

**REZUMAT al tezei de abilitare**  
***“Dispozitive, circuite și senzori cu frecvențe de operare în domeniul GHz-ilor, realizate prin microprelucrarea și nanoprocesarea materialelor semiconductoare”***

**Autor Dr. Alexandru Müller**

Teza de abilitare “Dispozitive, circuite și senzori cu frecvențe de operare în domeniul GHz-ilor, realizate prin microprelucrarea și nanoprocesarea materialelor semiconductoare” reprezintă o sinteză a principalelor direcții de cercetare abordate de mine în ultimele două decade scoțând în evidență rezultatele științifice semnificative obținute și recunoscute pe plan internațional. Aceste rezultate au fost obținute și prin strânsa colaborare pe care am avut-o cu membrii grupurilor de cercetare pe care le-am coordonat.

**În scurtul capitol introductiv (*capitolul 1*)** se face o prezentare a activității mele de cercetare și dezvoltare tehnologică avută înainte de susținerea tezei de doctorat (1990), legată de realizarea primelor diode românești de microunde (pin, varactor, step recovery Schottky pe Siliciu, și Schottky pe GaAs). Se face și o scurtă sinteză a rezultatelor științifice obținute, concretizate și în câteva publicații în reviste de mare prestigiu precum Solid State Electronics și IEEE Trans. on El. Devices -1989.

**Domeniul “*Circuite de microunde și unde milimetrice având ca suport membrane subțiri dielectrice și semiconductoare*”** constituie obiectul celui *de-al doilea capitol al lucrării*.

Unul dintre subiectele importante dezvoltate în timpul activității mele de cercetare relativ recente a fost legat de aplicațiile tehnologiilor MEMS pentru dispozitive și circuite pentru microunde și unde milimetrice: circuite pentru microunde și unde milimetrice pe membrane de dielectric sau semiconductoare. Aceste tehnologii contribuie la reducerea pierderilor elementelor de circuit pasive, o problemă extrem de importantă mai ales în gama de frecvențe de unde milimetrice, unde soluțiile tehnologice mai simple fie nu au fost, sau nu sunt disponibile, sau sunt foarte scumpe.

Din 1997 acest subiect a fost dezvoltat intens sub conducerea Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie (IMT), instituția din care fac parte, și a mea, în cadrul proiectului european FP4 “Micromachined circuits for microwave and millimeter wave circuits” **MEMSWAVE coordonat de mine în perioada 1998-2001**. Acesta a fost primul proiect european, de tip ICT coordonat de o țară est europeană, și totodată unul dintre primele proiecte dedicate aplicațiilor MEMS în tehnologii de microunde. Partenerii implicați în proiect au fost IMT București-coordonator, Uppsala Univ., FORTH Heraklion, MFA Budapesta, FBK Trento, CNR-IMM Roma, "Tor Vergata", Univ. Roma, ISP și Microsensor Ltd. Kiev. Temele proiectului au fost: (i) membrane subțiri de dielectric pe substrat de siliciu de mare rezistivitate; (ii) fabricarea membranelor de GaAs; (iii) elemente de circuit pasive microprelucrate pe substrat de siliciu și GaAs; (iv) filtre trece-bandă și antene microprelucrate pentru unde milimetrice; (v) module de recepție pentru 38 GHz și 77 GHz bazate pe tehnologii de microprelucrare; (vi) module de emisie pentru 38 GHz. Consorțiul a asigurat, datorită complementarității sale și disponibilitatea echipamentelor necesare pentru obiectivele ambițioase ale

proiectului. Cele mai inovatoare idei care au apărut au putut fi finalizate experimental, ceea ce a reprezentat un avantaj important pentru IMT, în acea perioadă.

În toate elementele de circuit fabricate prin microprelucrarea siliciului și GaAs, IMT a avut o contribuție majoră, iar rezultatele au reprezentat stadiul actual al tehnologiei în acest domeniu. ***Consider că modulul de recepție pentru 38 GHz, având antena integrată monolitic cu dioda Schottky, ambele suspendate pe aceeași membrană subțire de 2 μm de GaAs a fost cel mai important rezultat al proiectului. De asemenea, filtrele cu unde milimetrice bazate pe tehnologii de microprelucrare a Si și GaAs au reprezentat noutăți la nivel mondial aduse de acest proiect.*** Proiectul a fost nominalizat printre cele zece proiecte finaliste (din 108 proiecte participante, din toate domeniile), la competiția pentru **Premiul Descartes al CE în 2002**. La momentul abordării de către grupul nostru, această tematică fusese lansată în SUA, la Univ Ann Arbor Michigan. Nu au existat rezultate europene raportate în literatură la momentul respectiv.

