

**UNIVERSITATEA DE VEST DIN TIMIȘOARA**  
**FACULTATEA DE FIZICĂ**  
**ȘCOALA DOCTORALĂ DE FIZICĂ**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**- REZUMAT -**

**Doctorand:**

**DOMOKOS (căs. TEUȘDEA) ALEXANDRINA**

**TIMIȘOARA**

**2023**

**UNIVERSITATEA DE VEST DIN TIMIȘOARA**  
**FACULTATEA DE FIZICĂ**  
**ȘCOALA DOCTORALĂ DE FIZICĂ**

**STUDIUL PROPRIETĂȚILOR ELECTRICE ȘI**  
**MAGNETICE ALE UNOR SISTEME COMPOZITE**  
**DE NANOPARTICULE ÎN CÂMP DE JOASĂ**  
**FRECVENȚĂ ȘI MICROUNDRE**

**Doctorand:**  
**DOMOKOS (căs. TEUȘDEA) ALEXANDRINA**

**TIMIȘOARA**

**2023**

## MULȚUMIRI

Doresc în mod special să adresez pe această cale, distinsului Prof. univ. dr. Emerit **Iosif Mălăescu**, conducătorul științific al tezei de doctorat, mulțumirile mele cele mai alese, pentru sprijinul permanent, pentru competența, răbdarea și încrederea acordată pe parcursul elaborării și finalizării tezei de doctorat.

Mulțumesc distinșilor membri ai echipei de îndrumare formate din domnul Prof. dr. Habil **Mihail Lungu**, Conf. dr. Habil **Cătălin N. Marin** și Conf. dr. **Ștef Marius**, pentru sfaturile și ideile constructive pe întregul parcurs al studiilor mele doctorale.

Măsurătorile electrice și magnetice au fost efectuate în Laboratoarele de Magneto-Dielectrice și Corp Solid, de la Facultatea de Fizică, Universitatea de Vest din Timișoara, fapt pentru care adresez pe această cale, mulțumirile mele, domnului **Prof. dr. Cătălin N. Marin**, și domnului **Conf. dr. Aurel Ercuța** pentru susținere continuă și sprijin în obținerea rezultatelor experimentale. De asemenea, aduc mulțumirile mele domnului prof. **Paul C. Fannin**, de la Trinity College din Dublin, Irlanda, cu care colectivul de cercetare al d-lui Prof. Dr. Em. I. Mălăescu colaborează în domeniul comportării nanomaterialelor (fluide magnetice, materiale dielectrice, ferite, etc.) în câmp de înaltă frecvență, pentru sprijinul acordat în realizarea măsurătorilor de permeabilitate magnetică complexă în câmp de microunde.

Mulțumesc tuturor colegilor cercetători, cadre didactice și tehnicieni de la Facultatea de Fizică a Universității de Vest din Timișoara, pentru susținere și sprijinul acordat.

Nu în ultimul rând, mulțumirile se îndreaptă către familia mea, care mi-a acordat sprijinul necondiționat și echilibrul necesar desfășurării întregii activități profesionale, pe parcursul studiilor doctorale.

## CUPRINS

Introducere	8
<b>1. SISTEME COMPOZITE DE NANOPARTICULE ÎN CÂMP ELECTRIC</b>	<b>18</b>
1.1. Sisteme de nanoparticule; noțiuni introductive	18
1.2. Polarizarea în câmp electric static	19
1.2.1. Polarizarea macroscopică	19
1.2.2. Polarizarea de orientare. Modelul Langevin	20
1.3. Polarizarea în câmp electric variabil	22
1.3.1. Permitivitatea dielectrică complexă. Polarizarea de relaxare	22
1.3.2. Ecuțiile lui Debye. Pierderi dielectrice	24
1.4. Modelul teoretic Schwartz aplicat unui sistem de nanoparticule (ferofluid)	25
<b>2. SISTEME COMPOZITE DE NANOPARTICULE ÎN CÂMP MAGNETIC</b>	<b>27</b>
2.1. Magnetizarea în câmp magnetic static	27
2.1.1. Stare de magnetizare	27
2.1.2. Structura superparamagnetică. Ferofluide	28
2.1.3. Magnetizarea unui sistem superparamagnetic. Modelul Langevin	29
2.2. Magnetizarea în câmp magnetic variabil	30
2.2.1. Susceptibilitatea magnetică complexă. Magnetizarea de relaxare	30
2.2.2. Relațiile de dispersie pentru susceptibilitatea magnetică complexă. Pierderi magnetice	32
2.2.3. Procese de relaxare Brown și Neel în ferofluide	34
2.3. Teoria lui Neel a relaxării și rezonanței feromagnetice	36
<b>3. METODE DE CARACTERIZARE MORFOLOGICĂ ȘI STRUCTURALĂ ȘI DE INVESTIGARE A PROPRIETĂȚILOR ELECTRICE ȘI MAGNETICE ALE UNOR SISTEME DE NANOPARTICULE</b>	<b>40</b>

3.1.	Analiza structurală prin difracție cu raze X	40
3.2.	Microscopie electronică de baleiaj/spectroscopia de raze X cu dispersie după energie	43
3.3.	Investigarea proprietăților magnetice în câmp magnetic static	44
	3.3.1. Metoda histerezisgrafului de măsurare a curbei de magnetizare	44
3.4.	Investigarea proprietăților magnetice în câmp variabil	48
	3.4.1. Măsurarea componentelor permeabilității magnetice complexe utilizând metoda RLC-merului	48
	3.4.2. Metoda de măsurare a permeabilității magnetice complexe în câmp de microunde	49
3.5.	Investigarea proprietăților electrice în câmp variabil utilizând metoda impedanței complexe	53
	3.5.1. Metoda impedanței complexe	53
	3.5.2. Instalații experimentale utilizate pentru măsurători	54
<b>4.</b>	<b>EFFECTUL CÂMPULUI MAGNETIC DE POLARIZARE ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI ELECTRICE ALE UNUI FEROFUID ÎN CÂMP DE JOASĂ FRECVENȚĂ</b>	<b>56</b>
4.1.	Scopul studiului	56
4.2.	Caracterizarea probei și metoda experimentală	57
4.3.	Rezultate experimentale și discuții	60
	4.3.1. Efectul câmpului magnetic asupra impedanței complexe și modulului electric	60
	4.3.2. Efectul câmpului magnetic asupra conductivității electrice	65
	4.3.3. Efectul câmpului magnetic asupra permitivității dielectrice complexe	71
4.4.	Concluzii parțiale	76
<b>5.</b>	<b>STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE ELECTRICE ȘI MAGNETICE ALE UNOR SISTEME COMPOZITE DE TIP ELASTOMER ÎN CÂMP DE JOASĂ FRECVENȚĂ</b>	<b>78</b>
5.1.	Influența fracției volumice a particulelor de Al dintr-un maerial	78

compozit pe bază de cauciuc siliconic cu particule de Al, asupra unor proprietăți electrice	
5.1.1. Scopul studiului	78
5.1.2. Prepararea și caracterizarea probelor	80
5.1.3. Rezultate experimentale cu privire la influența fracției volumice asupra unor parametri electrici ai probelor compozite	83
5.1.3.1. Impedanța complexă și modulul electric	83
5.1.3.2. Conductivitatea electrică	86
5.1.3.3. Permitivitatea dielectrică complexă	89
5.1.4. Concluzii parțiale	92
5.2. Studiul proprietăților magnetice și electrice ale sistemului compozit constând din amestecul unui cauciuc siliconic cu ferrofluid	93
5.2.1. Scopul studiului	93
5.2.2. Obținerea și caracterizarea probelor	94
5.2.2.1. Curba de magnetizare statică	95
5.2.2.2. Analiza de difracție cu raze X	97
5.2.2.3. Analiza SEM/EDX a probelor compozite	98
5.2.3. Investigarea proprietăților magnetice în câmp de joasă frecvență	99
5.2.3.1. Permeabilitatea magnetică complex	99
5.2.4. Investigarea proprietăților electrice în câmp de joasă frecvență	101
5.2.4.1. Permitivitatea dielectrică complexă	101
5.2.4.2. Conductivitatea electrică	103
5.2.5. Concluzii parțiale	105
<b>6. STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE MAGNETICE ȘI RATA SPECIFICĂ DE ABSORBȚIE (SAR) A UNUI FERROFLUID ÎN CÂMP DE MICROUND</b>	107
6.1. Parametrii magnetici ai nanoparticulelor din ferrofluid în domeniul microundelor și în prezența unui câmp magnetic de polarizare	107
6.1.1. Scopul studiului	107
6.1.2. Considerații teoretice	108

