



UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI  
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Departamentul Dispozitive, Circuite și Arhitecturi Electronice

Nr. Decizie Senat 237 din 02.09.2015

# TEZĂ DE DOCTORAT

## Rezumat

*Modele și tehnologii de realizare de senzori pe SiC pentru medii ostile*

*SiC sensors for harsh environments: models and technologies*

**Autor: Ing. Răzvan Pascu**

**Conducător de doctorat: Prof. Dan Dascălu**

### COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. Ion Marghescu	de la	Universitatea Politehnica din București
Conducător de doctorat	Prof. Dan Dascălu	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent	Prof. Gheorghe Brezeanu	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent	Dr. Raluca Muller	de la	IMT București
Referent	Dr. Mihaela Kusko	de la	IMT București

București, 2015

### ***Mulțumiri***

Odată cu finalizarea programului de doctorat, doresc să adresez câteva cuvinte de mulțumire celor care mi-au acordat suportul lor în această perioadă și m-au îndrumat pe parcursul acestei lucrări.

Doresc să mulțumesc coordonatorului meu științific, domnului Prof. dr. ing. Dan DASCĂLU, pentru îndrumarea, sprijinirea și încurajarea de-a lungul perioadei de pregătire a doctoratului și de elaborare a tezei.

În egală măsură, doresc să îi mulțumesc domnului Prof. dr. ing. Gheorghe BREZEANU, cel care m-a introdus în lumea dispozitivelor pe carbură de siliciu și m-a sprijinit în mod constant pe toată perioada studiilor doctorale.

Mulțumesc doamnei dr. Raluca MULLER, directorul general al IMT – Bucuresti, pentru sfaturile și sugestiile date cu ocazia evaluării rapoartelor științifice semestriale, cât și pentru asigurarea, în cadrul IMT – București, a unui mediu de lucru dotat cu facilități moderne.

Doresc să mulțumesc în mod special domnului fiz. Florea CRĂCIUNOIU care a fost tot timpul alături de mine, oferindu-mi sfaturi și sprijinindu-mă în realizarea dispozitivelor pe carbură de siliciu.

De asemenea, doresc să mulțumesc doamnei dr. Mihaela KUSKO pentru înțelegerea și suportul acordat, cât și pentru toate sfaturile constructive, pe care mi le-a oferit în perioada tezei de doctorat.

Țin să mulțumesc domnului dr. Marian BĂDILĂ pentru sprijinul acordat în caracterizarea dispozitivelor fabricate pe carbură de siliciu și interpretarea datelor obținute.

Aș dori, de asemenea, să mulțumesc domnului dr. Mihai MIHĂILA și domnului ing. Viorel AVRAMESCU pentru sprijinul acordat în caracterizarea capacitoarelor MOS pe carbură de siliciu ca senzori de hidrogen.

Doresc să mulțumesc laboratorului de NanoBioTehnologii, din cadrul IMT București, precum și colegilor din colectivul de cercetare pentru prietenia lor. Aici trebuie să menționez pe: Monica SIMION, Adina BOLDEIU, Antonio RĂDOI, Mihai DĂNILĂ, Iuliana MIHALACHE, Melania BANU și Cosmin ROMANIȚAN.

Mulțumesc în mod special părinților mei care m-au sprijinit necondiționat pe toată perioada studiilor doctorale și care, întotdeauna au subliniat importanța unei bune educații.

Mulțumesc prietenei mele Raluca BANU și nu în ultimul rând fratelui meu pentru suportul moral oferit și înțelegerea de care au dat dovadă pe toată durata programului de doctorat.

## CUPRINS

<b>INTRODUCERE</b> .....	4
<b>CAPITOLUL 1- DISPOZITIVE PE CARBURĂ DE SILICIU</b> .....	5
1.1. CARBURA DE SILICIU. STRUCTURA CRISTALINĂ ȘI PROPRIETĂȚI GENERALE DE MATERIAL .....	5
1.2. DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE PE SIC PENTRU APLICAȚII DIN DOMENIUL SENZORILOR .....	5
<b>CAPITOLUL 2 - TEHNOLOGIA DE FABRICAȚIE A DISPOZITIVELOR PE SIC. CARACTERIZĂRI ELECTRICE GENERALE</b> .....	6
2.1. PROIECTAREA MĂȘTILOR FOTOLITOGRAFICE .....	6
2.2. PREZENTAREA ETAPELOR TEHNOLOGICE COMUNE ÎN REALIZAREA DISPOZITIVELOR PE SIC – FLUX TEHNOLOGIC COMUN .....	8
2.3. DIODA SCHOTTKY. FLUX TEHNOLOGIC - CONTINUARE .....	9
2.4. CAPACITORUL MOS. FLUX TEHNOLOGIC – CONTINUARE .....	11
<b>CAPITOLUL 3 - INTERFAȚA SiO<sub>2</sub>/SiC</b> .....	12
3.1. METODA „GRAY-BROWN” .....	12
3.2. METODA „CASTAGNE SI VAPAILLE” – COMPARAȚIA UNOR CARACTERISTICI C-V OBTINUTE LA FRECVENȚĂ JOASĂ (REGIM QUASI-STATIC), RESPECTIV FRECVENȚĂ ÎNALTĂ .....	13
<b>CAPITOLUL 4 - CARACTERIZARE ELECTRICĂ A DEFECTELOR ÎN OXIDUL DE POARTĂ AL STRUCTURILOR MOS</b> .....	15
4.1. TESTE DE STRES ÎN TENSIUNE ALE CAPACITORULUI MOS PENTRU ANALIZA STRĂPUNGERII OXIDULUI DE POARTĂ .....	15
4.2. TESTELE DE STRES ÎN TEMPERATURĂ ȘI TENSIUNE.....	17
4.2.1. Analiza histerezisului caracteristicilor C-V la temperaturi înalte - determinarea tipului de sarcină din oxidul de poartă .....	17
4.2.2 Determinarea tipului de sarcină din oxid prin aplicarea unui camp electric pozitiv, la temperatură înaltă, pe poarta capacitoarelor MOS realizate .....	18
4.3 TESTE DE STRES LA CÂMPURI ELECTRICE DE POARTĂ INTENSE.....	19
<b>CAPITOLUL 5 - SENZORI PE SIC PENTRU APLICAȚII ÎN MEDII OSTILE</b> .....	21
5.1. DIODA SCHOTTKY PE SIC PENTRU SENZORI DE TEMPERATURĂ.....	21
5.2. CAPACITORUL MOS PE SIC PENTRU SENZORI DE HIDROGEN .....	23
<b>CONCLUZII</b> .....	31
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	39

