

Universitatea “Alexandru Ioan Cuza” IAȘI
Facultatea de Fizică

Studiul experimental al proprietăților dielectrice neliniare în
ceramici feroelectrice și realizarea de aplicații

Pop Mihai – Valentin

Teză susținută în vederea obținerii titlului de Doctor în Fizică

Conducător științific:
Prof. Univ. Dr. Liliana Mitoșeriu

IAȘI 2015

Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

RECTORAT

Anunț

Vă facem cunoscut că în data de **28.09.2015**, ora **9:00**, în sala **L1**, domnul **Mihai – Valentin Pop** va susține, în ședință publică, teza de doctorat cu titlul

“Studiul experimental al proprietăților dielectrice neliniare în ceramici feroelectrice și realizarea de aplicații”

în vederea obținerii titlului științific de doctor în domeniul fundamental Științe Exacte, domeniul FIZICĂ.

Comisia de doctorat are următoarea componență:

Președinte:

Prof. Univ. Dr. **Diana Mardare**, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

Conducător științific:

Prof. Univ. Dr. **Liliana Mitoșeriu**, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

Referenți:

Prof. Univ. Dr. **Horia Alexandru**, Universitatea din București

Prof. Univ. Dr. Ing. **Daniel Mircea Sutiman**, Universitatea Tehnică “Gh. Asachi” Iași

Conf. Univ. Dr. Habil. **Laurențiu Stoleriu**, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

Cuprins

I. Introducere în feroelectricitate	2
I.1. Scurt istoric.....	2
I.2. Noțiuni specifice studiului materialelor feroelectrice.....	2
I.3. Materiale feroelectrice.....	3
I.4. Proprietățile feroelectricilor	4
I.5. Aplicații ale materialelor feroelectrice	4
II. Proprietăți dielectrice neliniare în ceramici feroelectrice	4
II.1. Metode de caracterizare a proprietăților dielectrice	4
II.2. Măsurarea răspunsului electric	5
II.3. Interfață de tensiune înaltă pentru măsurarea proprietăților dielectrice...5	
II.4. Ceramici feroelectrice pe bază de BaTiO ₃	6
III. Studiul potențialului aplicativ al caracterului neliniar în BaSnTiO₃ ceramic	7
III.1. Răspunsul dielectric neliniar în perspectivă spectrală.....	7
III.2. Evaluarea răspunsului dielectric neliniar în ceramici de tip BSnT	8
III.3. Realizarea unui mixer de semnale RF cu feroelectric	8
IV. Concluzii	10

I. Introducere în feroelectricitate

I.1. Scurt istoric

Feroelectricitatea ca domeniu de studiu a apărut în 1920, când Joseph Valasek a adus la cunoștința comunității științifice faptul că sarea Rochelle (*tartratul dublu de sodiu și potasiu*) posedă *polarizație permanentă în stare naturală*, publicând totodată imaginea primului ciclu de histerezis feroelectric. În 1922 a publicat și primul grafic al răspunsului piezoelectric în funcție de temperatură al sării Rochelle care indică existența a două tranziții de fază structurale în acest material. Proprietăți feroelectrice asemănătoare au fost descoperite în 1935 la fosfatul dihidrogenat de potasiu. Georg Busch și Paul Scherrer au găsit că sub temperatura de -150°C această substanță este feroelectrică.

Studiile efectuate în căutarea de materiale cu constantă dielectrică (ϵ_r) mare (≥ 100) au stabilit utilitatea *titanatului de bariu* (BaTiO_3) în fabricarea de condensatori electrice cu $\epsilon_r > 1100$. Principalele calități ale BaTiO_3 sunt structură simplă, simetrie cubică în faza nepolară, stabil chimic și mecanic în faza feroelectrică la temperatura camerei, temperatura Curie la 120°C , nepiezoelectric și deci nepolar în faza paraelectrică, având permitivitate mare (peste 1000) la temperatura camerei. Ulterior au fost descoperite și alte substanțe asemănătoare: KNbO_3 , KTaO_3 , LiNbO_3 , LiTaO_3 , PbTiO_3 .

Teoriile moderne ale feroelectricității au apărut începând din 1960 – 1970, în care se consideră că tranzițiile de fază din starea feroelectrică sau antiferoelectrică în cea paraelectrică sunt cazuri particulare ale unor tranziții de fază structurale care au loc cu modificarea simetriei cristaline.