6.1.3. Caracterizarea probei și metoda experimentală	110
6.1.4. Determinarea unor parametri magnetici ai nanoparticulelor din ferrofluid în câmp de microunde	112
6.1.5. Concluzii parțiale	116
6.2. Efectul câmpului magnetic asupra ratei specifice de absorbție (SAR) a ferrofluidului în domeniul microundelor	117
6.2.1. Scopul studiului	117
6.2.2. Considerații teoretice	117
6.2.3. Rata specifică de absorbție (SAR) în câmp de microunde	119
6.2.4. Concluzii parțiale	123
<b>CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE</b>	125
<b>Bibliografie</b>	132
<b>ANEXE</b>	
Anexa 1. Lista lucrărilor publicate	
Anexa 2. Rezumat teză	
Anexa 3. Rezumat teză (engleză)	
Anexa 4. Articole indexate ISI	

## Introducere

În ultimele decenii, a crescut interesul pentru cercetarea sistemelor compozite de nano-microparticule, precum nanofluidelor sau elastomerii, în vederea utilizării lor în diverse domenii ale științei și tehnologiei [1, 2]. Un material compozit este un sistem de două sau mai multe componente, obținut prin umplerea cu nano/microparticule a unei matrici solide, lichide sau elastice, conducând astfel la o performanță crescută în comparație cu componentele sale [3]. Cauciucul siliconic (SR) este un elastomer dielectric [4] constituind adesea o matrice pentru obținerea sistemelor compozite de nano/microparticule. SR are o rigiditate scăzută și o rezistență mare la rupere. Pentru a fi utilizat în diferite aplicații, cauciucul siliconic este amestecat cu micro- sau nanoparticule de diferite tipuri (particule ceramice, conductoare sau polimeri foarte polarizabili [5]). Acest lucru contribuie la modificarea constantei dielectrice a compozitului pe bază de cauciuc siliconic și îl face util în aplicații precum dispozitive elastice și flexibile de stocare a sarcinii sau dispozitive de acționare [6].

Un sistem compozit fluidic de nanoparticule, studiat intens, este ferofluidul sau fluidul magnetic [7], care se definește ca fiind un sistem bifazic de nanoparticule monodomenice ( $\text{Fe}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  etc.) dispersate într-un lichid de bază și stabilizate cu un surfactant pentru a preveni sedimentarea [7]. Pe de altă parte, ferofluidul este considerat un compozit cu proprietăți magneto-dielectrice, influențate de prezența unui câmp magnetic [8]. Prin amestecarea ferofluidului cu un cauciuc siliconic (SR) se obține un elastomer cu proprietăți dielectrice, electrice și magnetice, care depinde de procesul de fabricație, tipul de ferofluid și tipul de cauciuc siliconic, fracția volumică a particulelor, câmpul magnetic, acest elastomer fiind util pentru diverse aplicații tehnologice [9].

Studiile realizate în cadrul tezei mele de doctorat, se referă la investigarea proprietăților electrice și magnetice ale sistemelor compozite studiate, atât în câmp de joasă frecvență, cât și în câmp de microunde. În acest sens, au fost preparate 5 probe compozite de tip elastomer, prin amestecarea cauciucului siliconic comercial (tip RTV-530) cu microparticule de Al în diferite concentrații, precum și 2 probe de tip elastomer preparate prin amestecul cauciucului



siliconic cu un ferrofluid. Utilizând măsurătorile de impedanță complexă la joasă frecvență (20 Hz - 2 MHz) și în prezența unui câmp magnetic static de polarizare  $H$ , cu valori cuprinse între (0 -90) kA/m, am determinat pentru *prima dată efectul câmpului magnetic  $H$  asupra conductivității electrice  $\sigma$* , pentru probele obținute, cât și permitivitatea dielectrică complexă. Totodată, măsurătorile de impedanță complexă au permis și determinarea componentelor reală și imaginară a permeabilității magnetice complexe pentru proba compozită realizată din amestecul ferrofluidului cu cauciucul siliconic.

Măsurătorile în câmp de microunde privind comportarea permeabilității magnetice complexe la frecvențe cuprinse între (0.5 – 6) GHz și la diferite valori ale câmpului magnetic de polarizare  $H$ , cuprinse între (0 - 90) kA/m, au fost realizate la Trinity College din Dublin, Irlanda, cu amabilitatea prof. P.C.Fannin, cu care Universitatea de Vest din Timișoara, prin prof. I. Mălăescu colaborează cu succes de foarte mulți ani. Rezultatele obținute au permis efectuarea următoarelor două studii: 1) efectul câmpului magnetic de polarizare asupra unor proprietăți magnetice ale unui ferrofluid în câmp microunde și 2) efectul câmpului magnetic de polarizare asupra ratei specifice de absorbție (SAR) a ferrofluidului în domeniul microundelor.

Teza de doctorat conține 6 capitole, care descriu proprietățile electrice și magnetice ale nanosistemelor de particule dispersate în medii lichide (ferofluide), sau în medii solide (sistem compozit elastomeric), atât în câmp de joasă frecvență cât și în câmp de microunde în prezența unui câmp magnetic de polarizare, în vederea utilizării lor în diverse aplicații.

## **Capitolul 1** **SISTEME COMPOZITE DE NANOPARTICULE ÎN CÂMP ELECTRIC**

**În capitolul 1** sunt analizate proprietățile electrice ale sistemelor de nanoparticule atât în câmp electric constant cât și în câmp electric variabil. Referitor la comportarea în câmp electric constant s-a definit starea de polarizare, vectorul polarizare și modelul Langevin pentru sistemele dielectrice cu polarizare de

orientare. Referitor la comportarea sistemelor de nanoparticule în câmp electric variabil, la început a fost definită relaxarea dielectrică și permitivitatea dielectrică complexă, ecuațiile Debye și pierderile dielectrice, iar în finalul capitolului am prezentat pe scurt modelul teoretic Schwarz aplicat unui sistem de nanoparticule cum este ferrofluidul.

## Capitolul 2 **SISTEME COMPOZITE DE NANOPARTICULE ÎN CÂMP MAGNETIC**

**Capitolul 2** al lucrării, abordează analiza proprietăților magnetice ale sistemelor de nanoparticule fiind prezentată în acest sens magnetizarea acestor sisteme atât în câmp magnetic static cât și în câmp magnetic variabil. Referitor la comportarea în câmp magnetic static s-au descris tipurile de structuri magnetice insistând asupra structurii monodomenică și superparamagnetică. În continuare au fost definite ferrofluidele, stabilind magnetizarea de echilibru a acestora conform modelului Langevin. Referitor la comportarea sistemelor de nanoparticule în câmp magnetic variabil, inițial am definit relaxarea magnetică și susceptibilitatea magnetică complexă, apoi am stabilit expresia magnetizării de relaxare. În finalul capitolului au fost prezentate relațiile de dispersie pentru susceptibilitatea magnetică complexă, pierderile magnetice și procesele de relaxare Brown și Neel din ferrofluide. Totodată, s-a făcut referire pe scurt la teoria lui Neel asupra relaxării și rezonanței feromagnetice.

