

Raport științific sintetic
al proiectului PN-II-RU-TE-2011-3-0106, pentru perioada
septembrie 2011 – octombrie 2014

Titlul proiectului:

CARACTERIZAREA NANOMECHANICĂ ȘI NANOTRIBOLOGICĂ PENTRU PROIECTAREA FIABILĂ A REZONATOARELOR MEMS

Obiectivele atinse și prezentarea succintă a rezultatelor obținute

Obiectivul principal al proiectului a constat în caracterizarea mecanică și tribologică a rezonatoare MEMS cu scopul de a îmbunătăți funcționarea acestora prin creșterea acurateții în răspuns și obținerea unei durate de funcționare ridicată. De asemenea un obiectiv important în derularea proiectului a fost înființarea unui nou grup de cercetare în domeniul micro și nano - sistemelor. Acest grup s-a instituit odată cu începerea proiectului iar pe parcurs a fost integrat într-o structură de cercetare acreditată la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

În continuare sunt prezentate obiectivele științifice intermediare care au fost analizate în cadrul proiectului precum și o descriere succintă a acestora.

O1. Analiza cauzelor ieșirii din uz a sistemelor MEMS, materiale MEMS și tehnologii de fabricație

În cadrul acestui obiectiv s-a urmărit identificarea principalelor cauze care duc la ieșirea din uz a sistemelor MEMS și care au în componență structuri mecanice vibratorii. S-au realizat investigații experimentale asupra materialelor MEMS pentru determinarea comportării mecanice și tribologice a acestora în funcție de diferite condiții de operare. Proprietățile mecanice investigate sunt elasticitatea și rigiditatea, tensiuni și deformații, precum și duritatea. Investigațiile tribologice implică determinarea coeficienților de frecare și adeziunea. Două importante cauze de ieșire din uz a rezonatoarelor MEMS identificate și analizate în proiect sunt: *oboseala* și *adeziunea*. Oboseala rezultă ca urmare a unei solicitări ciclice și se poate manifesta prin pierderea internă de energie acumulată de material, prin reducerea rigidității sau prin ruperea probei. Efectul negativ al adeziunii poate să apară în special la rezonatoarele MEMS care oscilează în apropierea substratului. Dintre materialele MEMS utilizate la realizarea rezonatorilor, și analizate în proiect, se amintesc următoarele: siliciu, polisiliciu, aurul, aluminiul și titanul. De asemenea au fost studiate materiale compozite pe baza de SU8 cu aluminiu și SU8 cu aur. Cea mai bună comportare la vibrații o are polisiliciu iar pentru aplicații optice se pot utiliza structuri fabricate din aur. Rugozitatea are o influență ridicată asupra forței de adeziune prin modificarea suprafeței de contact dintre electrozii rezonatorului. Forța de adeziune contribuie la creșterea forței de frecare iar aceasta trebuie să fie utilizată alături de forța normală de încărcare la determinarea coeficientului de frecare.

O2. Analiza teoretică și modelarea comportării mecanice a rezonatoarelor MEMS

În cadrul analizei teoretice s-au dezvoltat modele matematice care permit determinarea răspunsului static și dinamic a rezonatoarelor MEMS de tip console încastrate la un capăt, la ambele capete sau de tip membrane. S-au elaborat relații pentru determinarea rigidității, a frecvenței de rezonanță și a amplitudinii de oscilație funcție de poziția electrozudului de acționare. De asemenea studiile teoretice s-au dezvoltat și pentru determinarea pierderilor de energie în structurile vibratorii considerând atât disiparea externă de energie datorită frecării cu aerul cât și pierderea internă datorată comportării interatomice a materialului. Efectul de damping – atenuarea oscilației rezonatorului datorită frecării cu aerul, are o influență negativă importantă asupra funcționării rezonatoarelor MEMS, în special a acelor care funcționează în mediul ambiant (senzori de detecția masei, a umidității și a poluării din atmosferă). Pentru a diminua efectul pierderilor de energie s-au propus și analizat rezonatoare MEMS prevăzute cu orificii realizate pe direcția de oscilație. S-au dezvoltat studii comparative dintre structurile rezonatoare cu orificii și cele fără orificii. De exemplu, pierderea de energie datorată frecării cu aerul la un cantilever din polisiliciu fără orificii, cu lungimea de 200μm, lățimea de 30μm și grosimea de 1.9μm, care oscilează în aer este de 1.68. Aceasta este diminuată la 0.72 dacă același cantilever are 5 orificii cu diametrul de 3μm dispuse pe lungimea probei. Rezultatele experimentale au fost confirmate de cele teoretice și de analiza cu elemente finite. Modelarea și simularea comportării mecanice a diferitelor structuri de rezonatori MEMS a fost realizată cu scopul de a determina frecvența de răspuns, rigiditatea precum și influența dimensiunilor geometrice asupra răspunsului static și dinamic. În analiza cu elemente finite s-a folosit programul ANSYS precum și un soft specializat pentru analiza MEMS – Oofelie Multiphysics Software.

