

**Nanostructuri de semiconductori oxidici transparenti cu proprietati controlabile prin dopaj cu aplicatii in optoelectronica spintronica si piezotronica**

**Parteneri in consortiu:**

Institutul National de Cercetare Dezvoltare pentru Inginerie Electrica: Conducator de proiect;

**Director proiect:** Dr. Fiz. Jenica Neamtu;

Institutul National de Cercetare Dezvoltare Fizica Materialelor Partener 1;

Responsabil: Dr. Fiz. Cristian Teodorescu;

Responsabil: Prof. Dr. Ioana Jitaru

Institutul National de Cercetare Dezvoltare pentru Tehnologii Izotrope si Moleculare Cluj Partener 3

Responsabil: Dr. Ing Ovidiu Pana;

Universitatea Transilvania Brasov Partener 4;

Conf. Dr. Marius Volmer.

**Obiectivul proiectului:**

Consta in realizarea de noi materiale semiconductoare oxidice cu proprietati optice, electrice (tip metal, semiconductor tip n sau p, dielectric) si semiconductori magnetici diluati (DMS); cu proprietati controlabile prin dopaj.

**Rezultatul final**

Realizare tehnologii de straturi subtiri pentru materialele semiconductoare oxidice magnetic diluate, cu dopaj controlat

**Elemente de noutate ale proiectului, originalitate:**

☐ Proiectul NANOSEMOXI este original prin aceea ca exploateaza o gama larga de proprietati ale ZnO dopat, in special cu ioni magnetici si urmareste controlul purtatorilor de sarcina asociati cu structura de ZnO si in stransa corelare cu modul de preparare a nanostructurilor de straturi subtiri. In ciuda numeroaselor articole despre ZnO, relatia dintre chimia defectelor, preparare si proprietati nu este elucidata. In ciuda formulei sale simple, ZnO are o chimie a defectelor foarte bogata. Defectele au fost studiate de peste 40 de ani, dar acum trebuie reluate in contextul noilor aplicatii care utilizeaza materiale nanostructurate.

In ZnO nanostructurat (ca si in alte materiale), dimensiunile mici si raportul suprafata-volum mare arata rol ul important al introducerii dopajelor in controlarea proprietatilor fizice si chimice. De o importanta majora este:

Determinarea corelatiilor intre parametrii fiecarei metode de sinteza si obtinerea proprietatilor dorite: structura, compozitia chimica, ordonarea atomica locala, structura electronica.

Fundamentarea detaliata a corelatiilor dintre proprietatile functionale: electrice, electronice si structura, structura electronica si compozitia chimica.

Determinarea corelatiilor intre proprietatile functionale si nanostructurarea materialelor prin studii de morfologie TEM, SEM si AFM/STM.

Fundamentarea aprofundata a corelatiilor dintre proprietatile magnetice ale DMS si cele de structura, compozitie chimica, morfologie.

Determinarea parametrilor optimi de sinteza si punerea la punct a tehnologiei de laborator pentru sinteza materialelor cu proprietati dorite si nanostructura prestabilita.

Diseminarea prin articole ISI. Brevetarea noilor materiale si tehnologii.

Beneficiarii rezultatelor, potentialul de aplicare in economie

☐ Firme producatoare de aparatura biomedicala si dispozitive electronice. Nanostructurile de ZnO dopat pot avea aplicatii medicale pentru biosenzori , monitorizare biomedicala, biodetectie si pentru senzori in monitorizarea mediului

**Etapa I Termen: 20 Februarie 2009**

**Etapa II Termen 12 Noiembrie 2009**

**Etapa III Termen 30 Noiembrie 2010**

## Stadiul de realizare in 2010

Etapa 3 - 2010 - Sinteze de semiconductori oxidici dopati, proprietati fizice si chimice, corelatii

Activitati efectuate:

- ☐ Activitatea 3.1 Sinteze si folosirea celor mai bune metode de preparare sol-gel, functie de proprietatile fizice si chimice din sinteza I CO
- ☐ Activitatea 3.2 Sinteze PLD sau molecular beam epitaxy (MBE) de semiconductori oxidici P1
- ☐ Activitatea 3.3 Sinteze oxizi dopati din solutii, stabilirea parametrilor optimi de sinteza chimica P2
- ☐ Activitatea 3.4 Caracterizarea prin difractie de RX, Spectroscopie FTIR, DTA, AFM a materialelor sintetizate sol-gel CO
- ☐ Activitatea 3.5 Caracterizari XRD , XPS; absorbtie de raze X:EXAFS. XANES; Stabilirea corelatiilor preparare-proprietati P1
- ☐ Activitatea 3.6 Caracterizare spectroscopie de masa, UV-VIS, FTIR. Stabilirea corelatiilor preparare-proprietati. P2
- ☐ Activitatea 3.7 Caracterizare ale materialelor prin microscopie TEM, SEM, AFM, STM, proprietati magnetice VSM, SQUID. Stabilirea corelatiilor structura-proprietati P3
- ☐ Activitatea 3.8 Caracterizari electrice magnetorezistenta si parametrii Hall. Stabilirea corelatiei parametrii de sinteza-proprietati electrice si magnetice

Achizitii realizate

- ☐ Fara achizitii

Modul de implicare a tinerilor cercetatori comparativ cu cele asumate prin prevederile proiectului din Anexa B. (inclusiv specializari/stagii de formare/doctorate/post-doc pe tematica proiectului).

In INC DIE ICPE-CA (CO) legat de tematica proiectului a fost finalizata o teza de doctorat , o lucrare de disertatie si in curs de elaborare patru teze de doctorat

1. - Doctorand Ionut Balan
  2. - Doctorand Cristian Morari
  - 3 – Doctorand Sbarcea Gabriela
  - 4 – Doctorand Lucia Leonat
- Doctor Lungu Magdalena Valentina  
Finalizare Masterat Ionut Balan

In INCDFM (P1) legat de tematica proiectului a fost finalizata o teza de doctorata si doua in curs de elaborare :

Finalizare Lucrare Teza doctorat Stavarache Ionel  
Doctorand Negri Catalin  
Doctorand Socol Marcela

In cadrul UPB (P2) a fost finalizata o teza de doctorata si castigarea unei burse post-doc de catre Cristina Covaliu

In cadrul INC DTIM Cluj (P3)  
Doctorand Craciunescu Izabell  
Doctorand Macavei Gabriel-Sergiu  
Doctorand Nan Alexandrina  
Doctorand Soran Maria

In cadrul UTBv: (P4)  
Doctorand Boer Attila Laszlo

Indicatori de rezultat realizat in cadrul proiectului

- ☐ Un studiu preliminar privind tehnologiile moderne de realizare a semiconductoarelor oxidice dopate si configurarea instalatiilor de realizare
- ☐ Doua tehnici ale metodei sol-gel pentru sinteza semiconductoarelor oxidice de tipul  $Zn_{1-x}MT_xO$  ( $MT=Fe, Ni$ ), sub forma de nanopulberi si filme subtiri
- ☐ Doua tehnici ale metodei sol-gel de sinteza a  $Ti_{1-x}Fe_xO_2$  (nanopulberi si filme subtiri)

- Ø O metoda de sinteza prin eptaxie in fascicul molecular a straturilor subtiri de oxid de titan dopat cu crom
- Ø O metoda de obtinere a heterostructurilor bazate pe  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  interfatat cu  $\text{Si}(001)$
- Ø 1 lucrare ISI acceptata spre publicare in Phys.Rev.B

**Activitatile prevazute a se realiza in anul 2011:**

- Ø Activitatea 4.1. Elaborarea de straturi subtiri semiconductoare oxidice dopate prin metoda sol-gel CO
- Ø Activitatea 4.2. Elaborarea de materiale semiconductoare oxidice dopate si semiconductoare magnetice-diluate (DMS) prin depunere in vid inalt P1
- Ø Activitatea 4.3. Elaborarea metodelor chimice de laborator pentru realizarea semiconductorilor oxidici magnetici P2
- Ø Activitatea 4.4. Caracterizarea structurala si testarea proprietatilor fizice ale nanostructurilor (straturi subtiri) semiconductoare oxidice si DMS P1
- Ø Activitatea 4.4. Caracterizarea TEM, SEM, AFM, STM, proprietati magnetice ale nanostructurilor (straturi subtiri) semiconductoare oxidice si DMS P4
- Ø Activitatea 4.4. Caracterizarea de efect Hall, magnetorezistiva ale nanostructurilor (straturi subtiri) semiconductoare oxidice si DMS P4
- Ø Activitatea 4.5. Diseminare, realizare pagina web. Conectarea la retele de cercetare nationale, internationale CO
- Ø Activitatea 4.5 Diseminare. Conectarea la retele de cercetare nationale, internationale P1, P2, P3, P4

**Obiectivele ce vor fi atinse :**

- Ø Realizarea tehnologiilor de straturi subtiri pentru materiale semiconductoare oxidice cu dopaj controlat.
- Ø Diseminare
- Conectarea la retele de cercetare nationale, internationale

## Rezumat

În cadrul etapei I s-au realizat obiectivele propuse:

Studii preliminare și analiza tehnologiilor moderne de realizare a nanostructurilor semiconductoare oxidice.