## INTRODUCERE

### PREZENTAREA DOMENIULUI TEZEI DE DOCTORAT

Cercetările teoretice și experimentale efectuate în domeniul microtehnologiei au cunoscut, într-un ritm alert, progrese deosebite. În ultimii ani, dispozitivele de putere bazate pe Si s-au dezvoltat rapid, arătând o evoluție impresionantă în ceea ce privește reducerea energiei disipate. Cu toate acestea, o comutare inefficientă a dispozitivelor de putere, bazate pe Si, la tensiuni și curenți mari generează o semnificativă pierdere de energie. Mai mult decât atât, s-a demonstrat faptul că funcționarea dispozitivelor pe Si la o temperatură mai mare de 100°C duce la degradări electrice serioase ale dispozitivului [1, 2]. O rezolvare ar fi introducerea unor sisteme de răcire, care însă ar duce la creșterea greutateii și dimensiunii întregului sistem. Pentru a depăși acest inconvenient, semiconductorii cu o bandă interzisă largă, atrag atenția. Dintre toți semiconductorii de bandă largă, carbura de siliciu (SiC) este cel mai promițător semiconductor care ar putea înlocui Si. Atât banda interzisă de valoare mare, cât și concentrația foarte mică de purtători intrinseci permit dispozitivului semiconductor bazat pe SiC să funcționeze la temperaturi mai înalte, față de cele realizate pe semiconductorul clasic, Si. Astfel, folosind SiC, dispozitivele de putere ar funcționa la temperaturi înalte (>200°C), cu o densitate de putere mai mare. În plus, datorită conductivității termice a SiC de valoare mare, acestea pot funcționa fără a avea nevoie de sisteme separate de răcire. Introducerea tehnologiei SiC, ca alternativă de înlocuire a Si, reprezintă un argument evident în realizarea dispozitivelor pentru aplicații de înaltă temperatură, datorită proprietăților deosebite ale acesteia. SiC este un semiconductor cu bandă interzisă largă, cu un câmp electric de străpungere de valoare mare, viteză de saturație a electronilor și conductivitate termică mari. În plus, SiC este singurul semiconductor de bandă largă pe care se poate crește un oxid (SiO<sub>2</sub>) stabil, însă în condiții diferite față de Si [3, 4]. Acest amănunt este deseori prea ușor trecut cu vederea, însă el reprezintă cheia oricărei tehnologii semiconductoare, atât din perspectivă procesării cât și din cea a posibilității realizării dispozitivelor metal-oxid-semiconductor (MOS) pe SiC.

### SCOPUL TEZEI DE DOCTORAT

*Scopul acestei teze este de a propune o structură adecvată și o tehnologie de fabricație pentru dispozitive pe SiC care să poată fi utilizate în aplicații din domeniul senzorilor cu aplicații în medii ostile.*

În acest sens, s-a urmărit punerea la punct a unei tehnologii versatile, care să poată fi adaptată și optimizată pentru două tipuri de senzori: senzor de temperatură pe bază de structură tip diodă Schottky, respectiv senzor de gaz pe bază de structură tip capacitor MOS. În stabilirea parametrilor proceselor tehnologice s-a avut în vedere că structurile acestea trebuie să funcționeze în medii ostile, caracterizate de temperatură înaltă (cel puțin 200°C), vibrații puternice, medii corozive, umiditate crescută.