## Capitolul 3 **METODE DE CARACTERIZARE MORFOLOGICĂ ȘI STRUCTURALĂ ȘI DE INVESTIGARE A PROPRIETĂȚILOR ELECTRICE ȘI MAGNETICE ALE UNOR SISTEME DE NANOPARTICULE**

În **capitolul 3** sunt descrise metodele experimentale utilizate pentru determinarea proprietăților magnetice și electrice ale sistemelor compozite de nanoparticule investigate în teza de doctorat. Astfel, determinarea caracteristicilor magnetice statice s-a realizat utilizând metoda histeresisgrafului de curent alternativ,

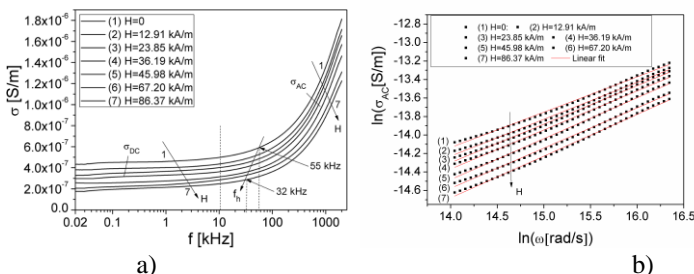
descrisă în lucrarea [10], instalația experimentală aflându-se în laboratorul de Proprietăți magnetice din cadrul Facultății de Fizică. Măsurătorile magnetice și dielectrice în câmp alternativ au fost efectuate cu metoda impedanței complexe utilizând un RLC-metru la care s-a conectat o bobină, respectiv un condensator plan, determinându-se astfel componentele  $\mu'$  și  $\mu''$  ale permeabilității magnetice complexe, respectiv componentele  $\varepsilon'$  și  $\varepsilon''$  ale permitivității dielectrice complexe ale probelor investigate. Totodată, instalația experimentală aflată în Laboratorul de materiale magneto-dielectrice, permite și determinarea dependenței de câmp magnetic a componentelor permitivității dielectrice complexe. În finalul capitolului este descrisă metoda toroidală de măsurare a susceptibilității magnetice complexe și metoda de măsurare a permeabilității magnetice complexe în câmp de microunde, dezvoltată de prof. P.C.Fannin de la Trinity College din Dublin, Irlanda, cu care Universitatea de Vest din Timișoara, colaborează cu succes de foarte mulți ani.

#### **Capitolul 4**

### **EFACTUL CÂMPULUI MAGNETIC DE POLARIZARE ASUPRA UNOR PROPRIETĂȚI ELECTRICE ALE UNUI FEROFLUID ÎN CÂMP DE JOASĂ FRECVENȚĂ**

În **Capitolul 4** al tezei, am prezentat rezultatele experimentale obținute privind influența unui câmp magnetic asupra unor proprietăți electrice ale unui ferrofluid. În studiul realizat în acest capitol [11], folosind tehnica spectroscopiei de impedanță complexă (CIS), la frecvențe joase (20 Hz-2 MHz) și temperatură constantă și la diferite valori ale câmpului magnetic de polarizare  $H$  din intervalul (0-90) kA/m, am determinat atât dependența de frecvență și câmp magnetic a conductivității electrice  $\sigma(f,H)$  cât și a permitivității dielectrice complexe,  $\varepsilon(f,H)=\varepsilon'(f,H)-i\varepsilon''(f,H)$ , pentru un ferrofluid cu particule de magnetită dispersate în petrol. De menționat că dependența de câmpul magnetic  $H$  a conductivității electrice  $\sigma(f,H)$  la temperatură constantă, a fost *determinată pentru prima dată* pentru un ferrofluid, fiind asemănătoare cu dependența de temperatură  $\sigma(f,T)$  în absența unui câmp magnetic și este în acord cu legea universală Jonscher, prezentând două regiuni: o regiune în

care  $\sigma$  nu variază cu frecvența pentru fiecare valoare constantă  $H$  a câmpului magnetic, corespunzând conductivității statice,  $\sigma_{DC}$  și o regiune de dispersie în care  $\sigma$  crește brusc cu frecvența, depinzând de câmpul  $H$ , corespunzând conductivității dinamice,  $\sigma_{AC}$  (Fig. 4.1 a).



**Figure 4.1.** a) Variația cu frecvența a conductivității  $\sigma$  a ferofluidului; b) dependența experimentală  $\ln\sigma_{ac}(\ln\omega)$  la diferite valori  $H$  ale câmpului magnetic de polarizare.

După cum se poate observa din Fig. 4.1 a), componenta  $\sigma_{DC}$  depinde doar de câmpul magnetic  $H$ , aplicat ferofluidului, rămânând aproximativ constantă cu frecvența până la aproximativ 10 kHz. Creșterea câmpului magnetic de polarizare de la  $H=0$  la  $H=86.37$  kA/m, duce la scăderea conductivității  $\sigma_{DC}$ , de la  $4.5 \cdot 10^{-7}$  S/m la  $1.9 \cdot 10^{-7}$  S/m pentru ferofluidul investigat. Valorile obținute pentru  $\sigma_{DC}$  pentru fiecare valoare  $H$  a câmpului magnetic sunt în concordanță cu cele obținute în lucrarea [12] pentru un ferofluid similar.

Componenta  $\sigma_{AC}$  a conductivității electrice depinde atât de frecvență cât și de câmpul magnetic aplicat  $H$  (vezi Fig. 4.1 a)), fiind corelată cu procesele de relaxare determinate de purtătorii de sarcină electrică localizată din probă [13, 14] și este data de relația:

$$\sigma_{AC} = A_0 \omega^n \quad (4.1)$$

unde  $A_0$  este un factor pre-exponențial și  $n$  este un exponent dependent de câmp magnetic, ( $0 < n < 1$ ) [15] așa cum se observă și în Fig. 4.1 a). Prin logaritizarea ecuației (4.1), rezultă o dependență liniară între  $\ln\sigma_{AC}$  și  $\ln\omega$ , care este prezentată în Figura 4.1 b) la toate

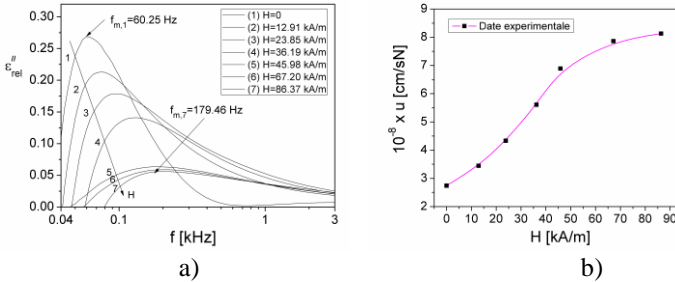
valorile  $H$  ale câmpului magnetic de polarizare, pentru proba de ferrofluid investigată.