Configurarea instalațiilor de cercetare și de caracterizare structurală, electrică și magnetică a nanostructurilor de semiconductori oxidici.

În această etapă s-a evidențiat dotarea cu echipamente performante realizată de membrii consorțiului, ce urmează a fi utilizată în etapele următoare ale proiectului. Echipamentele de cercetare și de determinări structurale, electrice și magnetice sunt descrise pe larg în Raportul Științific și Tehnic.

Este cunoscut că realizarea unor structuri semiconductoare „nano” este condiționată de existența unor echipamente performante de realizare straturi subțiri/ultrasubțiri dopate și de existența echipamentelor de caracterizare structurală, electrică și magnetică a straturilor subțiri/ultrasubțiri de semiconductori dopați.

1. Metodele prin care se vor realiza filmele semiconductoare oxidice de către CO (INC DIE ICPE-CA) vor fi metoda chimică sol-gel și metoda electrochimică (cu dopaje), metode care permit obținerea de filme oxidice nanostructurate cu grosime de ordinul nanometrilor, stoichiometrie controlată, reproductibilitate și uniformitate pe suprafețe extinse.
2. Partenerul 1 (INCDFM) va studia filmele semiconductoare oxidice dopate realizate prin PLD și MBE.
3. Partenerul 2 (UB) va studia filmele semiconductoare oxidice dopate cu ioni de tranziție realizate prin metoda sol-gel. Folosind rezultatele preliminare s-a ales ca și tinta atingerea unor nivele ale dopajului de ordinul 5-10% impurități.
4. Vom experimenta tipurile de dopaje cu diverse metale tranziționale (Fe, Co, Mn) Din studiile realizate dopajul cu Mn al ZnO pare să fie cel mai favorabil, deoarece Mn are cel mai mare număr de electroni necuplați, deci cel mai mare moment magnetic posibil și de asemenea prima jumătate a benzii  $d$  este ocupată, fapt ce crează o stare stabilă, în întregime polarizată. Teoretic, s-a determinat pentru un astfel de material o temperatură Curie ( $T_C$ ) mai mare de 300 K, dar această temperatură nu a fost totdeauna obținută experimental; mai mult, Mn este cunoscut a fi antiferomagnetic, fapt ce face ca acest sistem să fie mai „curat” în termenii feromagnetismului indus de un eventual precipitat metalic (subiect de mare controversă în semiconductorii cu diluție magnetică).
5. Pentru caracterizarea completă a nanostructurilor semiconductoare oxidice dopate partenerii CO, P1, P2, P3, P4 vor utiliza echipamentele care realizează caracterizări pe straturi subțiri și la interfețe: difracție de RX, spectrale de RX (XPS, X-ray absorption spectroscopy measurements) și cele de AFM, SPM, STM.
6. Caracterizarea proprietăților electrice și magneto-electrice se va realiza cu următoarele echipamente: SQUID (scanning superconducting quantum interference device), VSM, Sistemul de caracterizare Keithley compus din nanovoltmetru 2182A și sursa de curent programabilă 6221 (metoda celor 4

sonde dispuse în linie, metoda contactelor redresoare, metoda de masura a efectului Hall Planar).

7. S-au obtinut rezultate parțiale asupra caracteristicilor semiconductorilor oxidici ZnO dopat cu Co; ZnO dopat cu Mn; TiO<sub>2</sub> dopat cu Fe. In toate aceste cazuri se observa clustere formate de oxizii metalelor de tranzitie.

## Rezumat

In aceasta lucrare s-a urmarit obtinerea unui material nanocompozit magnetic de tipul  $Zn_{1-x}MT_xO$  (MT = Fe, Ni) sub forma de pulbere si filme subtiri prin diferite tehnici ale metodei sol-gel.