În cazul diodelor Schottky pe SiC ca senzor de temperatură, o atenție specială este acordată obținerii unui contact metal-semiconductor stabil la temperaturi înalte prin formarea unui compus de tip siliciură la interfață. Optimizarea unei tehnologii de fabricație a capacitorilor MOS pe SiC presupune, de asemenea, anumite etape critice ale fluxului tehnologic. Posibilitatea creșterii unui oxid de înaltă calitate pe SiC reprezintă un avantaj important al acestui semiconductor. Acest proces necesită o atenție deosebită, deoarece performanțele unui capacitor MOS pe SiC depind foarte mult de calitatea oxidului crescut. Un obiectiv important în cadrul acestei etape a fluxului tehnologic îl reprezintă obținerea unei interfețe oxid / semiconductor de calitate înaltă, cu o densitate redusă de stări la interfață. Tratamente termice post-oxidare în diferite atmosfere sunt în acest sens propuse, fiind analizată influența lor asupra parametrilor structurilor experimentale. În plus, s-a avut în vedere optimizarea răspunsului capacitorilor MOS și se propune un design al dispozitivelor care să permită eliminarea capacităților parazite. Ca și în cazul diodelor Schottky, o etapă critică a funcționării acestora la temperaturi înalte este încapsularea structurilor pentru testare, fiind testate și analizate diferite soluții tehnologice.

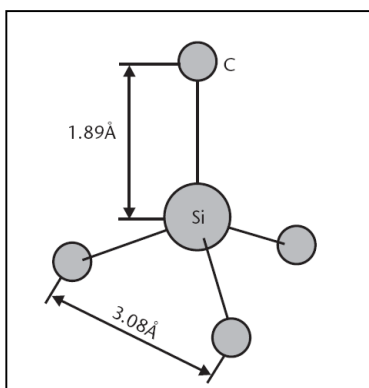
## CAPITOLUL 1

### DISPOZITIVE PE CARBURĂ DE SILICIU

#### 1.1. CARBURA DE SILICIU. STRUCTURA CRISTALINĂ ȘI PROPRIETĂȚI GENERALE DE MATERIAL

Pentru dezvoltarea ulterioară de dispozitive, SiC prezintă o serie de proprietăți importante, ca de exemplu: structura cristalină, politipuri, proprietăți electrice.

➤ **Structura cristalină a SiC.** Unitatea structurală de bază a SiC este un tetraedru format din patru atomi de carbon (C) în colțuri și unul de Si în centru, așa cum este ilustrat în Fig. 1.1 [5].



**Fig. 1.1.** Unitatea structurală a SiC: patru atomi de carbon sunt legați covalent cu un atom de siliciu în centru. [6]

Distanța dintre doi atomi de carbon este de 3.08 Å iar distanța dintre un atom de C și unul de Si este de 1.89 Å. Legătura Si-C este foarte puternică, atât datorită distanței mici între atomi (de exemplu distanța între atomi în legătura Si-Si este de 2.35 Å), cât și datorită hibridizării  $sp^3$ . SiC are mai mult de 200 de politipuri, împărțite în trei mari categorii cristalografice de bază: cubică (C), hexagonală (H) și romboedrică (R). Toate politipurile au un cadru hexagonal de straturi de SiC. Dintre toate politipurile existente, 4H-SiC este preferat datorită proprietăților sale electronice, având cea mai mare bandă interzisă și cea mai mare mobilitate a purtătorilor.

#### 1.2. DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE PE SiC PENTRU APLICAȚII DIN DOMENIUL SENZORILOR

Din punctul de vedere al funcționării la temperaturi înalte, senzorii pe Si au o comportare aproape similară cu cei pe SiC, până la o temperatură de 130°C. În plus, senzorii pe SiC sunt inerți din punct de vedere chimic, au o rezistență mecanică înaltă și sunt capabili să funcționeze la temperaturi mai înalte, datorită benzii interzise mari, a concentrației intrinseci de purtători scăzută și a conductivității termice înalte. *Având în vedere aceste caracteristici, SiC este un foarte bun semiconductor pentru realizarea de dispozitive electronice și senzori care să lucreze în medii ostile.* În acest sens, s-au dezvoltat tehnologii de fabricație, iar structurile test s-au caracterizat realizându-se o analiză a parametrilor electrici și propunându-se optimizări ale procesului tehnologic pentru: **dioda Schottky ca senzor de temperatură**, respectiv **capacitor MOS ca senzor de gaz**. Cercetarea asupra acestor dispozitive are în vedere optimizarea proiectării structurii, îmbunătățirea materialelor senzitive prin diverse procese tehnologice și înțelegerea mecanismelor de detecție în funcție de aplicația dorită. Dioda Schottky este un dispozitiv utilizat foarte des în domeniul senzorilor, datorită simplității procesului de fabricație. Acesta poate funcționa atât ca senzor de temperatură, cât și ca senzor de gaz [7]. Funcționarea ca senzor de temperatură se bazează pe polarizarea diodei la un curent constant, tensiunea directă având o variație liniară cu temperatura. În ceea ce privește aplicația pentru senzor de gaz, metalul pentru formarea contactului Schottky joacă un rol crucial. Acesta are rolul de a detecta moleculele de gaz prin diferite schimbări de fază ale metalului, în urma pătrunderii moleculelor de gaz în volumul său. Metalul cel mai utilizat pentru astfel de aplicații în domeniul senzorilor de hidrogen este Pd, datorită solubilității mari pe care o are la hidrogen. În plus, a fost demonstrat faptul că un aliaj format din PdNi, utilizat ca metal catalitic în realizarea dispozitivelor menționate, asigură o stabilitate mai bună în ceea ce privește detecția de hidrogen. Așadar, Pd asigură o mai bună selectivitate a moleculelor de  $H_2$ , în timp ce Ni încetinește schimbările de fază ale Pd atunci se detectează concentrații mai mari de  $H_2$  [8].