O3. Investigații experimentale asupra proprietăților mecanice a sistemelor MEMS

În cadrul proiectului s-a acordat un accent ridicat pe investigații experimentale asupra comportării structurilor vibratorii în diferite condiții de operare. Structurile vibratorii supuse testelor sunt de tip console încastrate la un capăt, încastrate la ambele capete precum și sub formă mai complexă de tip membrană. Testele asupra acestor structuri rezonatoare au fost realizate atât în mediu ambiant cât și în vid pentru a determina influența presiunii mediului de operare asupra frecvenței de răspuns, a amplitudinii și a vitezei de oscilație precum și asupra pierderii de energie. Acestea au fost caracterizate experimental atât mecanic cât și tribologic prin utilizarea microscopului de forță atomică, a nanoindenterului și a unui analizor de vibrații. La structurile rezonatoare s-a urmărit determinarea experimentală a rigidității, a frecvenței de răspuns, a amplitudinii și a vitezei de oscilație. Pe baza curbei de răspuns s-a determinat factorul de calitate precum și coeficientul de pierdere de energie. Viteza de oscilație și amplitudinea unui rezonator MEMS testat în aer este de aproximativ 10^3 ori mai mică față de situația când acesta funcționează în vid pentru aceeași forță de acționare și aceeași frecvență de rezonanță. De asemenea, experimental s-a determinat creșterea vitezei și a amplitudinii de oscilație la structurile care au realizate orificii în comparație cu aceleași structuri dar realizate fără orificii. În toate situațiile analizate, rezultatelor experimentale au fost comparate cu cele teoretice precum și cu cele numerice și acestea au fost într-o bună concordanță.

O4. Analiza morfologică a sistemelor MEMS, duritatea și caracterizarea nano-frecării

S-au analizat morfologic și topografic diferite suprafețe de rezonatoare MEMS cu scopul de a identifica influența rugozității asupra comportării tribo-mecanice a rezonatoarelor MEMS. Prin utilizarea modulului de forță laterală al AFM-ului s-a determinat forța de frecare dintre vârful

palpatorului AFM și probele investigate. Pe perioada testelor s-au utilizat vârfuri AFM din Si_3N_4 cu diferite raze, dar și acoperite cu diferite metale (aur, aluminiu, etc). Testele s-au realizat atât pe structuri rezonatoare cât și pe filme subțiri. Prin nanoindentare s-au determinat duritățile și modulele de elasticitate ale materialelor analizate. Interpretarea caracteristicilor mecanice a materialelor (duritate și elasticitate) s-a realizat prin utilizarea modelului Oliver and Pharr. În modelele teoretice și cele numerice s-a utilizat valoarea reală a modulului de elasticitate determinată direct pe materialul rezonatorului. Aceasta lucru a permis să se realizeze analize și interpretări ale rezultatelor cât mai apropiate de realitate.

