” Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS 2021-October:67–70, 2021

**C5:** Tripathi, S. P., Bonen, S., Nastase, C., Iordanescu, S., **Boldeiu, G.**, Pa,steanu, M., Muller, A., & Voinigescu, S. P. (2021). “Compact Modelling of 22nm FDSOI CMOS Semiconductor Quantum Dot Cryogenic I-V Characteristics”. ESSCIRC 2021 - IEEE 47th European Solid State Circuits Conference, Proceedings, 43–46, <https://doi.org/10.1109/ESSCIRC53450.2021.9567759>

**C6: Boldeiu, G.**, Dragoman, M., Aldrigo, M., Iordanescu, S., & Cismaru, A. (2022). ”Multi-physics simulations of pyroelectric harvesters based on nanoscale ferroelectrics”. Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS, 2022-October. <https://doi.org/10.1109/CAS56377.2022.9934509>

Lucrarile R1-R4 si C1-C4 au legatura directa cu rezultatele noi si originale raportate in teza. Contributile mele la aceste lucrari detaliate pe larg in cadrul Capitolului 6 din teza. Sunt prim autor la un articol in revista IEEE Access (Q2), si doua lucrari de conferinte IEEE.

## Capitolul 7

### Concluzii si perspective

Lucrarea prezinta contributiile individuale si cele apartinand doctorandului in cadrul colectivului din care a facut parte, la dezvoltarea unor modele fizice noi, a unor tehnologii noi, a unor metode de simulare si proiectare si de caracterizare, inovative legate de realizarea de dispozitive de tip SAW pe straturi subtiri din

semiconductori de tip III-nitruiri (AlN, GaN, ScAlN) depuse sau crescute pe semiconductori de volum (Si, SiC) sau dielectrici (safir).

Principalele activitati, realizari si rezultate ale lucrarii sunt prezentate in capitolele 2-5. Aceste capitole urmaresc si principalele publicatii pe care autorul tezei le-a semnat ca autor principal sau in calitate de coautor. In continuare prezentam concluziile acestor realizari si rezultate.

## **Capitolul 2 - Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe AlN/Si si AlN/sticla**

Lucrarea publicata pe care se bazeaza acest capitol [**R1 cap6, Q2**] este printre primele articole care analizeaza comportamentul structurilor de tip SAW realizate pe straturi subtiri de AlN depuse pe diverse substraturi semiconductoare de volum ("bulk"). Structurile de AlN/Si sunt pentru prima data utilizate ca senzori de temperatura dupa cunostintele autorilor (au mai fost publicate rezultate pe AlN/diamant si AlN/SiC- materiale mult mai scumpe ca substrat cu tehnologii mai dificile). Structurile SAW pe AlN/Si au dovedit performante excelente ca senzori de temperatura: pentru sensibilitate si coeficientul de temperatura al frecventei (TCF) valorile au fost mai mari decat cele obtinute de aceiasi autori pentru structurile de SAW pe GaN/Si si pentru AlN/sticla.

Pentru prima data, pentru simularea comportamentului structurilor s-a folosit metoda FEM+COM modificata; pentru simularea FEM s-a utilizat COMSOL MultiPhysics. Aceasta simulare reprezinta un pas important in extragerea parametrilor COM pentru toate temperaturile considerate. S-au comparat valorile experimentale cu cele simulate, rezultand valori foarte mici ale erorilor (mai mici decat cele raportate in literatura).

## **Capitolul - 3 Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe GaN/SiC si GaN/safir**

Lucrarea publicata legata de acest capitol [**R2 cap6, Q2**] publicata in 2022 in IEEE Acces, la care sunt prim autor, reprezinta o colaborare intre IMT si NASA in realizarea si caracterizarea unor senzori de tip SAW functionali pe un domeniu foarte mare de temperatura, de la temperaturi criogenice (cateva grade K) la temperaturi mai mari de 500°C; aici s-a prezentat comportarea unor structuri de rezonatoare cu un singur port realizate pe GaN/SiC si GaN/safir. Substraturile de SiC si safir asigura, alaturi de "over-layerul" de GaN, functionarea la temperaturi mari (siliciul devine intrinsec -deci conductiv la temperaturi mai mari de cca 200°C). Tehnologia, proiectarea, simularea si masuratorile la temperaturi joase s-au facut la IMT; masuratorile de microunde variatia frecventei de rezonanta cu temperatura la temperaturi inalte (150 – 500°C) s-au facut la NASA. Sunt evidentialte elementele de originalitate din proiectare, simulare, tehnologie si masuratori. In premiera, din masuratorile de parametri S, s-au calculat valorile

factorului de calitate  $Q$  si coeficientul de cuplaj electromecanic ( $k_2 \text{ eff}$ ) pentru intreg intervalul de temperatura ( $-266^\circ\text{C} \div 500^\circ\text{C}$ ).