Consider că ideea abordării acestor tehnologii în institutul din care fac parte și realizarea și publicarea rapidă a primelor rezultate, a fost una din contribuțiile mele majore legate de managementul cercetării. Ca efect imediat am reușit să propun și să obțin câștigarea proiectului european FP4 MEMSWAVE “Micromachined circuits for microwave and millimeter wave circuits”. Pe termen lung efectul benefic a fost câștigarea încrederii pe plan european a grupului din IMT, intrarea într-un „club de elită”. A urmat apoi implicarea noastră în numeroase consorții care au propus și (unele) au câștigat competiția pentru proiecte din cadrul programelor de cercetare FP6 și FP7 ale UE.

În anul 2003 LAAS CNRS Toulouse a inițiat crearea unei rețele de excelență în RF MEMS în care a fost inclusă majoritatea partenerilor din consorțiul MEMSWAVE. Propunerea de proiect a avut succes și activitatea în acest subiect a fost continuată cu sprijinul **rețelei de excelență FP6 RF MEMS AMICOM (2004-2007), în care am fost coordonatorul echipei IMT, partener în rețea** (AMICOM a fost coordonat de LAAS -CNRS Toulouse).

Cele mai importante rezultate științifice, legate de această topică, în care contribuția mea a fost esențială, sunt detaliate în lucrarea de abilitare; au fost publicate **7 articole în revistele: Journal Micromechanics&Microengineering (5) –zona Q2, în perioada 2000-2005; IEEE Trans on MTT (1) zona Q1, în 2008 și European Semiconductor (1), cel inițial, în 1997 la care s-a dorit publicarea rapidă pentru a puncta prioritatea Europeană a grupului nostru înaintea altor grupuri, competitori la acea vreme, din Franța. Au fost 4 lucrări în proceedings la conferințe (Micromechanics Europe, European Microwave Conf. și 2 capitole în cărți (unul în editura CRC Taylor and Francis Group, 2008 celălalt în editura Springer, în 2009.**

***Al treilea capitol*** al lucrării este dedicat ***Dispozitivelor acustice pe GaN.***

Eu, alături de membrii grupului pe care îl conduc avem contribuții majore în realizarea primelor dispozitive acustice funcționând în domeniul GHz-ilor, prin dezvoltarea unor tehnologii bazate pe microprelucrarea și nanoprosesarea GaN/Si. În acest capitol sunt descrise rezultatele principale obținute din activitatea mea de cercetare din ultimii ani, începând cu 2005 până în prezent: rezonatori și senzori bazați pe rezonatoare cu unde acustice de suprafață obținute prin nanolitografie pe GaN/Si și GaN/SiC și dispozitive cu unde acustice de volum pe membrane de GaN obținute prin microprelucrarea Si.

GaN prezintă proprietăți fizice unice (bandă interzisă largă, viteză de saturație extrem de mare), care fac acest material foarte atractiv pentru o serie de aplicații de importanță științifică și economică ridicată: electronica de mare putere și de mare viteză pentru operarea la frecvențe din domeniul microundelor și al undelor milimetrice precum și dispozitive optoelectronice (detectoarele UV). Rezonatoarele cu unde acustice

de volum (FBAR – film bulk acoustic resonators) și dispozitivele cu unde acustice de suprafață (SAW – surface acoustic waves) au atras un mare interes pentru telefonie mobilă, navigație, comunicații prin satelit sau diverse forme de comunicații cum ar fi WLAN. Materialele tradiționale ( cuarț, langasit, langatate) folosite pentru fabricarea rezonatoarelor SAW au proprietăți piezoelectrice excelente, dar au și dezavantajul frecvenței de funcționare limitată sub 2 GHz, impusă de viteza sunetului relativ scăzută a acestor materiale precum și de lățimea limitată a liniilor traductorului interdigitat (IDT) obținute cu fotolitografia convențională. Pentru a obține dispozitive SAW de înaltă frecvență, se poate utiliza nanolitografia cu fascicul de electroni pentru fabricarea IDT-urilor sub-micrometrice.