Prin fitarea dependențelor experimentale,  $\ln(\sigma_{AC})/\ln(\omega)$ , din Fig. 4.1 b), cu o linie dreaptă, am determinat atât parametrul  $A_0$ , cât și exponentul  $n$ , corespunzător fiecărei valori  $H$ . Mecanismele de conducție electrică din ferrofluid datorate saltului purtătorilor de sarcină între stările localizate precum și dependența de câmpul magnetic  $H$  a conductivității au fost analizate utilizând atât modelul teoretic VRH (*variable range hopping*) al lui Mott [13] (de la frecvențe joase), cât și modelul CBH (*corellated barrier hopping*) [14] de la frecvențe înalte. Pe baza acestor modele teoretice am stabilit o ecuație care permite determinarea distanței de salt  $R_h$ , a purtătorilor de sarcină între stările localizate, valabilă pentru materiale compozite și aplicată *pentru prima dată probei de ferrofluid* investigat:

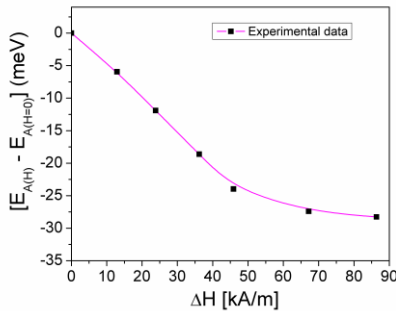
$$R_h = \frac{3}{4} \left( \frac{e^2}{6\pi\alpha k_B T} \right)^{1/2} \cdot \frac{(\sigma_{DC})^{1-n}}{(A_0)^{1/2n}} \quad (4.2)$$

Câmpul  $H$  determină creșterea distanței de salt  $R_h$  de la 11.92 nm (pentru  $H = 0$ ) la 14.09 nm (pentru  $H = 86.37$  kA/m), valorile fiind comparabile cu diametrul magnetic mediu  $d_m$ , al particulelor de ferrofluid (11.48 nm). Rezultatul obținut arată că mecanismul de conducție la joasă frecvență (DC-conductivity) se realizează prin procesul de salt între stările localizate datorită mecanismului VRH a lui Mott [13] în interiorul particulelor de magnetită din ferrofluid, fiind puternic influențat de prezența câmpului magnetic,  $H$ . Câmpul  $H$  determină creșterea distanței de salt  $R_h$ , ceea ce va duce la un număr mai mic de purtători de sarcină care participă la conducția electrică și deci la scăderea conductibilității prin creșterea lui  $H$ , ceea ce s-a observat și experimental.

Rezultatele obținute privind dependența permitivității dielectrice complexe atât de frecvență cât și de câmp magnetic,  $\varepsilon(f,H)$  indică existența procesului de relaxare de tip Schwarz în ferrofluid, după eliminarea pierderilor prin conducție (Fig. 4.2 a)), determinându-se astfel, *pentru prima dată, dependența de câmp magnetic a mobilității mecanice  $u(H)$*  a ionilor de pe suprafața particulei, care crește prin creșterea lui  $H$  (Fig. 4.2. b)).



**Figura 4.2.** a) Dependența de frecvență a componentei imaginare,  $\epsilon''_{rel}$  datorate relaxării dielectrice pentru proba de ferrofluid; b) dependența de câmpul magnetic de polairizare a mobilității mecanice a ionilor  $u$ , pe suprafața particulelor din ferrofluid



**Figura 4.3.** Dependența de variația  $\Delta H$  a câmpului magnetic, a variației energiei de activare a relaxării Schwarz în prezența câmpului magnetic ( $E_{A(H)} - E_{A(H=0)}$ ) a probei de ferrofluid

De asemenea, a fost propusă o metodă originală de evaluare a energiei de activare a procesului de relaxare Schwarz în prezența câmpului magnetic polarizant,  $E_{A(H)}$  comparativ cu energia de activare în câmp zero,  $E_{A(H=0)}$ , la temperatura camerei. Rezultatele arată că prin aplicarea câmpului magnetic,  $E_{A(H)}$  scade față de  $E_{A(H=0)}$  cu aproximativ 30 meV (la variația maximă a câmpului  $\Delta H=86.37$  kA/m (Fig. 4.3), ceea ce indică o reducere a mobilității ionilor pe

suprafața particulelor coloidale, deci o scădere a polarizării ferofluidului, acest rezultat fiind în acord investigațiile experimentale electrice și dielectrice obținute.

Aceste rezultate au fost publicate recent în *Materials Research Bulletin* revistă cu factor ISI, autori, I. Malaescu, M. O. Bunoiu, **Alexandrina Teusdea**, C. N. Marin, *Investigations on the electrical conductivity and complex dielectric permittivity of a ferrofluid subjected to the action of a polarizing magnetic field*, *Materials Research Bulletin*, 164 (2023) 112281 [11].

## **Capitolul 5**

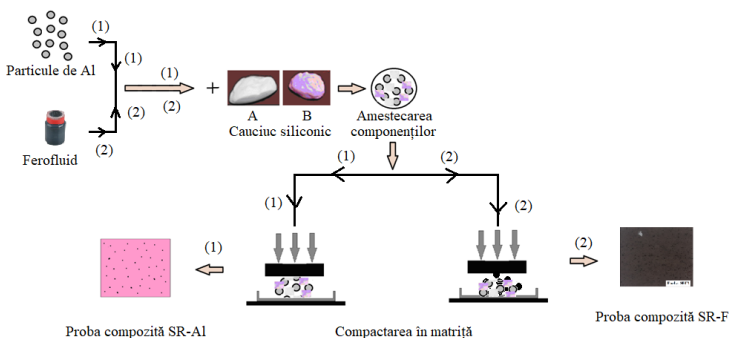
### **STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND**

### **PROPRIETĂȚILE ELECTRICE ȘI MAGNETICE ALE UNOR**

### **SISTEME COMPOZITE DE TIP ELASTOMER ÎN CÂMP DE**

### **JOASĂ FRECVENȚĂ**

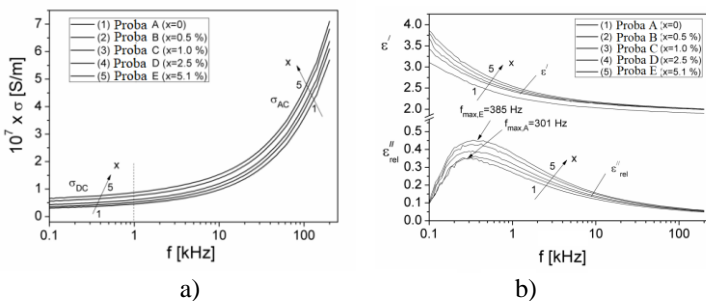
**Capitolul 5** prezintă două studii referitoare la proprietățile electrice și magnetice ale unor sisteme compozite de nano/microparticule, prin amestecul unui cauciuc siliconic (silicone rubber-SR), tip RTV-530 de la firma Prochima [16] cu particule de aluminiu, de diferite concentrații volumice,  $x$ , respectiv cu un ferofluid, etapele procesului de preparare a probelor compozite SR- $x$ Al ( $x$ -fracția volumică) respectiv SR-F fiind arătate în Fig. 5.1.



**Figura 5.1.** Etapele procesului de preparare a probelor compozite

În primul studiu, pentru cele 5 probe compozite de tip elastomer, preparate prin amestecarea cauciucului silionic comercial (tip RTV-530) cu microparticule de Al în diferite concentrații, s-a urmărit determinarea conductivității electrice ( $\sigma$ ) și a permitivității dielectrice complexe ( $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ ), a probelor obținute, pe baza măsurătorilor de impedanță complexă ( $Z$ ) în câmp de joasă frecvență (100 Hz – 200 kHz).