05. Analiza adeziunii și a efectului de pull-in în rezonatoarele MEMS

Dacă rezonatoarele oscilează la amplitudine ridicată și în apropierea substratului, există riscul apariției fenomenului de pull-in. Poziția de pull-in, caracteristică acționării electrostatice, este aceea poziție instantanee la care forța de acționare electrostatică este egală cu forța mecanică dată de rigiditatea structurii. În faza imediat următoare, dacă forța electrostatică depășește forța mecanică, structura vibratorie este atrasă direct la substrat. În această poziție, forța de adeziune joacă un rol critic în revenirea structurii la poziția inițială de oscilație. Dacă forța de adeziune are valoare ridicată atunci, partea oscilatorie rămâne lipită de substrat. Aceasta este una din principalele cauze care duc la ieșirea din uz a rezonatoarelor MEMS. Prin utilizarea modulului de spectroscopie AFM s-a determinat forța de adeziune. Aceasta are o influență ridicată nu numai asupra revenirii structurii vibratorii la poziția de oscilație dar și asupra frecării. În cadrul proiectului s-au realizat studii de adeziune atât dintre vârful AFM și probele de material (filme subțiri) cât și direct pe structurile vibratorii. Pentru aceasta s-a deplasat cu ajutorul palpatorului AFM partea mobilă a rezonatorului direct la substrat și, pe durata descărcării, s-a observat o deviere în curba AFM-ului. Aceasta deviere este direct proporțională cu adeziunea dintre partea mobilă și substrat. Comparativ cu situația în care se determină adeziunea dintre vârful AFM-ului și o structură rigidă (un film subțire), curba AFM la o structură flexibilă este caracterizată prin două pante distincte. Prima pantă este datorită deplasării palpatorului AFM împreună cu structura flexibilă, iar a doua este caracteristică doar deplasării palpatorului AFM deoarece partea flexibilă a atins substratul. În urma acestui obiectiv s-a determinat influența pe care rugozitatea o are asupra adeziunii precum și influența geometriei, și implicit a rigidității structurii, asupra forței mecanice de revenire a oscilatorului la poziția inițială după ce aceasta a fost atrasă la substrat.

06. Proiectarea unui rezonator MEMS cu mobilitate ridicată

Gradul de mobilitate al unui rezonator MEMS depinde de modul în care structura flexibilă este conectată la substrat. Astfel putem avea grade de mobilitate: în-plan, în afara planului sau o combinație a acestora. S-au analizat diferite tipuri de rezonatoare MEMS din punct de vedere a mobilității, rigidității și a stării de tensiuni. O comportare corespunzătoare din punct de vedere a mobilității, a distribuției de tensiuni și a reducerii efectului de adeziune o are rezonatorul MEMS susținut de articulații de tip FROG. Astfel, s-au realizat investigații experimentale și analize numerice la aceste rezonatoare. Prin tehnica AFM s-a determinat dependența dintre deplasarea către substrat a părții mobile a rezonatorului și forța mecanică de acționare. Forța mecanică utilizată a fost dată de deformația palpatorului AFM și rigiditatea acestuia. Rezonatorul MEMS de tip FROG analizat a fost realizat din aur cu o structură mobilă suspendată la $3\mu\text{m}$ deasupra substratului. Acest tip de structură poate fi implementată cu succes atât în aplicații optice cât și de comutatoare MEMS. Desigur, pentru acest tip de structură mobilă, s-au dezvoltat atât modele teoretice cât și analize cu elemente finite. Pentru analiza teoretică și numerică, modulul de

elasticitate a fost determinat prin nanoindentare. De exemplu pentru proba din aur s-au obținut valori de 83.64MPa, diferite de cele date de literatura de specialitate. Nanoindentarea a fost realizată direct pe suprafața reazemului.

07. Testarea rezonatorului MEMS de tip FROG

S-a determinat mobilitatea rezonatorului precum și rigiditatea acestuia. Rigiditatea experimentală determinată a fost de 4.53N/m în bună corelare cu cea analitică 4.62N/m și cu cea numerică 4.67N/m. Mai mult, s-a deplasat rezonatorul până la substrat utilizând un palpator AFM și s-a monitorizat forța de adeziune. Pe baza curbei AFM de descărcare s-a determinat o forță de adeziune de 2.472μN mult mai mică decât forța de revenire dată de rigiditatea rezonatorului 13.59μN, neexistând astfel riscul ca partea mobilă să rămână lipită la substrat. Au fost realizate mai multe astfel de structuri de aceleași dimensiuni geometrice ceea ce a permis repetabilitatea experimentelor. După proiectare s-a realizat o analiza cu elemente finite pentru a vizualiza distribuția de tensiuni în rezonatorul investigat. Valoarea maximă a tensiunii echivalente a fost observată în articulațiile structurii când aceasta a fost deplasată până la substrat (3μm) fiind însă mult sub valoarea admisibilă dată în literatura de specialitate. Prin urmare, acest tip de rezonator poate funcționa corespunzător o perioadă ridicată, fără a apărea riscul de a ieși din funcțiune datorită oboselii sau datorită adeziunii dintre partea mobilă și substrat.