Semiconductorii cu bandă interzisă largă, în special GaN, nu au fost practic utilizați până la activitatea noastră, în fabricarea dispozitivelor acustice; grupul nostru a considerat că această direcție de cercetare poate avea un impact major în dezvoltarea unor dispozitive acustice de înaltă performanță cu aplicații în domeniul comunicațiilor și al senzorilor. **Din 2005 am contribuit substanțial la dezvoltarea acestui domeniu, așa cum reiese și din portofoliul de publicații.** Rezultatele obținute pentru dispozitivele FBAR pe GaN și mai ales la cele obținute pentru dispozitivele SAW pe GaN reprezintă stadiul actual al tehnologiei acestor dispozitive. În special în realizarea dispozitivelor SAW pe GaN și a senzorilor de temperatură și presiune cu aceste dispozitive consider ca am avut un rol major. În orice caz, echipa noastră este recunoscută pe plan mondial pentru activitatea de pionierat în acest domeniu.

Primele structuri de FBAR pe GaN au fost raportate la conferința **CAS 2005, în revista Superlattices & Microstructures** în 2006, la **IMS-MTT-S** (conferința americană de micrunde) în 2007. În anul 2009 am raportat o structură de **FBAR** realizată pe o membrană subțire de 0.5 μm din GaN (obținută prin tehnici de microprelucrare) **cu frecvența de rezonanță de 6.3 GHz în revista IEEE Electron Device Letters. (zona Q1).** Contribuția mea la aceste 4 lucrări (la a doua și a patra am fost prim autor, la celelalte două coautor) a fost legată de dezvoltarea tehnologică inovativă (la toate lucrările) și de coordonarea activităților și de scriere a lucrărilor, acolo unde am fost prim autor (a doua și a patra).

Au fost dezvoltate tehnici de nanolitografie pe GaN și structuri de rezonatori de tip **SAW pe GaN/Si**, utilizând traductori interdigați (IDT-uri) cu lățimea digiților și distanța digit/interdigit de 200 nm și având frecvența de rezonanță la 5.7 GHz. **Dezvoltarea tehnicilor nanolitografice pe GaN** aferente și publicarea rezultatelor, în anul 2010 în prestigioasa revistă **IEEE Electron Devices Letters (zona Q1)** (la care sunt prim autor) reprezintă o realizare remarcabilă. Acestea reprezintă starea artei din acel moment pentru dispozitivele SAW pe GaN.

În anul 2015 am dezvoltat **prima analiză a modurilor Sezawa** și a altor moduri superioare de propagare în **GaN/Si** publicată în prestigioasa revistă **IEEE Electron Device Letters, (zona Q1)**; la această lucrare sunt prim autor. O lucrare recentă, **publicată în 2016 în IEEE Electron Device Letters, (zona Q1)** analizează influența metalizării de Au asupra frecvenței de rezonanță a structurilor SAW pe GaN, comparând rezultatele obținute pentru structurile experimentale cu metalizare Ti/Au și Al. S-a obținut o diferență de 15% pentru o structură SAW cu digiți/interdigiți de 200 nm fabricați pe un strat de GaN de 1 μm.

Grupul nostru a abordat, la ideea mea, **topica extrem de nouă a senzorilor de temperatură bazați pe dispozitive SAW pe GaN/Si.** Sensorul de temperatură SAW este o soluție pentru monitorizarea temperaturii în condiții de mediu ostile. Sensorul se bazează pe variația frecvenței de rezonanță a structurii de tip SAW cu temperatura. Structura este compatibilă cu transmisia de date wireless și cu integrarea monolitică cu alte componente de circuit pe GaN. Acest domeniu a fost abordat în colaborare internațională în **cadru proiectului european FP7 SMARTPOWER "Smart integration of GaN & SiC high power electronics for industrial and RF applications".** Proiectul a fost coordonat de THALES, Franța, în el fiind implicați alți 14 parteneri din 7 țări europene. Proiectul s-a desfășurat în perioada **2011 - 2016.** Sensorul SAW a reprezentat una

din contribuțiile esențiale ale proiectului întrucât s-a reușit monitorizarea temperaturii la distanță într-un sistem de emisie-recepție pentru un radar dezvoltat de THALES, compania end user. S-a demonstrat posibilitatea de integrare a senzorului de temperatură SAW într-un SiP (System in Package) prin analizarea comportamentului SAW cu un analizor de rețea vectorial (VNA) atunci când amplificatorul de mare putere (HPA) a fost polarizat în curent electric generând căldură.