Spectrul de conductivitate,  $\sigma(f)$ , pentru fiecare fracție volumică  $x$ , a particulelor de Al din proba compozită (Fig. 5.2 a)), respectă legea universală Jonscher. În prima regiune de frecvență joasă,  $\sigma$  tinde la o valoare constantă și nu depinde de frecvență, corespunzătoare conductivității DC ( $\sigma_{DC}$ ). Valorile numerice ale conductivității  $\sigma_{DC}$  au fost determinate pe baza diagramelor de impedanță Nyquist,  $Z''(Z')$  și a parametrilor de fitare corespunzători modelului electric echivalent pentru fiecare probă. Ca urmare, creșterea fracției volumice de la  $x=0$  la  $x=5,1\%$ , duce la o creștere a conductivității  $\sigma_{DC}$  a probelor de la  $2,637 \cdot 10^{-8}$  S/m până la  $5,725 \cdot 10^{-8}$  S/m [17].



**Figura 5.2.** a) Dependența de frecvență a conductivității  $\sigma$ , la diferite fracții volumice,  $x$  a particulelor de Al dispersate în materialul compozit; b) Dependența de frecvență a componentei reale  $\varepsilon'$  și a componentei imaginare,  $\varepsilon''_{rel}$  datorată relaxării dielectrice a probelor compozite

Pe baza modelului teoretic a lui Mott, *variable range-hopping* (VRH) și a măsurătorilor de conductivitate electrică, am determinat *pentru prima dată*, pentru probele compozite de tip

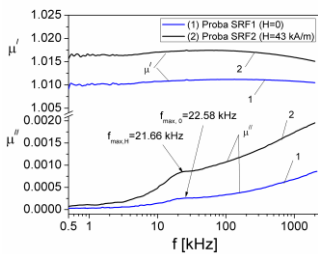


elastomer, distanța de salt  $R_h$ , a purtătorilor de sarcină între stările localizate, utilizând aceeași ecuație (4.2) stabilită în cap. 4 pentru o probă de ferofluid, valorile  $R_h$  scăzând de la 7.3 nm la 5.92 nm când fracția volumică  $x$  crește de la 0 la 5.1%.

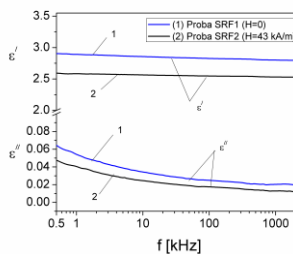
Din măsurătorile de permitivitate dielectrică complexă, după eliminarea pierderilor prin conducție, componenta imaginară  $\mathcal{E}_{rel}''$ , corespunzătoare proceselor de relaxare dielectrică din probe prezintă un maxim pentru fiecare fracție volumică  $x$  (Fig. 5.6 b)) la frecvența de relaxare,  $f_{max}$ , care trece de la 301 Hz la 385 Hz, când  $x$  crește de la  $x=0$  la  $x=5,1\%$ , ceea ce indică existența unui proces de relaxare la joasă frecvență. Rezultatele pot fi utile în proiectarea dispozitivelor și circuitelor electronice flexibile și elastice.

Aceste rezultate au fost publicate recent în *Materials* revistă cu factor ISI, autori, **Alexandrina Teusdea**, I. Malaescu, P. Sfirloaga, C. N. Marin, *Electric and Dielectric Properties in Low-Frequency Fields of Composites Consisting of Silicone Rubber and Al Particles for Flexible Electronic Devices*, *Materials*, 15 (2022) 2309 (15pp) [17].

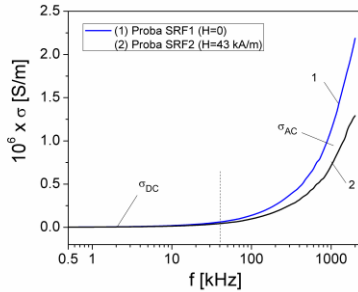
În cel de-al doilea studiu au fost preparate 2 probe compozite de tip elastomer, prin amestecarea cauciucului silionic comercial (tip RTV-530) cu aceeași cantitate dintr-un ferofluid cu particule de magnetită, la care polimerizarea (întărirea) uneia din probe s-a realizat în absența câmpului magnetic  $H$  (proba SRF1) iar polimerizarea în cazul celeilalte probe s-a realizat în prezența unui câmp magnetic  $H=43 \text{ kA/m}$  (proba SRF2).



a)



b)



c)

**Figura 5.3.** Dependența de frecvență a componentelor reale,  $\mu'$  și imaginare,  $\mu''$  ale permeabilității magnetice complexe (a), respectiv ale a componentelor reale,  $\varepsilon'$  și imaginare,  $\varepsilon''$  ale permitivității dielectrice complexe (b) c) dependența de frecvență a conductivității electrice  $\sigma$  ale probelor compozite SRF1 și SRF2

Rezultatele obținute pentru permeabilitatea magnetică complexă a probelor compozite, arată un maxim al componentei imaginare  $\mu''$ , atât pentru proba SRF1 fabricată în absența câmpului magnetic cât și pentru proba SRF2 fabricată în prezența unui câmp magnetic,  $H$  (Fig. 5.3 a)). Aceste maxime au fost asociate cu procesul de relaxare brownian din ferrofluidul rămas în veziculele de cauciuc siliconic din materialul compozit. Pe baza măsurătorilor de permitivitate dielectrică complexă (Fig. 5.3. b)) am determinat conductivitatea electrică a celor două probe compozite, iar spectrele de conductivitate ale probelor,  $\sigma(f)$  respectă legea universală Jonscher (Fig. 5.3 c)), permițând determinarea componentei statice,  $\sigma_{DC}$  a conductivității compozitului, valorile obținute fiind apropiate:  $\sigma_{DC} = 1.72 \cdot 10^{-9} S/m$  pentru proba SRF1 și respectiv  $\sigma_{DC} = 1.21 \cdot 10^{-9} S/m$  pentru proba SRF2.

Pe baza răspunsului universal Jonscher și a modelului teoretic CBH (*correlated barrier hopping*) am evaluat pentru prima dată energia de barieră a procesului de conducție electrică, valoarea,  $W_m$  corespunzătoare probei fabricate în prezența câmpului magnetic ( $W_{m(SRF2)} = 2.62 eV$ ) fiind mai mare decât valoarea  $W_m$  a probei SRF1 fabricată în absența câmpului magnetic ( $W_{m(SRF1)} = 2.51 eV$ ), în acord cu rezultatele experimentale obținute pentru conductivitatea

electrică. Rezultatele studiului au o importanță practică fiind utile în realizarea unor dispozitive electrice sau magnetice pe bază de compozite de tip elastomer cu proprietăți prestabilite, controlate din exterior de un câmp magnetic, în vederea utilizării lor în anumite aplicații tehnologice.

Aceste rezultate au fost comunicate la Physics Conference TIM-22, 23-25 Nov. Timișoara 2022 autori, I. Malaescu, **Alexandrina Teușdea**, O. M. Bunoiu, C. N. Marin, *Investigations of some electromagnetic properties in low frequency field of the silicone rubber/ferrofluid composite*, Totodată, o parte din rezultate au fost publicate în *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, în 2021, autori: C.N. Marin, I. Malaescu, P. Sfirloaga, **Alexandrina Teușdea**, *Electric and magnetic properties of a composite consisting of silicone rubber and ferrofluid*, J. Ind. Eng. Chem. 101 (2021) 405–413 [9].