I.2. Noțiuni specifice studiului materialelor feroelectrice

Raportul dintre capacitatea unui condensator cu dielectric și capacitatea aceluiași condensator cu aer este o mărime specifică dielectricului și a fost numită de Faraday *capacitate specifică inductivă* – ulterior denumită *constanta dielectrică* sau *permitivitatea dielectrică relativă*. Un sistem de sarcini electrice pozitive și negative separate spațial este caracterizat de mărimea fizică numită *moment de dipol electric*. *Polarizația* \vec{P} a unui volum macroscopic este dată de momentul de dipol macroscopic pe unitatea de volum, iar unitatea de măsură în SI este $[\text{C}/\text{m}^2]$. Materialele pot fi *polare*, care prezintă dipoli permanenți sau *nepolare*, fără dipoli electrice în absența vreunui câmp electric extern. La aplicarea unui câmp electric extern materialele se polarizează prin mecanisme de polarizare: *polarizare*

electronică, polarizare ionică, polarizare orientațională, polarizare a sarcinilor spațiale, și polarizare feroelectrică.

Permitivitatea ε reprezintă proporționalitatea dintre \vec{D} și \vec{E} , ε_r se numește permitivitatea electrică relativă sau constanta dielectrică a mediului, iar ε_0 este permitivitatea vidului ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m). Fiecare mecanism de polarizare este caracterizat de o viteză finită, ceea ce determină o frecvență maximă specifică (rezonanță) și *fenomenul de relaxare* dielectrică care constă în întârzierea polarizației unui mediu dielectric față de acțiunea unui câmp electric exterior. Astfel, permitivitatea dielectrică devine mărime complexă, iar raportul dintre partea imaginară și partea reală determină *tangenta unghiului de pierdere* δ . Partea reală a permitivității dielectrice ε' este asociată cu energia electrică înmagazinată în mediul dielectric iar partea imaginară ε'' cu energia disipată (pierdere).

I.3. Materiale feroelectrice

Există medii dielectrice neliniare, a căror permitivitate nu este constantă, ci depinde de \vec{E} . Aceste materiale sunt caracterizate de o temperatură Curie – T_C la care are loc, odată cu creșterea temperaturii, tranziția din starea feroelectrică în cea paraelectrică. În vecinătatea lui T_C , constanta dielectrică prezintă un maxim al valorii sale. La trecerea din starea paraelectrică în cea feroelectrică, în rețeaua cristalină cubică, neutră din punct de vedere electric, apar distorsiuni de rețea ce duc la apariția dipolilor electrici și a unor rețele cristaline de tip romboedric și tetragonal ce prezintă interes aplicativ ridicat. Un eșantion feroelectric este *polarizat spontan*. În general, direcția polarizării spontane nu este aceeași în întregul eșantion, acesta putând fi împărțit în regiuni spațiale (volumice) în interiorul cărora există o singură direcție de polarizare, însă această direcție diferă de la o regiune la alta (*domenii feroelectrice* despărțite de *pereți interdomenici*). Aplicarea unui câmp puternic poate duce la inversarea polarizației (*comutarea polarizației*) prin procese de *nucleație și creștere*.

Caracteristic feroelectricilor este comportamentul histeretic al dependenței $P(E)$. Extrapolarea către axa P a zonei de saturație a graficului $P(E)$ determină *polarizația de saturație* – P_s . Diminuând E , la câmp electric exterior zero persistă o *polarizație remanentă* P_r . Pentru a anula polarizația remanentă trebuie aplicat un câmp electric de direcție opusă E_C – *câmp coercitiv*.

Clasa feroelectricilor este compusă din mai multe subcategorii, cea mai importantă economic și tehnologic fiind cea a *perovskitelor*. Aceștia prezintă structură cubică cu formula chimică ABO_3 , în care cationii A ocupă

pozițiile din colțurile cubului, cationii B ocupă poziția centrală a cubului, iar anionii O (ioni de oxigen) sunt așezați în mijlocul fețelor cubului.