Senzorul de temperatură este bazat pe o structură originală de tip SAW pe GaN, cu un singur port, asigurând performanțe mai bune în ceea ce privește sensibilitatea și pierderile în comparație cu structurile clasice, de rezonatoare cu două porturi. Prin tehnici avansate de nanolitografie, dezvoltate la IMT București, s-au obținut dispozitive SAW cu structură interdigitată având lățimi ale digiților și ale spațiilor între digiți de 200 nm, 170 nm, 150 nm și 120 nm. Senzorul funcționează în gama de frecvență 5.4 - 8.5 GHz. Pentru a determina deplasarea frecvenței de rezonanță cu temperatura în gama 5-500 K s-au efectuat măsurători în criostat. Sensibilitatea măsurată în gama de temperatură 23 - 150 °C este mai mare de 60 ppm/°C. Rezultatele au contribuit la definirea stadiului actual în acest domeniu foarte nou, fiind publicate în **2014** în jurnalul **Sensors and Actuators A (zona Q1)** și au fost prezentate la prestigioasa conferință **MTT-S International Microwave Symposium, 2014** în Tampa, SUA.

Folosind experiența acumulată în trecut pentru obținerea structurilor FBAR pe membrane de GaN, în **2015 - 2016 am dezvoltat structuri SAW** (cu digiți/interdigiți de 200 nm lățime) pe membrane subțiri de 1.2 μm de GaN, ce funcționează ca **senzori de presiune**. Aceste structuri prezintă și moduri superioare de propagare – Lamb la frecvența de rezonanță de 9.6 GHz. Primele rezultate au fost prezentate recent la prestigioasa conferință **MTT-S International Microwave Symposium, 2016** în San Francisco, SUA.

*Al 4-lea capitol al lucrării* este intitulat „**Structuri interdigitate de fotodetectori MSM (metal – semiconductor – metal) pe membrane subțiri de GaN**”.

GaN poate fi folosit cu succes pentru fabricarea fotodetectorilor UV de înaltă performanță. Folosind atât microprelucrarea avansată cât și nanoprosesarea GaN/Si, s-au obținut fotodetectori UV de tip MSM pe membrane foarte subțiri. Structurile de fotodetectori pe membrane sunt originale și permit obținerea unor responsivități foarte mari atât pentru iluminarea din față (“front side illumination”) sau din spate (“backside illumination”). Rezultatele au fost publicate în trei lucrări în revistele: **Applied Optics (2008) (zona Q2)**, **Microelectronics Journal (2009)**, **Thin Solid Films (2010) (zona Q2)**. Rezultatele originale sunt detaliate în prezenta lucrare.

*Capitolul 5 al lucrării* descrie direcțiile noi de cercetare și topicile noi propuse de mine în perspectiva abilitării. Aceste tematici se pretează și pentru eventuale teze de doctorat: analiza modurilor superioare de propagare a undelor acustice în GaN/Si și GaN/SiC, dezvoltarea senzorilor de presiune pe bază de dispozitive SAW pe membrane de GaN, dezvoltarea unor senzori capabili să măsoare simultan temperatura și presiunea, senzori bazați pe dispozitive SAW pe GaN pentru aplicații medicale și utilizări in-vivo având în vedere că GaN este un material bio-compatibil).

*Capitolul al 6-lea* descrie, conform metodologiei, capacitatea individuală a candidatului de a coordona echipe de cercetare, de a organiza și gestiona activități de explicare și facilitare a învățării cercetării.