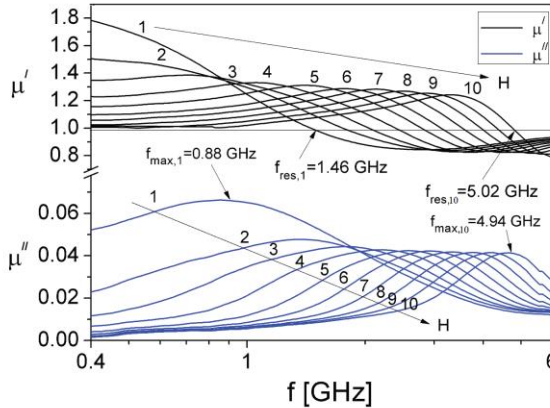
## **Capitolul 6**

### **STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND PROPRIETĂȚILE MAGNETICE ȘI RATA SPECIFICĂ DE ABSORBȚIE (SAR) A UNUI FERROFLUID ÎN CÂMP DE MICROUNDRE**

În acest capitol, utilizând măsurătorile de permeabilitate magnetică complexă,  $\mu(f, H) = \mu'(f, H) - i\mu''(f, H)$  în domeniul microundelor la frecvențe  $f$ , cuprinse între (0.4 - 6) GHz și în prezența unui câmp magnetic de polarizare,  $H$  cu valori situate între (0 -102) kA/m, pentru un ferrofluid cu nanoparticule de magnetită dispersate în petrol, am efectuat următoarele două studii: 1) determinarea unor parametri magnetici ai nanoparticulelor din ferrofluid în câmp de microunde; 2) efectul câmpului magnetic de polarizare asupra ratei specifice de absorbție (SAR) a ferrofluidului, în domeniul microundelor.

În primul studiu, în intervalul de frecvență investigat, a fost evidențiat fenomenul de rezonanță feromagnetică, indicat de trecerea de la o valoare supraunitară la o valoare subunitară a părții reale a permeabilității magnetice complexe,  $\mu'(f)$ , la frecvența de rezonanță,  $f_{res}$ , care se deplasează spre valori mai mari, de la 1,46 GHz la 5,02 GHz prin creșterea câmpului  $H$ . Componenta imaginară  $\mu''(f)$ , are un

maxim la o frecvență  $f_{\max}$ , apropiată de frecvența de rezonanță, numită frecvență maximă de absorbție și care se mută către valori mai mari, de la 0,88 GHz la 4,94 GHz, prin creșterea câmpului magnetic polarizant  $H$  (Fig. 6.1).



**Figura 6.1.** Dependența de frecvență a componentelor permeabilității magnetice complexe, pentru 10 valori diferite  $H$  ale câmpului magnetic de polarizare: (1) 0 kA/m; (2) 15.23 kA/m; (3) 24.46 kA/m; (4) 35.28 kA/m; (5) 46.18 kA/m; (6) 57.07 kA/m; (7) 68.49 kA/m; (8) 79.33 kA/m; (9) 90.66 kA/m and (10) 102.40 kA/m.

Din dependența de câmpul magnetic de polarizare  $H$  atât a frecvenței  $f_{res}$  cât și a raportului  $f_{\max}/f_{res}$  am determinat câmpul de anizotropie,  $H_A$ , constanta de anizotropie efectivă  $K_{eff}$ , a nanoparticulelor de magnetită din ferrofluid, raportul giromagnetic  $\gamma$ , parametrul de amortizare,  $\alpha$ , factorul de desplicare spectroscopică,  $g$  și vâscozitatea magnetică internă  $\eta_m$ , a nanoparticulelor din ferrofluid, valori indicate în Tabelul 6.1.

**Tabelul 6.1.** Parametrii magnetici ai nanoparticulelor ferrofluidului obținuți din măsurători de permeabilitate magnetică complexă în domeniul microundelor

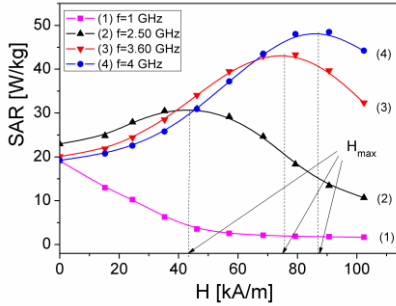
Parametrul	$H_A$ [kA/m]	$K_{eff}$ [Jm <sup>-3</sup> ]	$\gamma = [s^{-1}A^{-1}m]$	$\alpha$	g	$\eta_m$ [Nsm <sup>-2</sup> ]
Valoarea	39.04	$1.17 \cdot 10^4$	$2.23 \cdot 10^5$	0.114	2.007	$1.95 \cdot 10^6$

Prin interacțiunea probei de ferrofluid cu câmpul de microunde, are loc o absorbție de energie ce va conduce la încălzirea ferrofluidului. Ca efect al absorbției de energie de către ferrofluid de la câmpul magnetic variabil, în cel de-al doilea studiu am determinat puterea specifică și rata de încălzire ( $\Delta T/\Delta t$ ) a ferrofluidului folosind o relație modificată, în care spre deosebire de alți autori, am ținut cont de faptul că ferrofluidul este un sistem compozit format din mai mulți constituenți, *astfel că, am considerat că  $\rho$  este densitatea sistemului compozit*, adică a ferrofluidului, nu a particulelor dispersate din ferrofluid [18, 19]. Ca urmare, și calculul privind determinarea ratei specifice de absorbție (SAR) este mult mai exact, efectuat cu noua relație:

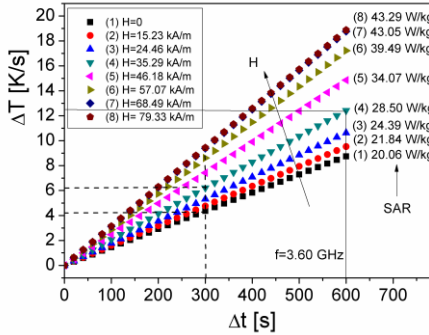
$$SAR = c_{eff} \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{(1-\phi)\rho_L + \phi\rho_S} p_m = \frac{1}{\rho_F} p_m \quad (6.1)$$

în care s-a ținând cont de densitatea sistemului compozit  $\rho_F$  și nu doar de densitatea particulelor solide dispersate,  $\rho_S$  [18].

Rezultatele obținute arată că rata specifică de absorbție (SAR), depinde de câmpul magnetic  $H$ , prezentând un maxim la frecvențe  $f_{max}$ , specifice fiecărei valori  $H$  a câmpului magnetic aplicat, situate între (1.7 - 5) GHz. Pentru o frecvență constantă din intervalul (1,7 - 5) GHz, SAR crește odată cu creșterea câmpului  $H$ , pentru  $H < H_{max}$ . Pentru valori ale lui  $H > H_{max}$ , așa cum se vede în Fig. 6.3, SAR scade prin creșterea intensității câmpului magnetic. Acest rezultat este foarte util în aplicațiile de hipertermie magnetică deoarece oferă informații despre limita maximă a câmpului magnetic aplicat pentru controlul SAR la frecvențe diferite.



a)



b)

**Figura 6.2.** Dependența ratei specifice de absorbție (SAR) de câmpul magnetic de polarizare  $H$ , la diferite frecvențe  $f$ , ale câmpului de microunde; b) variația temperaturii  $\Delta T$ , a probei de ferrofluid în funcție de intervalul de timp,  $\Delta t$ , de aplicare a câmpului de microunde, la frecvențe  $f=3.6\text{ GHz}$  pentru 8 valori diferite ale câmpului magnetic de polarizare,  $H$ .