Rezultatele semnificative obținute în cadrul proiectului constau în:

- Înființarea unei echipe de cercetare în anul 2011 care realizează activități de cercetare în domeniul proiectării, fabricării și testării de micro și nano – sisteme.
- Acreditarea la nivel de universitate în anul 2013 a unui laboratorului de Micro și Nano - Sisteme în cadrul Universității Tehnice din Cluj-Napoca. În acest laborator sunt angajați permanent 6 cercetători, dar își desfășoară activitatea și doctoranzi respectiv studenți de la ciclul de licență și master.
http://research.utcluj.ro/tl_files/research/Research%20Domain/Industrial%20Engineering%20and%20Management/13_MINAS_Pustan.pdf
- Publicarea rezultatelor obținute în perioada septembrie 2011 – octombrie 2014 în jurnale ISI și prezentarea lor la conferințe internaționale de prestigiu din țară și din străinătate (Portugalia, Franța, Spania, Italia, Germania).
- Publicarea unui capitol în cartea de specialitate “Smart sensors and MEMS: Intelligent devices and microsystems for industrial applications”, ELSEVIER, apărută în Noiembrie 2013 la prestigioasa editura Woodhead Publishing din Cambridge, 560 pagini, ISBN: 978-0-85709-502-2.

Concluzii

Pe parcursul dezvoltării proiectului au fost realizate colaborări cu specialiști de renume din domeniul microsystemelor și a caracterizărilor de materiale MEMS. Au fost desfășurate vizite la laboratoare specializate din România și din străinătate. Discuțiile avute cu specialiștii din domeniu

au confirmat necesitatea clarificării aspectelor de ieșire prematură din uz a rezonatoarelor MEMS. De asemenea necesitatea unei baze de date care să prezinte comportarea materialelor MEMS din punct de vedere al adeziunii și al oboselii este confirmată de specialiștii din domeniul micro și nano-sistemelor.

Pe baza acestui proiect s-a înființat un grup de cercetare pentru testarea mecanică și tribologică a micro și nano - sistemelor, capabil să deservească companiile producătoare de sisteme MEMS și să formeze specialiști în domeniu. De asemenea, s-a acreditat la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Laboratorul de Micro și Nano – Sisteme, coordonat de directorul prezentului proiect de cercetare. Unul dintre obiectivele laboratorului este și organizarea unor cursuri de perfecționare pentru cercetătorii din România, precum și implicarea laboratorului în proiecte internaționale de cercetare. Se dorește atragerea tinerilor cercetători în desfășurarea activităților proiectului și în cadrul laboratorului. În acest sens, pe lângă echipa proiectului au fost antrenați în activitatea laboratorului și studenți de la ciclul licența și master. O parte dintre aceștia și-au definitivat tema de licență și cea de master în domeniul proiectului.

Sensibilitatea rezonatorilor MEMS depinde de dimensiunile geometrice ale consolelor. Pentru a crește sensibilitatea, se recomandă folosirea consolelor cu lungime mare și lățime mică. Condițiile de testare au influență asupra răspunsului dinamic al rezonatoarelor. Frecarea cu aerul are o influență negativă ridicată asupra pierderilor în energie a rezonatorului. Efectul termic are de asemenea o influență asupra pierderilor de energie interioare din material pe baza disipării termice de energie. Dacă aplicațiile permit, se recomandă utilizarea rezonatorilor în vid deoarece crește sensibilitatea și acurătatea lor în răspuns. Consolele de tip paleta pot fi folosite satisfăcător în aplicațiile de sesizare a maselor prin monitorizarea schimbărilor lor în frecvența de răspuns.