I.4. Proprietățile feroelectricilor

Substanțele feroelectrice sunt caracterizate de *structură de domenii de polarizare spontană* sub T_C , *inversarea polarizației* însoțită de histerezis sub acțiunea unui câmp extern, *tranziție de fază fero – para de ordinul I sau II*, anomalii ale unor proprietăți fizice în apropierea tranziției de fază și ϵ_r , ce depinde neliniar de E , proprietate descrisă de termenul *tunability*.

Comportamentul electric al feroelectricilor în circuite se datorează în principal proprietăților de comutare și histerezis feroelectric și dependenței permitivității de câmpul electric aplicat.

I.5. Aplicații ale materialelor feroelectrice

Cu referire strict la proprietățile electrice, tipurile de aplicații pot fi împărțite în funcție de modul de exploatare a permitivității dielectrice și a polarizației spontane. În categoria de aplicații a *condensatorilor electrici cu constantă dielectrică mare* nici neliniaritatea permitivității dielectrice cu câmpul aplicat și nici înversarea polarizației nu sunt folosite. Categoria *dispozitivelor acordabile* se referă la acele dispozitive feroelectrice care exploatează dependența $\epsilon(E)$ – varactori feroelectrice. Categoria *dispozitivelor remanente* se referă la dispozitivele a căror funcționare se bazează pe capacitatea de remanență a polarizației care face posibilă realizarea unor noi tipuri de memorii electronice binare. Categoria *dispozitivelor neliniare* presupune utilizarea unui feroelectric în câmpuri electrice alternative comparabile cu câmpul de saturație al respectivului feroelectric. Astfel, starea de polarizare este inversată la fiecare semialternanță iar permitivitatea dielectrică nu mai este constantă.

II. Proprietăți dielectrice neliniare în ceramici feroelectrice

II.1. Metode de caracterizare a proprietăților dielectrice

Caracterizarea electrică a dielectricilor înseamnă obținerea răspunsului electric \vec{D} la aplicarea unui stimul electric \vec{E} . Experimentele reprezintă cazuri simplificate, în general unidimensionale, în care E este determinat de o tensiune electrică aplicată $U(t)$ iar D este dedus din răspunsul electric determinat de material. Acestea presupun utilizarea eșantioanelor într-o

configurație geometrică convenabilă, cunoscută, conform modelului teoretic care stă la baza experimentului. După E , metodele de caracterizare a feroelectricilor se pot împărți în *metode de câmp slab*, fără comutarea domeniilor feroelectrice (determinarea ϵ_r , $\text{tg } \delta$, $\epsilon(T)$, $\epsilon(f)$, etc.) și *metode de câmp intens*, cu comutarea domeniilor (determinarea $P(E)$, $\epsilon(E)$, $\text{tg } \delta(E)$). Comportamentul neliniar al feroelectricului se poate studia cantitativ prin analiză Fourier a răspunsului electric obținut la stimularea eșantionului cu un semnal sinusoidal care să determine o amplitudine a câmpului electric comparabil cu valoarea câmpului de saturație.

II.2. Măsurarea răspunsului electric

Uzual, eșantioanele feroelectrice masive au grosimi de ordinul a 1 mm, astfel, pentru studiul în regim neliniar (atingerea unor valori ale lui E de ordinul a kV/mm) este necesară aplicarea pe electrozii eșantioanelor a unor tensiuni electrice de ordinul kilovolților.

Privit ca un element de circuit electric, un eșantion feroelectric reprezintă un condensator plan-paralel neliniar, real, a cărui capacitate electrică variază cu tensiunea electrică aplicată. Pentru dimensiuni și frecvențe de lucru uzuale (de ordinul herților), eșantionul feroelectric introduce în circuitul de măsurare o impedanță de ordinul megaohmilor sau chiar mai mare, caracteristică dielectricilor. Pentru îmbunătățirea raportului semnal/zgomot este necesară stabilirea intensității curentului de măsurare I_{mas} în domeniul miliamperilor, mult mai mare decât intensitatea curenților electrice paraziți. Răspunsul electric al eșantionului feroelectric studiat se obține din măsurarea / înregistrarea curentului electric I_{mas} la aplicarea asupra acestuia a unei tensiuni electrice alternative $U(t)$. Limita inferioară a intensității curentului electric este determinată de raportul semnal/zgomot minim acceptabil, iar limita superioară este dată de puterea maximă pe care eșantionul o poate disipa. Prin trecerea curentului de măsurare printr-un circuit convertor I-V se obține, la ieșirea acestuia din urmă, o tensiune electrică V_o direct proporțională cu I_{mas} . Reprezentarea grafică de tip XY a $V_o(t)$ ($V_o^{-sat} < V_o < V_o^{+sat}$) și $U(t)$, care să asigure saturația pozitivă și negativă a eșantionului, are forma *histerezisului de curent*. Înlocuind convertorul I-V cu un *circuit integrator*, tensiunea de ieșire depinde liniar de sarcina electrică dezvoltată pe electrozii eșantionului. Astfel, reprezentarea grafică de tip XY a lui $V_o(t)$ ($V_o^{-sat} < V_o < V_o^{+sat}$) și $U(t)$ este proporțională cu histerezisul $P(E)$ denumit și *histerezisul de tensiune*.