Pe baza valorilor ratei de încălzire obținute, s-a obținut dependența de timp  $\Delta t$ , a creșterii temperaturii  $\Delta T$ , a probei investigate, pentru diferite valori  $H$  și SAR corespunzătoare intervalului  $H \leq H_{\max}$ , (vezi Fig. 6.2 a)) la frecvența constantă  $f=3.6\text{ GHz}$ . Rezultatele obținute sunt arătate în Figura 6.2 b). Se

observă că creșterea  $\Delta T$  a temperaturii probei de ferrofluid, are o dependență liniară de timp și de asemenea depinde și de frecvența câmpului  $f$  și valoarea câmpului  $H$ . Rezultatele obținute indică faptul că atât rata specifică de absorbție SAR cât și creșterea temperaturii  $\Delta T$  a unei probe de ferrofluid, poate fi controlată prin aplicarea unui câmp magnetic polarizant,  $H$ , rezultatul fiind util în aplicații biomedicale, precum tratamentul cancerului prin hipertermia magnetică a țesuturilor și alte aplicații termice.

Rezultatele au fost prezentate la Conferința internațională, *4th International Summer School and Workshop "Complex and Magnetic Soft Matter Systems: Physico-Mechanical Properties and Structure"*, 19-23 April 2021, West University of Timisoara, Romania (prezentare orală), **Alexandrina Teusdea**, P. C. Fannin, I. Malaescu, C. N. Marin, *The effect of a polarizing magnetic field on the dynamic properties and of the specific absorption rate of ferrofluids in the microwave range* [20] și apoi lucrarea a fost publicată în *Soft Materials*, în 2022, **Alexandrina Teusdea**, P. C. Fannin, I. Malaescu, C. N. Marin, *The effect of a polarizing magnetic field on the dynamic properties and of the specific absorption rate of a ferrofluid in the microwave range*, *Soft Materials*, 20(S1) (2022) S19–S29 [18].

În finalul tezei de doctorat sunt prezentate concluziile generale și contribuțiile originale, lista lucrărilor științifice, rezumatul în limba română și engleză și lucrările ISI publicate.

### **Concluziile generale și contribuții originale**

Rezultatele cele mai importante pe care le-am obținut din cercetările efectuate sunt următoarele:

- 1.** Pentru măsurători am utilizat 3 probe de ferrofluid cu particule de magnetită dispersate în petrol și am preparat 7 probe compozite de tip elastomer, dintre care 5 probe obținute prin amestecul unui cauciuc siliconic comercial (RTV-530 de la firma Prochima) cu particule de Al de concentrații  $x$  diferite, notate (SR- $x$ Al) și 2 probe obținute prin amestecul cauciucului siliconic RTV-530 cu aceeași cantitate de ferrofluid, notate SRF1 și SRF2, însă polimerizarea probei SRF2 s-a făcut în prezența unui câmp magnetic  $H$ .

2. În vederea evidențierii proceselor de relaxare magnetică în cele 2 probe compozite de tip elastomer SRF1 și SRF2, pe bază de cauciuc siliconic cu ferrofluid, am efectuat măsurători de permeabilitate magnetică complexă în domeniul de joasă frecvență (100 Hz–2 MHz). Rezultatele obținute arată un maxim al componentei imaginare  $\mu''$ , la frecvența de 22,58 kHz pentru proba SRF1 fabricată în absența câmpului magnetic și 21,66 kHz pentru proba SRF2 fabricată în prezența unui câmp magnetic,  $H=43$  kA/m. Aceste maxime au fost asociate cu procesul de relaxare brownian din ferrofluidul rămas în veziculele de cauciuc siliconic din materialul compozit.

3. Pentru un ferrofluid cu particule de magnetită dispersate în petrol, am investigat proprietățile magnetice în câmp de microunde. În acest sens, au fost efectuate măsurători de permeabilitate magnetică complexă în câmp de microunde (0.5 – 6) GHz, și la diferite valori ale câmpului magnetic de polarizare,  $H$ , cuprinse între 0 și 102 kA/m, utilizând în acest scop tehnica liniei coaxiale scurtcircuitate, a lui Fannin. Cunoscând valorile obținute pentru  $\mu''$  în câmp de microunde, am calculat rata specifică de absorbție (SAR) a ferrofluidului, folosind *o nouă ecuație valabilă pentru calculul SAR al oricărui sistem compozit*, deci și al ferrofluidului investigat. Această ecuație oferă un calcul mai precis al SAR prin faptul că ia în considerare densitatea ferrofluidului  $\rho_F$ , spre deosebire de alți autori care iau în considerare doar densitatea particulelor solide dispersate în ferrofluid,  $\rho_s$ .

4. Rezultatele arată că SAR prezintă un maxim la o valoare a câmpului magnetic polarizant,  $H_{max}$ , care, prin creșterea frecvenței,  $f$  se deplasează spre valori mai mari de la 44 kA/m (pentru frecvența 2,5 GHz) la 88 kA/m (pentru frecvența 4 GHz), din intervalul (1,7 - 5) GHz. Pentru valori ale lui  $H > H_{max}$ , SAR scade prin creșterea intensității câmpului magnetic, rezultatul fiind foarte util în aplicațiile de hipertermie magnetică deoarece oferă informații despre limita maximă a câmpului magnetic aplicat pentru controlul SAR la frecvențe diferite.

5. În vederea determinării proprietăților electrice (conductivitatea electrică  $\sigma$  și permitivitatea dielectrică complexă,  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ ), ale probelor de ferrofluid și ale probelor compozite de tip elastomer preparate, am realizat măsurători de impedanță



complexă în domeniul de frecvențe (20 Hz - 2 MHz) și la diferite valori ale câmpului magnetic  $H$  din domeniul (0-90) kA/m.

**6.** Mecanismul de conducție statică din proba de ferrofluid, a fost explicat utilizând modelul teoretic VRH (*variable-range-hopping*) a lui Mott. În acest sens, am stabilit *pentru prima dată*, o ecuație care permite determinarea distanței de salt  $R_h$ , a purtătorilor de sarcină între stările localizate, valabilă pentru materiale compozite și ca urmare, am aplicat-o *pentru prima dată probei de ferrofluid* investigat, feofluidul fiind un material compozit. Rezultatele arată că  $R_h$  crește prin creșterea lui  $H$ , ceea ce face ca un număr mai mic de purtători de sarcină să participe la procesul de salt între stările localizate conducând astfel la scăderea conductivității  $\sigma_{DC}$  prin creșterea lui  $H$ .

**7.** Rezultatele obținute arată existența procesului de relaxare Schwarz în proba de ferrofluid, după eliminarea pierderilor de conducție, determinându-se astfel, *pentru prima dată*, *dependența de câmp magnetic a mobilității mecanice  $u(H)$*  a ionilor de pe suprafața particulei, care crește prin creșterea lui  $H$ . Totodă, *a fost propusă o metodă originală* de evaluare a energiei de activare a procesului de relaxare Schwarz în prezența câmpului magnetic polarizant,  $E_{A(H)}$  comparativ cu energia de activare în câmp zero,  $E_{A(H=0)}$ , la temperatura camerei. Rezultatele arată că prin aplicarea câmpului magnetic  $H$ ,  $E_{A(H)}$  scade față de energia de activare în câmp zero  $E_{A(H=0)}$ , cu aproximativ 30 meV (la o variație a câmpului de 86.37 kA/m).

**8.** Pentru materialele compozite preparate prin amestecarea cauciucului silionic (RTV-530) cu particule de Al cu fracții volumice  $x$ , diferite  $x=(0; 0,5\%; 1\%; 2,5\%$  și  $5,1\%)$ , utilizând măsurătorile de impedanță complexă, în domeniul de joasă frecvență (100 Hz - 200 kHz), am investigat atât conductivitatea electrică ( $\sigma$ ) cât și permitivitatea dielectrică ( $\epsilon$ ) a probelor compozite.