Studiul sintezei nanocompozitului ZnO magnetic de tipul  $Zn_{1-x}MT_xO$  (MT = Fe, Ni) sub forma de pulbere si filme subtiri s-a realizat tinand cont de urmatoarele aspecte:

- influenta tehnicii sol-gel asupra structurii si proprietatilor magnetice ale pulberilor si filmelor subtiri de  $Zn_{1-x}MT_xO$  obtinute;
- natura ionului dopant (Fe, Ni);
- concentratia ionului dopant ( $x = 3\% - 25\%$ );
- conditii de procesare (temperatura, timp).

Sinteza pulberilor de tipul  $Zn_{1-x}MT_xO$  (MT = Fe, Ni) s-a realizat printr-o tehnica a metodei sol-gel lucrand in urmatoarele sisteme:



Proprietatile structurale ale pulberilor de ZnO dopate cu MT (MT = Fe, Ni) au fost studiate cu ajutorul difractiei de raze X care a evidentiat urmatoarele aspecte:

- figurile de difractie pentru toate probele calcinate la  $550^\circ C$  timp de 2 ore prezinta o cristalinitate ridicata a nanopulberilor de ZnO dopate cu Fe si respectiv Ni;

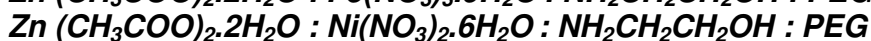
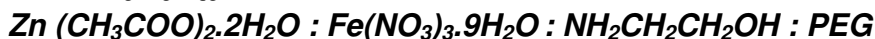
- la concentratii mici de dopant Fe (3% si respectiv 5%) probele prezinta o singura faza cu structura hexagonala de wurtzita a ZnO. Parametrii de retea a si c sunt corespunzatori cu cei ai ZnO pur conform fisei nr. 00-036-1451;

- la concentratii mai mari de dopant Fe (10% - 25%) difractogramele de raze X au pus in evidenta prezenta a doua faze cristaline, cea cu structura hexagonala de wurtzita a ZnO si cea spinelica a  $ZnFe_2O_4$ ;

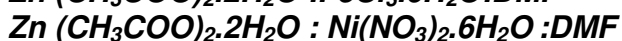
- in cazul pulberilor de ZnO dopate cu ioni de Ni in concentratii mici (3%) s-a putut observa prezenta unei singure faze cristaline pure de wurtzita a ZnO. Pentru concentratii mari (25%) de ion dopant de Ni s-a pus in evidenta prezenta si a unei interferente de oxid (NiO).

Sinteza filmelor subtiri de semiconductori oxidici magnetici de tipul  $Zn_{1-x}MT_xO$  (MT = Fe, Ni unde  $x = 0,03 - 0,25$ ) depuse pe substrat de siliciu (100) s-a realizat folosind doua variante ale metodei sol-gel:

### Varianta I



### Varianta II



Filmele obtinute in varianta I au fost policristaline cu structura hexagonala avand o orientare preferentiala cu axa c perpendiculara la substrat.

Din analiza difractogramelor de raze X pe filmele subtiri de  $Zn_{1-x}Fe_xO$  depuse pe substrat de Si/SiO<sub>2</sub> (varianta I) s-a pus in evidenta influenta clara a concentratiei de dopant Fe asupra structurii cristaline asupra ZnO dopat cu Fe.

Figurile de difracție au aratat ca toate filmele de ZnO dopate cu Fe au o structura hexagonala de wurtzita a ZnO, inasa la concentratii mai mari de 10% in dopant Fe apare si o faza secundara de spinel  $ZnFe_2O_4$ .

De asemenea la concentratii mai mari de 10% Fe se constata o deteriorare a structuri cristaline prin distorsionarea parametrilor de retea ai ZnO. Cresterea concentratiei de dopant Fe inhiba cresterea dimensiunii de cristalit. Dimensiunea de cristalit a ZnO dopat cu Fe scade linear de la 34,5 nm in cazul concentratiilor mici de dopant (3% si respectiv 5% Fe) la 26,9nm in cazul ZnO dopat cu 15%Fe si 19,3 nm in cazul ZnO dopat cu 25%Fe.