## CAPITOLUL 2

### TEHNOLOGIA DE FABRICAȚIE A DISPOZITIVELOR PE SiC. CARACTERIZĂRI ELECTRICE GENERALE

Având în vedere aplicația urmărită, de dezvoltare de senzori pentru aplicații în medii ostile, proprietățile electrice ale SiC, descrise în capitolul anterior, răspund cerințelor pentru realizarea unor astfel de dispozitive. Deși sunt niște dispozitive simple din punct de vedere al fabricației, atât în cazul diodelor Schottky pe SiC, cât și al capacitivelor MOS pe SiC, sunt raportate o serie de probleme tehnologice care afectează puternic parametrii de dispozitiv.

*În această direcție s-au focalizat și cercetările prezentate în teza de doctorat, și anume, pe studierea și optimizarea proceselor tehnologice de fabricare a structurilor de tip diodă Schottky pe SiC și capacitor MOS pe SiC, care să funcționeze corect ca senzor de temperatură, respectiv ca senzor de gaz – în ambele cazuri urmărindu-se asigurarea funcționării în condiții de temperatură înaltă.*

- În ceea ce privește **dioda Schottky pe SiC**, un pas tehnologic important în realizarea acestora o reprezintă parametrii procesului termic rapid post-metalizare, care este necesar pentru realizarea unui contact Schottky stabil la temperaturi înalte. Acest proces tehnologic are rolul de a transforma metalul depus (în cazul nostru Ni) într-un compus ce asigură o mai mare stabilitate la temperaturi înalte. Acest compus este siliciura de Ni și există sub mai multe faze ( $Ni_xSi_x$ ). Pentru obținerea unui contact Schottky cât mai uniform, procesul termic rapid post-metalizare depinde de anumiți factori, și anume: temperatură, timp și atmosfera în care se face tratamentul. În plus, grosimea metalului joacă un rol foarte important în realizarea unui contact Schottky uniform, deoarece reacția acestuia cu substratul SiC nu este aceeași la grosimi diferite pentru o temperatură constantă. Analiza micro-fizică a acestor tratamente a fost realizată prin difracție de raze X, care a permis obținerea principalelor informații legate de reacția Ni-ului cu SiC.

- Pe de altă parte, realizarea experimentală a **capacitorului MOS pe SiC** se confruntă cu o serie de etape tehnologice care trebuie verificate în mod deosebit. Ca și Si, SiC este un semiconductor pe care se poate crește un oxid ( $SiO_2$ ) cu o calitate promițătoare pentru realizarea unui sistem MOS. Spre deosebire de  $SiO_2$ -ul crescut pe Si, acesta este obținut pe SiC în condiții puțin diferite în ceea ce privește timpul și temperatura procesului de creștere. Obținerea unui oxid de calitate înaltă presupune fixarea unor parametrii de proces care să asigure creșterea unui oxid cu rezistivitate cât mai mare, fără a introduce alte impurități care ar putea afecta proprietățile sale izolatoare. Creșterea unui strat de  $SiO_2$  pe SiC depinde de următorii parametri: temperatură, atmosfera în care are loc oxidarea și timpul procesului. Interfața oxid/semiconductor reprezintă o altă problemă de care trebuie să se țină cont într-un sistem MOS. În cazul unui sistem  $SiO_2/SiC$ , densitatea stărilor de interfață este mai mare cu aproximativ două ordine de mărime față de  $SiO_2/Si$ . Acest inconvenient este cauzat de apariția legăturilor nesaturate Si-C, de atomii de C nereacionați în urma ruperii legăturii Si-C și de prezența vacanțelor de oxigen din imediata vecinătate a interfeței  $SiO_2/SiC$ . Ținând cont de aceste aspecte, diferite procese tehnologice au fost dezvoltate pentru reducerea densității de stări de la interfața  $SiO_2/SiC$ .

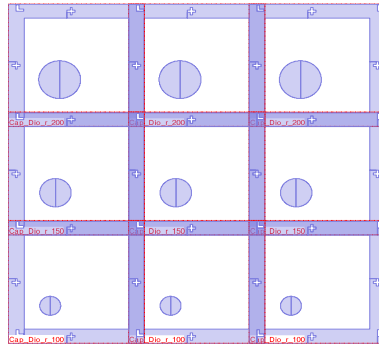
*În acest capitol va fi prezentată tehnologia de realizare a celor două dispozitive pe SiC, fluxul tehnologic și măștile fotolitografice corespunzătoare, respectiv procesele tehnologice de fabricație și caracterizările electrice generale ale dispozitivelor realizate, analizându-se principalii parametri extrași pentru fiecare dispozitiv în parte.*

#### 2.1 PROIECTAREA UNUI SET DE MĂȘTI FOTOLITOGRAFICE COMUN PENTRU REALIZAREA DIODELOR SCHOTTKY ȘI CAPACITOARELOR MOS PE SiC

S-a avut în vedere ca măștile fotolitografice să fie utilizabile pentru ambele dispozitive realizate pe SiC. S-a optat pentru proiectarea unor arii active cu diametre diferite: 200, 300, respectiv 400  $\mu m$  pe măștile fotolitografice, pentru a putea selecta dimensiunea optimă (raportul densității de defecte la sensibilitatea de măsură să fie cât mai bun). În plus, sunt asigurate și densități de curent diferite ale diodelor Schottky pe SiC. În cazul capacitorului MOS pe SiC valorile capacităților active sunt mult mai mari în raport cu capacitățile parazite introduse de pad-uri.