**9.** Pe baza măsurătorilor  $Z'$  și  $Z''$  ale componentelor impedanței complexe, am determinat spectrul de conductivitate,  $\sigma(f)$  care urmează legea universală Jonscher pentru fiecare valoare a fracțiunii volumice  $x$  de particule de Al din probe. Folosind valorile conductivității statice ( $\sigma_{DC}$ ) și modelul teoretic VRH (*variabil-range-hopping*) a lui Mott, am determinat și pentru aceste probe compozite distanța de salt  $R_h$  a purtătorilor de sarcină, care scade odată cu

creșterea fracției volumice de la 7,30 nm (pentru x=0. ) la 5,92 nm (pentru x=5,1%).

**10.** Pentru materialele compozite preparate prin amestecarea cauciucului siliconic (RTV-530) cu un ferofluid cu particule de magnetită dispersate în petrol având aceeași fracție volumică de particule ( $\varphi=4,32\%$ ), însă polimerizarea probei făcându-se în absența câmpului magnetic (proba SRF1) cât și în prezența câmpului magnetic (proba SRF2), folosind măsurătorile de impedanță complexă, în câmp de joasă frecvență între (0,5 kHz-2 MHz), s-au determinat spectrele de conductivitate  $\sigma(f)$  pentru probele compozite investigate, care respectă legea universală Jonscher. Din aceste dependențe  $\sigma(f)$ , am determinat componenta statică  $\sigma_{DC}$  a conductivității compozitului, valorile obținute fiind apropiate:  $\sigma_{DC} = 1.72 \cdot 10^{-9} S/m$  pentru proba SRF1 și respectiv  $\sigma_{DC} = 1.21 \cdot 10^{-9} S/m$  pentru proba SRF2.

**11.** Pe baza răspunsului universal Jonscher și a modelului teoretic CBH (*correlated barrier hopping*) am evaluat pentru prima dată energia de barieră a procesului de conducție electrică, obținând valorile,  $W_{m(SRF1)}=2.51 eV$  și  $W_{m(SRF2)}=2.62 eV$ , ceea ce arată că valoarea  $W_m$  corespunzătoare probei fabricate în prezența câmpului magnetic (proba SRF2) este mai mare decât valoarea  $W_m$  a probei SRF1 fabricată în absența câmpului magnetic, în acord cu rezultatele experimentale obținute pentru conductivitatea electrică.

**12.** Rezultatele obținute sunt foarte utile atât pentru fabricarea compozitelor cu proprietăți prestabilite, în absența sau prezența unui câmp magnetic, cât și pentru posibilitatea utilizării acestor materiale în anumite aplicații tehnologice, precum dispozitive electrice sau magnetice controlate din exterior de un câmp magnetic sau de fracția volumică a particulelor din compozite.

**Cuvinte cheie:** ferofluid; sistem compozit de nanoparticule; procese de relaxare; permeabilitate magnetica complexa; permitivitate dielectrica complexa; impedanță complexă; conductivitate electrică.

## Bibliografie

- [1] S. Kumar, R. Purohit, M. M. Malik, *Properties and applications of polymer matrix nano composite materials*, Mater. Today: Proceedings, 2 (2015) 3704e3711.
- [2] I. Malaescu, C. N. Marin, *Study of magnetic fluids by means of magnetic spectroscopy*, Physica B, 365 (2005) 134–140
- [3] T. Fornes, P. Yoon. H. Keskkula, D. Paul, *Nylon 6 nanocomposites: the effect of matrix molecular weight*, Polymer, 42(25) (2001) 09929–09940.
- [4 ] L. K. Namitha, J. Chameswary, S. Ananthakumar, M. T. Sebastian, *Effect of micro- and nano-fillers on the properties of silicone rubber-alumina flexible microwave substrate*, Ceram. Int., 39 (2013) 7077–7087
- [5] G. Stiubianu, A. Bele, M. Cazacu, C. Racles, S. Vlad, M. Ignat, *Dielectric silicone elastomers with mixed ceramic nanoparticles*, Mater. Res. Bull., 71 (2015) 67–74
- [6] C. Huang, Q. M. Zhang, *Fully functionalized high dielectric constant nanophase polymers with high electromechanical response*, Adv. Mater., 17 (2005) 1153–1158.
- [7] E. Luca, Gh. Calugaru, R. Radulescu, C. Cotae, V.Badescu, *Ferofluid si aplicatiile lor in industrie*, Ed.Tehnica, Bucuresti, (1978)
- [8] P. C. Fannin, C. N. Marin, I. Malaescu, *The Influence of Particle Concentration and Polarizing Field on the Resonant Behaviour of Magnetic Fluids*. J. Phys. Condensed Matter. 15(27) (2003) 4739–4750
- [9] C.N. Marin, I. Malaescu, P. Sfirloaga, **Alexandrina Teusdea**, *Electric and magnetic properties of a composite consisting of silicone rubber and ferrofluid*, J. Ind. Eng. Chem. 101 (2021) 405–413
- [10] A. Ercuta, *Sensitive AC hysteresigraph of extended driving field capability*, IEEE Trans. Instrum. Measur. 69 (4) (2020) 1643–1651.
- [11] I. Malaescu, M. O. Bunoiu, **Alexandrina Teusdea**, C. N. Marin, *Investigations on the electrical conductivity and complex dielectric permittivity of a ferrofluid subjected to the action of a polarizing magnetic field*, Materials Research Bulletin, 164 (2023) 112281

- [12] C. N. Marin, P. C. Fannin, I. Malaescu, Georgeta Matu, *Macroscopic and microscopic electrical properties of a ferrofluid in a low frequency field*, Phys. Lett. A, 384 (2020) 126786
- [13] N.F. Mott, E.A. Davis, *Electronic Processes in Non crystalline Materials*, Oxford Clarendon, 1979.
- [14] S.R. Elliot, *A.c. conduction in amorphous chalcogenide and pnictide semiconductors*, Adv. Phys., 36 (1987) 135–217.
- [15] A.K. Jonscher, *Universal Relaxation Law*, 1st Edn, Chelsea Dielectrics Press, London, 1996.
- [16] \*\*\*\*\*<http://www.prochima.com/ENG/product.asp?id=7>
- [17] **Alexandrina Teusdea**, I. Malaescu, P. Sfirloaga, C. N. Marin, *Electric and Dielectric Properties in Low-Frequency Fields of Composites Consisting of Silicone Rubber and Al Particles for Flexible Electronic Devices*, Materials, 15 (2022) 2309 (15pp).
- [18] **Alexandrina Teusdea**, P. C. Fannin, I. Malaescu, C. N. Marin, *The effect of a polarizing magnetic field on the dynamic properties and of the specific absorption rate of a ferrofluid in the microwave range*, Soft Materials, 20(S1) (2022) S19–S29
- [19] C. N. Marin, I. Malaescu, P. C. Fannin, *Theoretical Evaluation of the Heating Rate of Ferrofluids*. J. Therm. Anal. Calorim., 119(2) (2015) 1199–1203.
- [20] **Alexandrina Teusdea**, P. C. Fannin, I. Malaescu, C. N. Marin, *The effect of a polarizing magnetic field on the dynamic properties and of the specific absorption rate of ferrofluids in the microwave range*, 4th International Summer School and Workshop "Complex and Magnetic Soft Matter Systems: Physico-Mechanical Properties and Structure", 19-23 April 2021, West University of Timisoara, Romania (prezentare orală)