II.3. Interfață de tensiune înaltă pentru măsurarea proprietăților dielectrice

Pentru studierea proprietăților neliniare de *switching* ale materialelor feroelectrice ceramice a fost proiectat și realizat un dispozitiv electronic cu rol multiplu. Acesta conține un circuit de măsurare, un circuit atenuator, amplificatoare de izolație galvanică (pentru semnalele de măsurare) și protecții la efectele străpungerii dielectrice în circuitul de măsurare. Circuitul de măsurare poate îndeplini fie funcția de integrator (circuit modificat Sawyer-Tower), fie funcția de convertor I-V. Atenuatorul facilitează măsurarea tensiunii electrice înalte aplicată pe eșantion.

Semnalul de tensiune înaltă este generat de un generator de funcții conectat la intrarea unui amplificator de tensiune înaltă. Tensiunea înaltă astfel obținută este aplicată eșantionului studiat și atenuată de interfața de măsurare în scopul înregistrării. Simultan, răspunsul electric al eșantionului este prelucrat pentru înregistrare. Semnalele proporționale cu tensiunea aplicată și cu răspunsul electric sunt decuplate galvanic de la experiment în interfața de măsurare și apoi aplicate unui osciloscop digital pentru înregistrare. Sistemul de măsurare este prevăzut cu sincronizarea începerii achiziției de date la generarea semnalului printr-un semnal de *trigger* de la generatorul de funcții la osciloscop. Funcționarea instalației de măsurare a fost verificată cu elemente de circuit liniare.

II.4. Ceramici feroelectrice pe bază de BaTiO_3

Materialele ceramice avute în vedere pentru studiul experimental au compozițiile $\text{BaCe}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (BCT) cu concentrații $x = 0,06; 0,10$ și $0,20$ și $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (BSnT) cu concentrații $x = 0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20$. Densitatea aparentă a eșantioanelor a fost determinată utilizând metoda imersiei în apă. În cazul ambelor serii de materiale au fost investigate atât proprietăți dielectrice de câmp slab cât și de câmp electric intens. Maximul permitivității dielectrice a $\epsilon(T)$, care indică tranziția din faza paraelectrică în cea feroelectrică (la scăderea temperaturii), este deplasat odată cu creșterea adității de Ce și Sn, de la temperaturi mari către temperaturi mai mici. De asemenea, creșterea adțiilor determină o tranziție spre caracter relaxor, cu dispersie în frecvență a permitivității și tranziții de fază difuze.

Rezultatele experimentelor de tunabilitate $\epsilon(E_{DC})$ relevă faptul că doar una din cele două serii de materiale este potrivită pentru studiul experimental al proprietăților dielectrice neliniare în câmp electric alternativ, ce face subiectul prezentei lucrări. Seria de materiale aleasă pentru studiul experimental al proprietăților dielectrice neliniare în câmp electric alternativ este cea de tip BSnT. Conține mai multe compoziții, unele în faze feroelectrice, altele în paraelectric, astfel crescând șansele identificării unui material mai potrivit pentru aplicații ale neliniarității dielectrice. De

asemenea, comparativ cu seria BCT, compozițiile seriei BSnT prezintă factori de tunabilitate superiori la câmpuri electrice mai puțin intense.