S-a observat ca dispozitivul realizat pe GaN/safir are o valoarea a TCF-ului ( $-96,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) mai mare comparativ cu valoarea dispozitivului GaN/SiC ( $-46 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ).

#### **Capitolul - 4 Senzori de temperatura pe baza de dispozitive SAW pe ScAlN/Si**

Aici au fost doua lucrari: una publicata in proceedings-ul prestigioasei conferine Transducers 2023, **(C1, cap 6)** alta publicata in revista japoneza "IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering" **(R4, cap 6 Q4)** in anul 2024, la ambele fiind coautor.

Acest capitol prezinta primele dispozitive SAW realizate pe ScAlN/Si gandite ca senzori de temperatura. Determinarile de sensibilitate si a coeficientilor de temperatura a frecventei s-au determinat intr-o incinta vidata astfel ca masuratorile nu au putut fi viciate de adsorbtiia gazelor atmosferice. Astfel s-a demonstrat ca valorile TCF-ului pentru modurile Rayleigh si Sezawa sunt suficient de mari pentru a asigura performante mai bune decat pentru GaN/Si, si mai mult, rezultatele obtinute au putut fi comparate cu cele raportate de o alta (singura) lucrare publicata pe aceasta topica noua, pentru modul Rayleigh.

S-a determinat sensibilitatea si TCF-ul pentru ambele moduri puse in evidenta. Pentru modul Sezawa TCF, dupa cunostinta autorilor, este raportat pentru prima data. Simularile variatiei frecventei de rezonant, a cu temperatura sunt in buna concordanta cu experimentul.

#### **Capitolul 5**

##### **Subcapitolul - 5.2 Senzorul magnetic de tip SAW pe $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N/Si}$**

Acest subcapitol descrie realizarea unui senzor magnetic pe ScAlN prezentata si publicata in cadrul conferintei CAS 2022 **(C2 cap 6)** la care sunt prim autor. Este prima lucrare care descrie un senzor magnetic realizat pe ScAlN/Si, dupa ce din acelasi colectiv s-a realizat cu doi ani mai devreme primul senzor magnetic pe GaN/Si. Rezultatele sunt deosebit de promitatoare; se prezinta proiectarea originala a senzorului magnetic si realizarea pentru prima data masuratori magnetice la temperaturi criogenice la un astfel de senzor.

##### **Subcapitolul - 5.3 Interactiunea undelor acustice de suprafata pe $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N/Si}$ cu undele de spin cu un strat magnetostrictiv de nichel**

Subcapitolul 5.3 se bazeaza pe o lucrare publicata in IEEE Trans. On Electron Devices Lett **(R3 cap 6, Q1)**, la care sunt autor si o consideram ca a reprezentat

un “breakthrough” in cercetarea in domeniu, fiind prima lucrare care prezinta experimental cuplajul undelor acustice de suprafata cu undele de spin utilizand strat-uri subtiri semiconductoare, (in acest caz pe  $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N}/\text{Si}$ , cel mai nou, exotic si promitator dintre materialele de tip III-nitruri). Se analizeaza atat modul de propagare Rayleigh cat si modul de propagare Sezawa. Pentru modul Rayleigh (la cca 5 GHz), fractia de energie transferata de la undele acustice de suprafata la undele de spin reprezinta 50% pentru un camp de 90 de mT, valoare comparabila cu cele mai bune raportate. In cazul modului Sezawa, fractia de energie transferata de la undele acustice de suprafata la undele de spin este cu mult mai mare decat fractiile raportate pana la momentul publicarii. Raportarile anterioare legate de aceasta topica sunt exclusiv pe materiale piezoelectrice de volum (niobat de litiu), modul Rayleigh. Pe structurile SAW realizate pe “layered structures” modul Sezawa poate apare, in anumite conditii, cum e si cazul nostru. Astfel pentru un film subtire de Ni (15 nm) plasat intre IDT-urile unui dispozitiv SAW realizat pe  $\text{Sc}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{N}/\text{Si}$  parametri de transmisie au fost acordati in amplitudine, in raport atat cu marimea cat si cu orientarea campului magnetic, astfel incat o descrestere de 4 ori in amplitudine a fost masurata pentru modul Sezawa, la frecventa de cca 8 GHz, la un camp magnetic de 203 mT si un unghi de 45 de grade intre campul magnetic si directia de propagare a dispozitivului SAW. Rezultate par-tiale le-am publicat si la conferinta IEEE, CAS 2022 (C4, cap.6).