În continuare, se va prezenta în paralel proiectarea noului set de măști fotolitografice pentru fabricația atât a diodelor Schottky, cât și a capacitivelor MOS pe SiC.

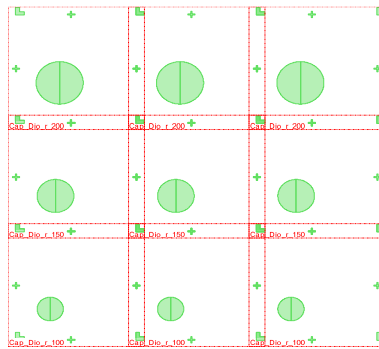
- pentru definirea ariilor active ale dispozitivelor pe SiC (deschiderea ferestrelor în oxidul de câmp) s-a proiectat o mască fotolitografică ce conține structuri cu o configurație circulară, având diametre diferite: 200, 300, respectiv 400  $\mu\text{m}$ . În Fig. 2.1 este ilustrată masca fotolitografică cu rol comun pentru definirea ariilor active, atât a diodelor Schottky, cât și a capacitoarelor MOS pe SiC.



**Fig. 2.1** Mască fotolitografică pentru definirea ariilor active atât a diodelor Schottky, cât și a capacitoarelor MOS pe SiC

Această mască fotolitografică a fost proiectată și realizată pentru utilizarea unui fotorezist pozitiv, zonele colorate fiind transparente, iar aria albă opacă. În cazul capacitoarelor MOS, în aceste ferestre deschise se va crește oxidul MOS, prin oxidare termică uscată.

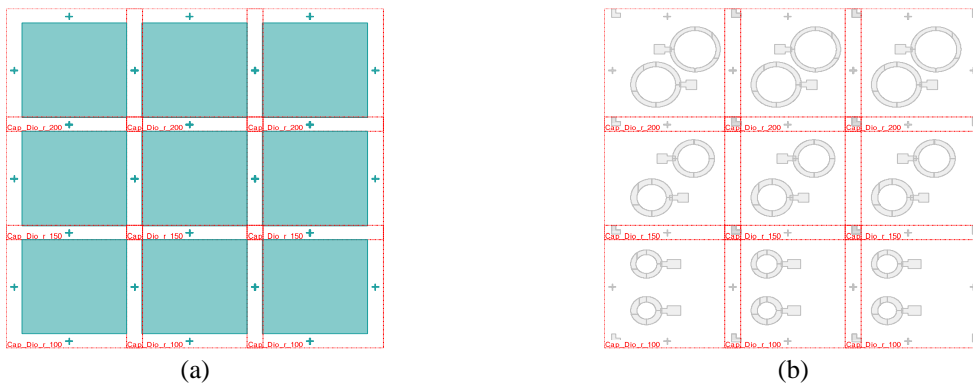
- pentru definirea metalului catalitic, respectiv metalului pentru formarea contactului Schottky. Astfel, masca numărul 2 are rolul de a delimita și reține metalul catalitic/Schottky pe suprafața activă și este ilustrată în Fig. 2.2. Diametrul ferestrelor circulare este cu 50  $\mu\text{m}$  mai mare, pentru a acoperi în totalitate oxidul activ și a lua anumite măsuri de siguranță în cazul unei supracorodari a oxidului de pasivare.



**Fig. 2.2** Mască fotolitografică pentru definirea metalului catalitic, respectiv a metalului pentru formarea contactului Schottky

Această mască a fost proiectată și realizată în două variante, atât pentru cazul în care metalul se depune pe întreaga suprafață a plachetei și apoi se delimitează prin corodare, cât și pentru tehnica lift-off.

- pentru realizarea pad-urilor de contactare a fost proiectată masca cu numărul 3, ce are rolul de a defini geometria acestora. Pentru definirea pad-urilor s-au proiectat măști fotolitografice diferite, fiind ilustrate în Fig. 2.3.



**Fig. 2.3** Măști fotolitografice pentru definirea pad-urilor pentru diodele Schottky (a), respectiv capacitoarelor MOS (b) pe SiC