Rezonatorii susținuți de articulații de tip FROG sunt recomandați a fi utilizați atât în aplicații de monitorizare - detectare de vibrații cât și în comutatoarele MEMS precum și sistemele optice. Acestea prezintă posibilitatea unor deplasări mari cu stări de tensiuni reduse dar și o forță de revenire mult mai ridicată decât forța de adeziune.

Diseminarea rezultatelor proiectului

Publicarea rezultatelor obținute în perioada septembrie 2011 – octombrie 2014 a fost realizată astfel:

A) Capitol carte

1. Pustan, M., Birleanu, C., Dudescu, C., Golinval J.-C. (2013) - DYNAMICAL BEHAVIOR OF SMART MEMS IN INDUSTRIAL APPLICATIONS, in book Smart sensors and MEMS: Intelligent devices and microsystems for industrial applications, Edited by S Nihtianov and A L Estepa, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials No. 51, ISBN 0 85709 502 1, ISBN-13: 978 0 85709 502 2, 510 pages (book chapter – 25 pagini).

B) Articole în reviste ISI

1. Pustan M., Dudescu C., Birleanu C., Rymuza Z (2013) - Nanomechanical studies and material characterization of metal/polymer bilayer cantilevers MEMS Structures, **International**

Journal of Materials Research, 104 (4), ISSN 1862-5282, 408-414, DOI: [110.3139/146.110879](https://doi.org/10.3139/146.110879).

2. Pustan, M., Birleanu, C., Dudescu, C. (2013) - Simulation and experimental analysis of thermo-mechanical behaviour of microresonators under dynamic loading, **Microsystem Tehnologies**, 19 (6), ISSN 1432-1858, 915-922, DOI: [10.1007/s00542-012-1728-1](https://doi.org/10.1007/s00542-012-1728-1).
3. Pustan M., Dudescu C., Birleanu C. (2014) - Nanomechanical and nanotribological characterization of a MEMS micromembrane, **Analog Integrated Circuits and Signal Processing** (accepted for publication).
4. Pustan M., Dudescu C., Birleanu C. (2014) - Nanomechanical and nanotribological characterization of a MEMS micromembrane supported by two folded hinges, **Microsystem Tehnologies** (accepted for publication).

C) Conferinte internationale

1. Pustan, M., Birleanu, C., Dudescu, C., Belcin, O., Golinval, J-C. (2012) - Size effect on the Dynamical Behaviour of Electro Statically Actuated MEMS Resonators, the 36th International Conference ICMSAV, 25-26 octombrie 2012, Cluj-Napoca, Acta Technica Napocensis, Vol.55, Issue III, seria: Applied Mathematics and Mechanics, ISSN 1221-5872, 599-604, Index Copernicus 2010 - 3.89.
2. Birleanu, C., Pustan, M., Dudescu, C., Belcin, O., Rymuza, Z. (2012) – Nanotribological Investigations on Adesion Effect Aplied to MEMS Materials, the 36th International Conference ICMSAV, 25-26 octombrie 2012, Cluj-Napoca, Acta Technica Napocensis, vol.55, Issue III, seria: Applied Mathematics and Mechanics, ISSN 1221-5872, , 671-676, Index Copernicus 2010 - 3.89. Pustan, M., Birleanu, C., Dudescu, C. (2012) - Simulation and Experimental Analysis of Thermo-Mechanical Behavior of Microresonators under Dynamic Loading, DTIP, Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS 25-27 April 2012, Cannes, France, pp 87-92, ©EDA Publishing/DTIP 2012 ISBN: 978-2-35500-020-1, IEEE Catalog Number: CFP12DTI-PRT, http://cmp.imag.fr/conferences/dtip/dtip2012/documents/DTIP2012_Program.pdf.
3. Pustan, M., Birleanu, C., Dudescu, C., Belcin, O. (2012) - Mechanical and tribological characterizations for reliability design of micromembranes, 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Mycrosystems, EuroSimE 2012, Cascais,Portugal – April 16-18, paper 132, ISBN 978-1-4673-1511-1, IEEE Catalog Number: CFP12566-CDR, DOI: [10.1109/ESimE.2012.6191802](https://doi.org/10.1109/ESimE.2012.6191802).
4. Pustan, M., Dudescu, C., Birleanu, C. (2013) – Micromembranes suported by serial-parallel connected hinges, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Smart, Structures and Materials (SMART2013), Session SS6 Smart Micro & Nano Materials & Structures, paper 1220, Politecnico di Torino, Italy 24-26 June.
5. Pustan M., Birleanu C., Dudescu C., Belcin O. (2013) - Adhesion, Friction and Wear Measurement of Dental Materials using Atomic Force Microscope, CONSEURO 2013, 9-11 May, Paris.
6. Pustan, M., Dudescu, C., Birleanu, C. (2013) - Measurement of energy loss coefficient of electrostatically actuated mems resonators, 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Funchal, Portugal, 23-27 June 2013, IRF 2013, TRACK_J:

NANOTECHNOLOGIES AND NANOMATERIALS paper no. 3921, ISBN: 978-972-8826-27-7, 305-307.

7. Pustan, M., Birleanu, C., Dudescu, C., Calin, L., **(2013)** - The influence of temperature on mechanical and tribological properties of dental materials, 4th International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Funchal, Portugal, 23-27 June 2013, IRF 2013, SYMP_06: INTEGRITY, RELIABILITY AND FAILURE IN DENTAL MATERIALS, paper no. 3923, ISBN: 978-972-8826-27-7, 473 – 475.
8. Pustan, M., Dudescu, C., Birleanu, C. **(2013)** - The effect of sensing area position on the mechanical response of mass - detecting cantilever sensor, DTIP, Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS 16-18 April 2013, Barcelona, Spain, 87-92, ©EDA Publishing/DTIP 2013 ISBN: 978-2-35500-020-1, IEEE Catalog Number: CFP12DTI-PRT, http://cmp.imag.fr/conferences/dtip/dtip2012/documents/DTIP2013_Program.pdf.
9. Birleanu, C., Pustan, M., Belcin, O., Calin, L., **(2013)** - NANOMECHANICAL INVESTIGATION OF DENTAL RESTORATIVE MATERIALS USING ATOMIC FORCE MICROSCOPY, The 4th International Conference "ADVANCED ENGINEERING IN MECHANICAL SYSTEMS", ADEMS'13, 24-25 october 2013, Acta Technica Napocensis, Vol.56, Issue IV, seria: Applied Mathematics and Mechanics, ISSN 1221-5872, 607-614, Index Copernicus 2010 - 3.89.
10. Pustan, M., Rusu, F., **(2013)** - OPTIMIZATION OF MEMS STRUCTURES USING CUCKOO SEARCH ALGORITHM, The 4th International Conference "ADVANCED ENGINEERING IN MECHANICAL SYSTEMS", ADEMS'13, 24-25 october 2013, Acta Technica Napocensis, Vol.56, Issue IV, seria: Applied Mathematics and Mechanics, ISSN 1221-5872, 785-788, Index Copernicus 2010 - 3.89.
11. Marius PUSTAN, Cristian DUDESCU, Corina BIRLEANU **(2014)** - Nanomechanical and nanotribological characterization of a MEMS micromembrane supported by two folded hinges, DTIP, Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS 01-04 April 2014, Cannes, France, pp. 282-287, ©EDA Publishing/DTIP 2014 ISBN: 978-2-35500-028-7, IEEE Catalog Number: CFP14DTI-PRT, http://cmp.imag.fr/conferences/dtip/dtip2014/documents/DTIP2014_Program.pdf.
12. Marius PUSTAN, Corina BIRLEANU, Florina RUSU, Simion HARAGAS **(2014)** - DYNAMIC BEHAVIOR OF MEMES COMPONENTS, The 6th International Conference on ADVANCED CONCEPTSON MECHANICAL ENGINEERING, 12-13 June 2014, Iasi, published in Applied Mechanics and Materials, Vol. 658, pp694-699, [DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.658.694](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.658.694).
13. Florina RUSU, Marius PUSTAN, Corina BIRLEANU **(2014)** - ANALYSIS OF THE ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF MEMS RESONANTORS, The 13th European Conference on SPACECRAFT, STRUCTURES, MATERIALS& ENVIRONMENTAL TESTING, 1-4 April 2014, Braunschweig, Germany.

Director de proiect,

Prof. univ. dr.ing. Marius Pustan