### Perspective

Numeroase din rezultatele raportate au un grad inalt de noutate si conduc la concluzii optimiste privind viitorul acestor dispozitive. Trebuie sa aprofundam cercetarile legate de cuplajul undelor SAW cu undele de spin pentru diverse geometrii ale stratului magnetostrictiv si diverse grosimi ale stratului de  $\text{ScAlN}$  existand premiza unor rezultate si mai spectaculoase decat cele raportate de grupul nostru. Trebuie sa abordam si alte tipuri de senzori pe compusi III-nitruri (stain, stres, de gaz de umiditate), cu perspectiva unor rezultate mai bune in ceea ce priveste sensibilitatea.

In final consideram ca trebuie abordate si in grupul nostru filtrele SAW pe  $\text{ScAlN}$ . Materialul este inca in stadiul de cercetare, tehnologia de productie nu este suficient de matura, dar credem ca valorile mari ale lui  $k^2_{eff}$  si  $Q$  obtinute pentru acest material comparat cu cele obtinute pentru GaN si AlN ii vor asigura un viitor in dispozitivele SAW pentru filtrele utilizate in sistemele de comunicatii ”beyond 5 G”.

## Bibliografie

- [1] Royer, D. and Dieulesaint, E. *Elastic Waves in Solids I*, volume I. (2000).
- [2] Cheeke, J. D. N. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press, (2012).
- [3] Tichý, J., Erhart, J., Kittinger, E., and Pírivratská, J. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*, 1–207 (2010).
- [4] Hua, Q., Ma, B., and Hu, W. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses* **3-3**, 74–83 1 (2021).
- [5] Bhugra, H. and Piazza, G., editors. *Piezoelectric MEMS Resonators*. Springer International Publishing, (2017).
- [6] Běspalová, K., Osterlund, E., Ross, G., Paulasto-Kröckel, M., Sebastian, A. T., Karuthedath, C. B., Mertin, S., and Pensala, T. *Journal of Microelectromechanical Systems* **30**(2), 290–298 (2021).
- [7] Plessky, V. *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **10**, 867–947 12 (2000).
- [8] Lewis, M. *IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.* **2**, 800–809 (2005).
- [9] Borrero *et al.*, G. *Sensors and Actuators A: Physical* **203**, 204–214 (2013).
- [10] Stevens *et al.*, D. In *Fourth International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems*, Chiba University, Japan, (2010).
- [11] Müller *et al.*, A. *Sensors and Actuators A: Physical* **209**, 115–123 (2014).
- [12] Viens, M. and Cheeke, J. N. *Sensors and Actuators A: Physical* **24**(3), 209– 211 (1990).
- [13] Palacios *et al.*, T. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium* **1**, 57–60 (2002).
- [14] Ye *et al.*, X. , 585–588 (2010).
- [15] Binder, A. and Fachberger, R. *IEEE Sensors Journal* **11**(4), 966–970 (2011).
- [16] Müller *et al.*, A. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., (2014).
- [17] Müller *et al.*, A. In *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 1–4, (2014).
- [18] Müller *et al.*, A. *IEEE Electron Device Letters* **36**, 1299–1302 (2015).

- [19] Wang *et al.*, W. Z. In *2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, 942–945, (2017).
- [20] Nicoloiu *et al.*, A. volume 2018-October, (2018).
- [21] Nicoloiu *et al.*, A. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* (2020).
- [22] Boldeiu *et al.*, G. *IEEE Access* **10**, 741–752 (2022).
- [23] Nicoloiu *et al.*, A. In *The 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Kyoto, Japan*, (2023).
- [24] Institute, I. (1918). Accessed on 20 11, 2023.
- [25] Nicoloiu, A. et al. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, (2024)
- [26] Kittel, C. *Phys. Rev.* **73**, 155–161 Jan (1948).
- [27] Delsing *et al.*, P. *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**(35), 353001 jul (2019).
- [28] Munteanu, I. *Fizica Solidului*, volume I. (2003).
- [29] Boldeiu *et al.*, G. In *2022 International Semiconductor Conference (CAS)*, 187–190. IEEE, (2022).
- [30] Zdru *et al.*, I. *IEEE Electron Device Letters* **43**(9), 1551–1554 (2022).
- [31] Nicoloiu *et al.*, A. In *2021 International Semiconductor Conference (CAS)*, 67–70, (2021).