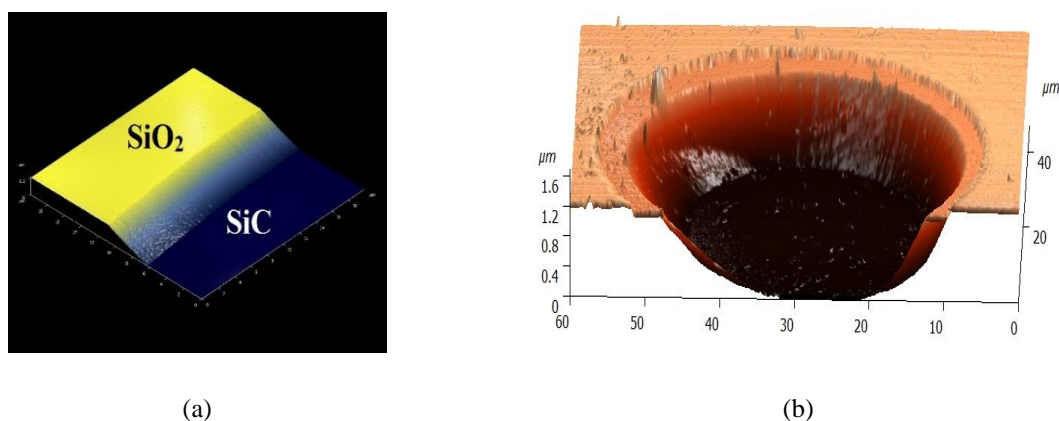
În cazul pad-urilor de contactare ale diodelor Schottky pe SiC, acestea sunt realizate prin definirea unui sandwich metalic (Cr/Au) pe întreg cipul unei diode Schottky. Astfel, firul de Au poate fi lipit oriunde pe această arie, favorizând procesul de incapsulare. Pe de altă parte, în cazul capacitorilor MOS, dimensiunea pad-urilor contează foarte mult, deoarece pot introduce capacități parazite ce pot afecta funcționarea electrică a dispozitivului MOS. În acest sens, s-au proiectat pad-uri cu dimensiuni mult mai mici în raport cu metalul definit în aria activă a capacitorului MOS. Însă, pentru a elimina chiar și capacitățile parazite foarte mici introduse de aceste paduri, pe mască au fost prevăzute o serie de structuri alăturate cu dimensiuni identice, așa cum se poate observa în Fig. 2.3 (b), unde metalul de contactare este eliminat, lăsând metalul catalitic expus influenței gazelor de analizat.

## 2.2 PREZENTAREA ETAPELOR TEHNOLOGICE COMUNE ÎN REALIZAREA DISPOZITIVELOR PE SiC – FLUX TEHNOLOGIC COMUN

Atât dioda Schottky, cât și capacitorul MOS au fost realizate pe același tip de substrat, respectiv 4H-SiC, de tip n. Acesta conține un strat epitaxial cu o grosime de aproximativ  $8 \mu\text{m}$  și o concentrație de purtători de  $2.07 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . În schimb, substratul este dopat puternic, având o concentrație de purtători de ordinul  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Structurile celor două dispozitive prezintă caracteristici similare din punct de vedere al tehnologiei de fabricație. *Propunerea unui flux tehnologic care se bazează pe etape comune ale procesului de realizare și, mai mult, pe măști fotolitografice comune, conduce la reducerea semnificativă a costurilor de fabricație. În plus, pe lângă reducerea costurilor de fabricație, se câștigă și foarte mult timp, pentru punerea la punct a unor procese tehnologice individuale.*

**În continuare este realizată o prezentare detaliată a etapelor tehnologice de fabricare a structurilor test:**

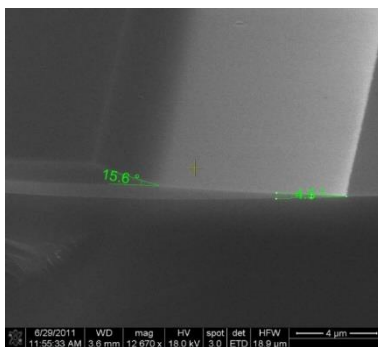
- ❖ Curățarea chimică a plachetelor de SiC
- ❖ Formarea contactului ohmic – depunere Ni/Cr pe spatele plachetelor, urmată de un tratament termic rapid post-metalizare pentru obținerea unei siliciuri de Ni
- ❖ Depunerea unui strat de SiO<sub>2</sub> pentru pasivarea suprafeței plachetelor de SiC
- ❖ Definirea ariilor active în oxidul de câmp prin procese de fotogravură
  - O atenție deosebită s-a acordat corodării oxidului de câmp. Acest proces s-a realizat utilizând o soluție chimică compusă din fluorură de amoniu și acid acetic ( $\text{NH}_4\text{F}:\text{CH}_3\text{-COOH} = 2:1$ ). În urma acestei corodări s-a obținut un profil tip rampă în oxidul de câmp, care este ilustrată în Fig. 2.4 cu ajutorul unei analize de microscopie de forță atomică (AFM).



**Fig. 2.4** Imagini AFM ale ferestrelor deschise în oxidul de câmp, ilustrând configurația cu profil de rampă: (a) vedere în secțiune; (b) vedere de sus

- S-a ales această configurație datorită eficienței sale în ceea ce privește reducerea efectelor negative introduse de stresul aplicat de câmpul electric de la marginea contactului cu metalul [9]. În Fig. 2.5 este ilustrată o imagine obținută cu ajutorul microscopiei electronice de baleiaj (SEM) în care se evidențiază apariția a două rampe în urma corodării oxidului de câmp.