III. Studiul potențialului aplicativ al caracterului neliniar în BaSnTiO₃ ceramic

Studiul experimental al lucrării de față are ca scop extinderea cercetărilor din domeniul aplicațiilor neliniarității dielectrice a ceramicilor feroelectrice. Contextul este în mare parte definit de studiile proprietăților de tunabilitate a unor dispozitive capacitive (varactori) pe bază de soluții solide de tip BST cu diverse concentrații de Sr. În general este vorba despre dispozitive acordabile care exploatează dependența $\varepsilon(E_{DC})$, cu posibilități reale de utilizare în diverse circuite de radio frecvență și microunde. Însă posibilitățile aplicative ale dependenței $\varepsilon(E_{AC})$ au fost investigate puțin până în prezent, ultimile studii demonstrând posibilitatea generării de armonici cu varactori pe bază de BST în strat subțire, în rol de multiplicatori de frecvență. În acest context, *subiectul lucrării este concentrat pe investigarea proprietăților dielectrice neliniare ale unor materiale mai puțin utilizate, comparativ cu BST, inclusiv propunerea și realizarea unui dispozitiv adecvat acestor proprietăți.*

III.1. Răspunsul dielectric neliniar în perspectivă spectrală

Pentru valori suficient de ridicate ale câmpului, polarizația tinde să se satureze, ceea ce înseamnă că aceasta nu mai răspunde liniar la câmpul electric aplicat. În cazul aplicării unui câmp electric sinusoidal, variația în timp a polarizației nu va mai fi armonică ci va evidenția de asemenea fenomenul de saturație. Comportamentul neliniar depinde de amplitudinea câmpului electric, odată cu creșterea acestuia din urmă crescând și abaterea formei semnalului de răspuns de la cea sinusoidală. Această abatere poartă denumirea de *distorsiune de neliniaritate* și se manifestă prin apariția în răspunsul electric a unor componente spectrale noi, denumite *armonici*. Pentru a putea analiza armonicile și implicit gradul de distorsiune al răspunsului electric este necesară trecerea semnalului de ieșire din domeniul timp în domeniul frecvență, utilizând analiza Fourier. Gradul de distorsiune se reflectă direct în cantitatea de armonici generată, iar amplitudini diferite ale câmpului electric aplicat determină grade de distorsiune diferite.

În cazul ceramicilor feroelectrice nepolarizate, netexturate, cu grăunți orientați aleator, un câmp electric alternativ (fără componentă DC) va genera un răspuns al polarizației simetric față de abscisă (*half-wave symmetry*), ceea

ce înseamnă că armonicile pare și componenta continuă (la 0 Hz) vor avea amplitudine nulă.

Utilizând perspectiva spectrală se poate aprecia cantitativ gradul de deformare a semnalului de răspuns prin calcularea *factorului de distorsiuni* – raportul dintre puterea debitată în armonicile superioare și puterea debitată în armonica fundamentală. Pentru un semnal, factorul de distorsiuni (DF – *Distortion Factor* sau THD – *Total Harmonic Distortion*) se exprimă prin rădăcina pătrată a raportului dintre valorile efective ale armonicilor superioare și valoarea efectivă a fundamentalei.

III.2. Evaluarea răspunsului dielectric neliniar în ceramici de tip BSnT

Studiul experimental s-a concentrat pe analiza spectrală a răspunsului dielectric neliniar al seriei de eșantioane de tip $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ ($x = 0; 0,05; 0,1; 0,15$ și $0,2$) cu scopul de a obține o sortare a sistemelor feroelectrice studiate după capacitatea de generare a armonicilor. În acest scop a fost obținută evoluția *factorului de distorsiuni în funcție de amplitudinea câmpului electric aplicat* pentru toate eșantioanele seriei BSnT.