Imi prezint abilitățile legate de capacitatea de a coordona echipe complexe de cercetare; lucru demonstrat de întreaga mea activitate din ultimii 20 de ani în cadrul numeroaselor proiecte europene pe care le-am coordonat sau a echipei din institutul din care fac parte, pe care am coordonat-o în cadrul proiectelor la care am

fost parteneri. Același lucru se poate spune și despre proiectele naționale. Sunt descrise activitățile și rezultatele celor două proiecte europene (proiectul FP4 MEMSWAVE 1998-2001 și proiectul FP7 MIMOMEMS-2008-2011), coordonate de mine. Rezultatele proiectului MEMSWAVE au fost detaliate în capitolul al doilea și au fost reluate succint, în acest capitol. Am avut oportunitatea de a câștiga, de asemenea, în calitate de coordonator, Proiectul european **FP7 REGPOT “MIMOMEMS” European Centre of Excellence in Microwave, Millimetre Wave and Optical Devices, based on Micro-Electro- Mechanical Systems for Advanced Communication Systems and Sensors” (2008-2011), (1.1 MEUR)**. În afară de cele trei direcții de cercetare (filtre reconfigurabile pentru unde milimetrice; module de recepție bazate pe microprelucrarea Si și GaAs și dispozitive acustice bazate pe microprelucrarea și nano-procesarea semiconductorilor de bandă interzisă largă pentru aplicații în domeniul GHz-ilor), proiectul a oferit și suport pentru modernizarea infrastructurii (upgrade la 110 GHz al echipamentului de caracterizare pe placheta – Vector Network Analyzer, achiziționarea unui sintetizator de frecvență până la 110 GHz, a unei facilități de îngroșare cu Au a plachetelor semiconductoare, etc). De asemenea, proiectul a prevăzut angajarea a trei cercetători cu experiență (post-doc).

Am fost coordonator al grupului din IMT la mai multe proiecte europene: Rețeaua de excelență (**NoE**) în RF MEMS, **FP6, AMICOM (2004-2007)**, coordonator proiect LAAS Toulouse; **proiectul integrat european FP7 IP SMARTPOWER (2011-2016)** coordonator proiect Thales TRT. Am fost de asemenea coordonator al echipei IMT în două proiecte ENIAC (inițiativa europeană pe nanoelectronica -,„related to FP7 calls”) **SE2A: “Nanoelectronics for Safe, Fuel Efficient and Environment Friendly Automotive Solutions” (2008-2012)** coordonator proiect NXP Nijmegen și **MERCURE “Micro and nano technologies based on wide band gap materials for future transmitting receiving and sensing systems” (2010-2014)** coordonator Thales TRT. De curând coordonez proiectul câștigat cu **ESA “Microwave filters based on GaN/Si SAW resonators, operating at frequencies above 5 GHz” (2015 – 2017)**. De câteva luni coordonez proiectul H2020 MC **H2020-MSCA-IF-2015 “Integrated Crossbar of Microelectromechanical Selectors and Non-Volatile Memory Devices for Neuromorphic Computing- SelectX”**.

Am fost coordonator de proiecte naționale în programul PN I – MATNANTECH: COMPOLIMEMS (2001 - 2004), SIRMEMS (2002 - 2005) și FIREMEMS (2004 - 2006), programul CEEEX: ACOMEMS (2006 - 2009) și Capacități SIMCA (2007 - 2009). În ultimii ani am fost implicat, în calitate de coordonator, în **proiecte naționale** cu tematica legată de dispozitive pe unde acustice bazate pe GaN și AlN: MIMFOMEMS (2007 - 2010), GIGASABAR (2008 - 2011), IDEI “Tehnologii noi bazate pe microprelucrarea și nanoprosesarea GaN/Si pentru dispozitive de microunde și dispozitive fotonice avansate” (2011 - 2016), Parteneriate SETSAL (2014 - 2016). Am fost implicat în proiectul STAR “Diode Schottky, detectoare și mixere pentru unde milimetrice și submilimetrice realizate pe GaAs” (2013 - 2016).

Modul în care am gestionat și am facilitat învățarea cercetării este demonstrat prin prezentarea câtorva nume de cercetători remarcabili la a căror formare am contribuit.

În final prezint trei idei majore pe care le-am avut și le-am aplicat cu succes în managementul științific pentru grupul meu și de care sunt extrem de satisfăcut.