Analiza difractogramelor filmelor de ZnO dopate cu ioni de  $Fe^{2+}$  si  $Ni^{2+}$  in varianta II a metodei sol-gel, s-au obtinut urmatoarele date:

- filmele de ZnO dopate cu 5, 10 si 15% Fe prezinta o cristalinitate redusa;
- cresterea temperaturii de la  $550^{\circ}C$  la  $800^{\circ}C$  nu aduce modificari semnificative asupra cristalinitatii probelor;
- cristalinitatea probelor de film creste odata cu cresterea concentratiei de dopant (ioni de  $Fe^{2+}$ );
- probele de filme de ZnO dopate cu 3, 5 si 10% Ni au o cristalinitate mult mai ridicata decat a filmelor dopate cu Fe;
- cristalinitatea filmelor de ZnO dopate cu Ni creste cu cresterea temperaturii si timpului de tratament termic;
- cristalinitatea probelor de ZnO dopate cu Ni creste cu cresterea concentratiei de dopant (dimensiunile de cristalit sunt cuprinse intre 29.9 – 47.3 nm);
- parametrii celulei elementare a probelor de filme de ZnO dopate cu Ni sunt asemanatori dar ceva mai mici decat ai ZnO pur (conform fisa nr. 00-036-1451), dovada a substitutiei partiale a ionilor de  $Zn^{2+}$  cu ioni de  $Ni^{2+}$  in retea ZnO. Raza ionica a  $Ni^{2+}$  de 55 Å fiind mai mica decat a  $Zn^{2+}$  de 66 Å duce la o distorsionare a retelei cristaline in sensul micșorarii parametrilor de retea si deci a volumului celulei elementare dar nu schimba structura de wurtzita a ZnO.

## REZUMAT

În Etapa a 3-a a Proiectului 72-165/2008 s-au realizat sinteze de semiconductori oxidici dopați și s-au studiat proprietățile fizice și chimice ale acestora.

CO: ICPE-CA a realizat sinteze de semiconductori oxidici de tipul ZnO:MT (MT = Fe, Ni) sub formă de pulberi și filme subțiri. Acestea au fost caracterizate prin difracție de RX, Spectroscopie FTIR, DTA, AFM.

Analizele termice TG/DTA, au arătat că la temperaturi peste 500°C nu se mai înregistrează efecte termice iar pierderea de masă este constantă. Rezultatul a fost în concordanță cu cel al analizelor de difracție de raze X care au indicat formarea structuri cristaline de tip wurtzita a ZnO la 550°C.

Analiza difractogramelor de raze X a evidențiat de asemenea faptul că natura și concentrația ionului de metal substituent influențează formarea structuri cristaline. La concentrații mai mari de 15% Fe apare o interferență de tip spinel  $ZnFe_2O_4$ , în timp ce la concentrații mai mari de 5% Ni se evidențiază prezența unei faze secundare de NiO (conform RI nr. 74 /28.10.2010).

Spectrele FTIR au susținut substituția Zn cu ioni de  $Fe^{3+}$  sau  $Ni^{2+}$  prin aceea că frecvențele vibrațiilor de la 414, 434 și 484  $cm^{-1}$  caracteristice ZnO nedopat arată modificări. Modificarea în frecvență este cauzată de diferențele între lungimile legăturilor atunci când ionul  $Ni^{2+}$  sau  $Fe^{3+}$  înlocuiește ionul  $Zn^{2+}$ .

Morfologia suprafețelor filmelor subțiri de ZnO : MT (MT = Fe, Ni) depuse pe substrat de Si/SiO<sub>2</sub> a fost analizată prin AFM (conform RI nr.64 /20.09.2010) referitor la analiza morfo-structurală în comparație cu cea a substratului neacoperit. AFM a evidențiat formarea unor filme uniforme nanogranulare.

Partenerul 1 INCDFM a prezentat două studii de prioritate mondială, unul privind obținerea și caracterizarea stratului de TiO<sub>2</sub>:Cr și altul privind obținerea heterostructurilor bazate pe Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfatate cu Si(001), subiect de extremă actualitate.

În cazul TiO<sub>2</sub>:Cr tratamentul termic conduce la cristalizarea preferențială a fazei anatas. Din spectrele EXAFS, XANES se observă că s-a reușit substituția Ti cu Cr. Substituția este mai pregnantă după tratamentul termic. Deși ordinea locală în jurul Cr este aproximativ aceeași în probele înainte și după tratamentul termic, starea de ionizare a Cr suferă modificări semnificative, Cr fiind într-o stare mult mai avansată de ionizare (+4) sau chiar (+6) după tratamentul termic.

S-a realizat pentru prima dată creșterea unui strat relativ gros (3 nm), epitaxial, care prezintă ordine la distanță mare și o stoichiometrie bine definită Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pe un suport de Si(001) atomic curat.