Răspunsul dielectric neliniar a fost obținut experimental prin măsurători de tip $P(E)$ la diferite amplitudini ale câmpului electric, utilizând instalația experimentală de măsurare a proprietăților dielectrice de câmp înalt realizată în cadrul acestui studiu. Măsurătoarea unui eșantion s-a concretizat prin obținerea perechii de semnale proporționale cu E și P achiziționate sincronizat, care descriu evoluția ciclului de histerezis la diferite valori ale câmpului electric aplicat. A urmat trecerea semnalelor din domeniul timp în domeniul frecvență. Pentru fiecare amplitudine a lui E s-au obținut $P(t)$, $E(t)$, $P(E)$, $P(f)$, $E(f)$, amplitudinile și fazele pentru E , $P_1 \dots P_{19}$ cu care s-au calculat ε_{r1} , $\text{tg } \delta_1$ și THD, astfel că a fost posibilă reprezentarea $\varepsilon_{r1}(E_{AC})$, $\text{tg } \delta_1(E_{AC})$, $\text{THD}(E_{AC})$, $P_1(E_{AC}) \dots P_7(E_{AC})$ și *faza* $P_1(E_{AC}) \dots \text{faza } P_7(E_{AC})$ ceea ce oferă o viziune complexă asupra proprietăților dielectrice neliniare ale ceramicilor feroelectrice investigate.

Criteriului de comparație este gradul de distorsiuni armonice al răspunsului electric în funcție de amplitudinea câmpului electric aplicat. În cazul de față, materialul cel mai potrivit pentru exploatarea proprietăților dielectrice neliniare este $\text{BaSn}_{0,05}\text{Ti}_{0,95}\text{O}_3$.

III.3. Realizarea unui mixer de semnale RF cu feroelectric

Rezultatele studiului anterior au fost obținute aplicând un semnal electric sinusoidal cu frecvența de 10 Hz. În vederea realizării unei aplicații

în domeniul RF trebuie mai întâi confirmată existența proprietăților dielectrice neliniare în acest domeniu. Verificarea existenței proprietăților dielectrice neliniare la o frecvență de lucru relevantă pentru domeniul RF se poate face printr-un experiment comparativ de tip $I(V)$, în care răspunsul electric este evaluat după cantitatea de armonici. Menținând parametrii geometrici și condițiile experimentale nemodificate, materialele diferite vor determina răspunsuri diferite. Această verificare a fost realizată la frecvența de 1 MHz cu ajutorul unei interfețe de măsurare de frecvență înaltă concepută și realizată special. Valorile factorului de distorsiuni armonice calculat pentru fiecare eșantion confirmă existența proprietăților dielectrice neliniare în materialele feroelectrice studiate la frecvența de lucru de 1 MHz : materiale diferite determină valori diferite ale factorului de distorsiuni armonice totale. În acest caz, variația factorului THD de la un eșantion la altul nu se aseamănă cu aceeași variație în cazul experimentelor de frecvență joasă. Compoziția BSnT cu $x = 0,05$ a fost selectată pentru realizarea unei aplicații de radio frecvență care să exploateze în funcționare dependența $\varepsilon(E_{AC})$.

Principalul efect funcțional al unui sistem neliniar este acela al generării de armonici superioare, prin distorsionarea unui semnal de intrare. Compoziția $\text{BaSn}_{0,05}\text{Ti}_{0,95}\text{O}_3$ este un astfel de sistem, atunci când semnalul de intrare E este suficient de puternic, astfel că utilizarea proprietăților dielectrice neliniare pe care le posedă este potrivită în aplicații de tip generatoare de armonici. Având în vedere pierderile dielectrice totale (în regim neliniar), aplicațiile care necesită eficiență ridicată nu sunt potrivite în cazul de față (ex. multiplicator de frecvență). În schimb este potrivită o aplicație care se bazează mai mult pe neliniaritatea dielectrică decât pe eficiență, de aceea compoziția aleasă a fost utilizată la realizarea unui *mixer de semnale*, un dispozitiv electronic fundamental în domeniul RF. Un mixer RF ideal realizează operația de înmulțire între două semnale periodice de intrare, rezultând alte două semnale periodice a căror frecvență este dată de diferența și respectiv suma frecvențelor semnalelor inițiale.

Mixerul feroelectric prototip realizat în cadrul acestui studiu înlocuiește neliniaritatea rezistivă a elementelor semiconductoare (tehnologia de bază în prezent) cu neliniaritatea dielectrică (reactivă) a materialului feroelectric. Configurația aleasă conține patru condensatori electrice conectați într-un circuit electric de tip punte Wheatstone. În care semnalul LO (care stimulează neliniaritatea dispozitivului) este aplicat pe o diagonală a circuitului. În condițiile în care cei patru condensatori sunt identici, tensiunea electrică prezentă între nodurile de circuit ale celei de-a doua diagonală este nulă. Astfel, este evitată prezența semnalului LO și a armonicilor sale la celelalte două porturi prin conectarea acestora din urmă la nodurile de circuit cu potențiale identice. Condensatorii feroelectrice au fost construiți în

configurație coplanară, pe suprafața eșantionului ceramic ales, prin metalizare și microstructurare a stratului metalic depus (Ag).

Mixerul feroelectric a fost testat utilizând 80 de perioade în semnalul LO pentru o rezoluție spectrală orizontală mai bună. Diferențele constructive dintre condensatorii coplanari, determină praguri de neliniaritate diferite (în tensiune) de la un condensator la altul. Astfel, comportarea electrică a mixerului pierde din simetrie, rezultând apariția în răspunsul mixerului a armonicilor de rang inferior ($RF \pm LO$), neexistente în cazul simetric simulat în cadrul acestui studiu. Primele două cele mai importante armonici de intermodulație (după amplitudine) sunt $(2LO - RF)$ și $(2LO + RF)$, exact ca în cazul simulării.

Proprietățile funcționale ale mixerului cu feroelectric diferă fundamental de cele ale mixerelor cu semiconductori în sensul că armonicile de intermodulație generate sunt mai puține și mai dispersate, descrise spectral de $(2nLO \pm RF)$.

O consecință esențială a exploatării neliniarității dielectrice într-un mixer RF este aceea că semnalului LO poate fi adăugată o componentă continuă de tensiune de offset, cu scopul de a exploata porțiuni din caracteristica de transfer neliniară bipolară, ceea ce face ca mixerul feroelectric să fie reconfigurabil.

IV. Concluzii

Lucrarea de față prezintă un drum etapizat de la studierea proprietăților dielectrice în materiale feroelectrice până la exploatarea acestor proprietăți într-un mixer feroelectric. A fost demonstrat un nou concept de mixer RF – *mixer RF reconfigurabil in situ*, care pare să aibă un potențial aplicativ ridicat, ținând cont de trendul dispozitivelor multistandard din domeniul comunicațiilor wireless. Conceptul propus prezintă câteva avantaje (simplitate, cost, caracteristici funcționale noi), însă aduce cu sine și dezavantajul pierderilor dielectrice semnificative care determină disipări termice de energie capabile să modifice temperatura materialului și deci proprietățile dielectrice ale acestuia.

Orice fel de neliniaritate dielectrică poate fi exploatată într-o aplicație de tip mixer RF, iar acest tip de neliniaritate are avantajul că nu se bazează pe conducție electronică, ceea ce teoretic înseamnă nivele reduse de zgomot generat, o caracteristică care impactează direct performanțele funcționale cum ar fi pragul minim al semnalelor care pot fi procesate (sensibilitatea în echipamentele de recepție radio).

Cercetarea în cadrul acestei teze de doctorat s-a materializat în câteva contribuții originale care au fost publicate sau prezentate la conferințe internaționale și naționale, iar realizarea practică a interfeței de tensiune înaltă pentru măsurarea proprietăților dielectrice a fost propusă pentru brevetare:

Cerere brevet de invenție

1. M. V. Pop, L. Mitoșeriu, „Interfață de tensiune înaltă pentru măsurarea proprietăților electrice ale materialelor dielectrice și feroelectrice, Nr. înregistrare OSIM: A/00861/04.03.2014 (în evaluare)

Lucrări indexate în Thomson Reuters (în trecut ISI)

1. L. P. Curecheriu, M. Deluca, Z. V. Mocanu, M. V. Pop, V. Nica, N. Horchidan, M. T. Buscaglia, V. Buscaglia, M. van Bael, A. Hardy, L. Mitoșeriu, „Investigation of the ferroelectric-relaxor crossover in Ce-doped BaTiO₃ ceramics by impedance spectroscopy and Raman study”, Phase Trans., Vol. 86, Nr. 7, pg. 703–714, 2013; (Ediție specială: The Third COST MP0904 WG Workshop, 23-24 April 2012)

2. C. E. Ciomaga, A. M. Neagu, M. V. Pop, M. Airimioaei, S. Tașcu et al, „Ferroelectric and dielectric properties of ferrite-ferroelectric ceramic composites”, J. Appl. Phys., Vol. 113, Nr. 7, pp. 074103, 2013