Suportul nu se oxidează în timpul oxidării stratului, asigurând condițiile realizării unei bariere Schottky de înălțime redusă. Această heterostructură Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si(001) este un candidat ideal pentru injecția de purtători cu polarizare de spin în Si.

Partenerul 2 UPB a realizat materiale compozite de formă  $Ti_{1-x}Fe_xO_2(Fe/TiO_2)$  (nanopulberi și respectiv filme subțiri) care conțin fier într-o matrice de TiO<sub>2</sub> semiconductor. Pentru obținerea compozitului s-au folosit variante ale metodei sol-gel.



Structura și morfologia nanopulberilor de compozit Fe/TiO<sub>2</sub> a fost studiată prin analiza de difracție cu raze X, microscopie SEM-EDAX iar proprietățile optice cu ajutorul spectrelor electronice în reflexie.

Studiile XRD au pus în evidență influența metodei de sinteză (condiții de sinteză, parametri), asupra formei cristaline adoptată de TiO<sub>2</sub> dopat.

Studiile XRD pe probele de TiO<sub>2</sub> dopat, obținute prin aceeași metodă, dar cu cantități diferite de dopant (Fe) nu pun în evidență modificări esențiale ale structurii (tip de rețea cristalină).

O dovadă în plus care ar putea susține fixarea Fe<sup>3+</sup> în rețeaua TiO<sub>2</sub> ar putea fi faptul că domeniul de absorbție UV apropiat – vizibil se deplasează progresiv către valori mai mari odată cu creșterea conținutului în Fe a probelor.

Partenerul 3 INCDTIM Cluj a realizat caracterizarea a doua seturi de semiconductori oxidici de tipul TiO<sub>2</sub> dopat cu 0,05%Fe (abreviat TF5) și cu 0,1%Fe (abreviat TF1) sub forma de filme subțiri prin urmatoarele tehnici de microscopie (microscopie de forta atomica (AFM) in modul non-contact (NCAFM), microscopie de tunelare (STM), microscopie electronica de baleiere SEM/EDX).

Microscopia de forta atomica non-contact (NCAFM) a evidentiat pentru ambele probe de TiO<sub>2</sub>: Fe existenta unor formatiuni aproximativ circulare cu diametru de 40-60 nm ce produc o diferenta de nivel de aproximativ 10 -15nm. Aceste formatiuni ar putea fi considerate ca fiind datorate unor aglomerari ale ionilor de Fe.

Imaginile SEM au aratat aceleasi formatiuni inalte de pana la 20 nm.

S-au realizat masuratori de magnetizare VSM pe un sistem "Cryogen free" produs de CRYGENIC (Anglia) in intervalul 4K-300K pe straturi subțiri de TiO dopat cu 0,1%Fe și pe straturi de ZnO substituit cu diferite concentratii x de Fe (X=0,03 - 0,25%) și a rezultat ca probele de ZnO:Fe au prezentat un comportament slab feromagnetic la o valoare relativ mica a campului magnetic aplicat (1T).

Partenerul 4 UT Brasov a efectuat caracterizari electrice și de efect Hall pentru probele realizate de INCDIE ICPE-CA sub forma de straturi subțiri: Zn<sub>0,97</sub>Ni<sub>0,03</sub>O, Zn<sub>0,95</sub>Ni<sub>0,05</sub>O, Zn<sub>0,9</sub>Ni<sub>0,1</sub>O.

Determinarile cu metoda van der Paw au evidentiat caracteristica histeretica a conductiei in straturile subțiri atat la curenti de injectie mici: -10nA .. +10nA, dar și la curenti medii de injectie: -150nA.. +150nA. Aspectul nelinier al conductiei la valori mici de injectie este datorat unor efecte de tunelare între grăuntii stratului.

Măsurătorile de efect Hall au fost realizate trasând caracteristici U-I la B=0 și la B=1 T pentru a pune în evidență modificarea curbei de transfer. Se observă o modificare foarte mica a caracteristicii in câmp magnetic, fapt ce se datorează valorii scăzute a mobilității purtătorilor de sarcină.

S-au efectuat caracterizări volt-amperice folosind metoda celor 4 contacte dispuse în linie. Dependenta grafică a rezistentei de suprafață (pătrat) de curentul de injectie pune în evidență o dependentă neliniară fapt ce sugerează activarea unor regimuri de conductie (efecte neliniare în câmp și efecte termice).