**Fig. 2.5** Imagine SEM ce evidențiază profilul de rampă obținut în oxidul de câmp

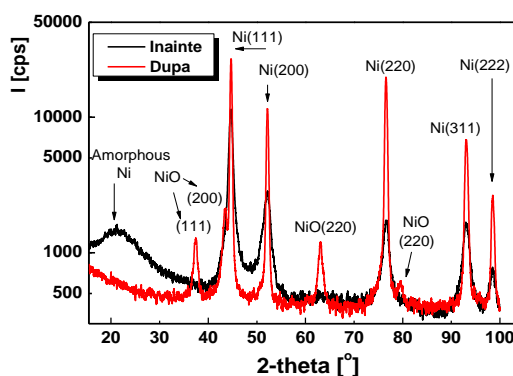
- După cum se observă, prima rampă, din imediata vecinătate a ariei active este foarte scăzută, având un unghi mic ( $4.5^\circ$ ). Ea are rolul de a asigura o distribuție a densității de curent cât mai uniformă și de a elimina posibile aglomerări ale liniilor de câmp la marginea contactului cu metalul [79]. Acest profil în rampă este utilizat atât pentru realizarea diodelor Schottky, cât și a capacitivelor MOS pe SiC.

*Etapele tehnologice descrise până în acest moment sunt comune în fluxul tehnologic de realizare al celor două dispozitive. Deoarece capacitorul MOS presupune prezența unui oxid între metalul de poartă și SiC, plachetele procesate sunt împărțite în loturi diferite. În acest sens, în continuare se vor discuta separat etapele fluxului tehnologic de realizare al celor două dispozitive pe SiC.*

### 2.3. DIODA SCHOTTKY. FLUX TEHNOLOGIC - CONTINUARE

#### ❖ Realizarea contactului Schottky prin tratamente termice rapide post-metalizare

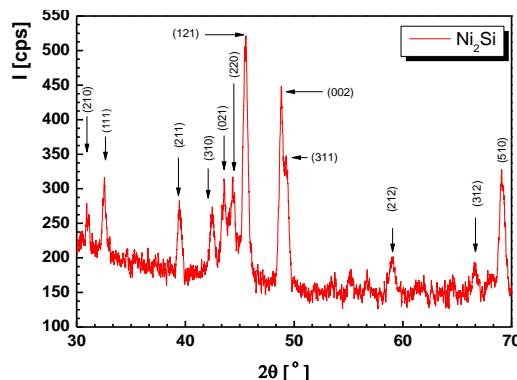
După realizarea profilului de rampă în oxidul de câmp, s-a depus un film subțire de Ni (150 nm). Acesta a fost definit în ferestrele deschise în oxidul de câmp printr-un proces de fotogravură. Obținerea unui contact Schottky stabil la temperaturi înalte este condiționat de un tratament termic rapid post-metalizare. În acest sens, s-au realizat mai multe loturi, aplicând diferite tratamente termice Ni-ului depus pe SiC. Astfel, primele contacte Schottky Ni/4H-SiC au suferit un tratament termic post-metalizare la o temperatură de  $500^\circ\text{C}$ , în atmosferă de Ar [10]. Pentru a vedea felul în care tratamentul termic afectează cristalinitatea stratului metalic, s-a făcut și o analiză de difracție de raze X înainte și după acest tratament. Măsurătorile au fost realizate utilizând difractometrul „SmartLab Rigaku” ce aparține IMT București. Spectrele de difracție au fost obținute prin metoda unghiului de incidență standard. În Fig. 2.6 sunt suprapuse cele două pattern-uri de difracție obținute pentru Ni, înainte (negru) și după (Roșu) tratamentul termic.



**Fig. 2.6** Difractograme de raze X înregistrate înainte și după tratamentul termic al stratului de Ni depus pe SiC

Se poate observa că, înainte de tratamentul termic rapid, apare o fază amorfă a Ni-ului la  $2\theta = 21.5^\circ$ . După realizarea procesului termic, intensitatea de difracție crește, ceea ce înseamnă o cristalinitate mai bună a straturilor de Ni. În plus, analiza datelor obținute în urma măsurătorilor de difracție de raze X, a permis calcularea dimensiunii medii de cristalin în stratul metalic. Apare o creștere a dimensiunii de cristalin de la  $52 \text{ \AA}$  la  $217 \text{ \AA}$ , ceea ce duce la o îmbunătățire considerabilă a structurii cristaline. Un al doilea lot de structuri test a fost supus unui tratament termic post-metalizare al contactului Schottky Ni/4H-SiC realizat la temperatura de  $600^\circ\text{C}$  [11], celelalte condiții rămânând identice. Acest tratament a condus la îmbunătățiri semnificative ale performanțelor electrice în ceea ce privește senzorul de temperatură. Valoarea barierei Schottky a crescut cu mai mult de  $0.5 \text{ eV}$  la aceeași temperatură de măsură. Pentru obținerea unui contact Schottky uniform, ce constă în formarea unei faze stabile a siliciurii de Ni ( $\text{Ni}_2\text{Si}$ ), a fost demonstrată necesitatea creșterii temperaturii la care se realizează procesul termic [12]. Astfel, diverse tratamente termice ale contactului Ni/4H-SiC au fost realizate la

temperaturi de 700 °C, timp de 10 minute, respectiv 800 °C, timp de 8 minute, ambele realizate în atomeșfera de Ar [13]. În cazul tratamentului termic la temperatura de 700 °C au fost obținute caracteristici I-V care conduc la calculul a două bariere Schottky. Acest fapt este datorat neuniformităților contactului Schottky, create în timpul tratamentului termic incomplet pentru realizarea siliciurii de Ni pe întreaga suprafață a contactului Schottky. S-a observat că, odată cu creșterea temperaturii de proces, Ni-ul reacționează și mai mult cu SiC, ducând la formarea unui contact Schottky mai uniform. Astfel, caracteristicile I-V au condus la calculul unei singure bariere Schottky, și mai mult aceasta prezintă o variație mică, cuprinsă între 1.46-1.52 eV, cu temperatura de măsură a diodelor (25-125°C). Un contact Schottky Ni/4H-SiC stabil, care să reziste în aplicațiile la temperaturi înalte (450°C), a fost obținut în urma unui tratament termic post-metalizare la o temperatură de 800 °C, timp de 8 minute, în atmosferă de azot [14]. Acest contact stabil este definit printr-o barieră Schottky cu o valoare aproape constantă în intervalul de temperatură 25 – 450°C. În Fig. 2.7 se prezintă difractograma de raze X corespunzătoare:



**Fig. 2.7** Difractograma de raze X pentru evidențierea formării  $\text{Ni}_2\text{Si}$  pe întreaga suprafață a contactului Schottky

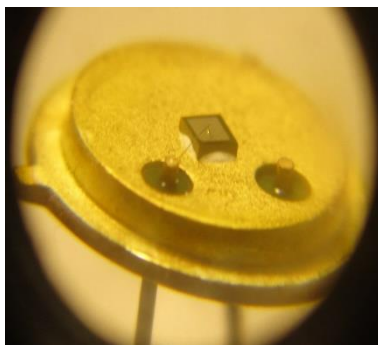
În analiza de raze X, se observă formarea unei singure faze a siliciurii de Ni, și anume  $\text{Ni}_2\text{Si}$ , un compus foarte stabil la temperaturi înalte.

❖ **Definire pad-uri – depunere Cr/Au**

❖ **Încapsularea dispozitivelor** finale reprezintă o etapă foarte importantă în ceea ce privește funcționarea la temperaturi ridicate ( $> 200\text{ °C}$ ). Având în vedere că diodele Schottky vor fi testate la o temperatură mai mare de 400°C, acestea pot avea un randament scăzut în condițiile în care procesul de încapsulare nu este fiabil. Acest proces cuprinde o serie de etape critice, printre care cea mai importantă este contactarea/lipirea cipului de ambaza capsulei. Modificarea parametrilor senzorului în timpul funcționării la temperaturi de 400 - 450°C este cauzată, în majoritatea situațiilor practice, de degradarea capsulei și conexiunilor terminale-capsula [15]. Pentru încapsularea diodelor Schottky, realizate în vederea utilizării lor ca senzor de temperatură, s-a folosit modelul de capsulă TO39, care are atât ambaza cât și cele două terminale izolate de aceasta, aurite. Conectarea din punct de vedere electric a cipului cu ambaza se realizează în mai multe moduri:

- ✓ lipirea chip-ului (spatele) direct pe ambaza aurită cu o pastă de Ag pentru temperatură scăzută:  $T < 200\text{ °C}$ ;
- ✓ lipirea chip-ului direct pe ambaza aurită cu o pastă de Ag pentru temperatură ridicată:  $T = [400 - 500\text{ °C}]$ ;
- ✓ lipirea chip-ului prin eutectic Au-Au;
- ✓ lipirea chip-ului cu aliaj AuIn.

În Fig. 2.8 este ilustrat modul de conectare a unui chip de diodă Schottky pe SiC la o capsulă TO39, unde unul dintre terminale a fost conectat la anodul diodei Schottky, iar celălalt a fost lăsat liber.



**Fig. 2.8** Dioda Schottky pe SiC lipită pe ambaza capsulei TO39.

Catodul diodei este conectat direct la ambază. Anodul diodei Schottky pe SiC se conectează prin intermediul unui fir de aur cu o grosime de 25  $\mu\text{m}$ , la terminalul aurit al ambazei.

#### 2.4. CAPACITORUL MOS. FLUX TEHNOLOGIC – CONTINUARE

❖ **Creșterea unui oxid termic în atmosferă de oxigen uscat** - în ferestrele deschise în oxidul de câmp depus s-a crescut un oxid subțire în atmosfera uscată de oxigen. Plachetele de SiC au fost ținute la o temperatură de 1100 °C, timp de 2 ore. În urma acestui proces de oxidare termică s-a obținut o grosime de aproximativ 30 nm, valoare confirmată de măsurători capacitate-tensiune (C-V). Acesta este de fapt oxidul activ al dispozitivului MOS peste care se va defini un electrod metalic de poartă.

❖ **Tratamente termice post-oxidare pentru îmbunătățirea calității oxidului și interfeței SiO<sub>2</sub>/SiC.** Pentru îmbunătățirea atât a calității oxidului crescut pe SiC, cât și a interfeței SiO<sub>2</sub>/SiC, două tratamente termice post-oxidare au fost propuse și efectele lor asupra calității structurilor au fost comparate:

- ✓ "Rapid Thermal Annealing (RTP) - N<sub>2</sub>" (N<sub>2</sub>) – structuri în care oxidul crescut a fost supus unui tratament termic rapid în atmosferă de N<sub>2</sub> la o temperatură de 1100°C, timp de 6 minute.
- ✓ "POCl<sub>3</sub> Thermal Annealing " - structuri în care oxidul a fost supus unui tratament termic la o temperatură de 1000°C, timp de 30 de minute, în atmosferă de POCl<sub>3</sub>.

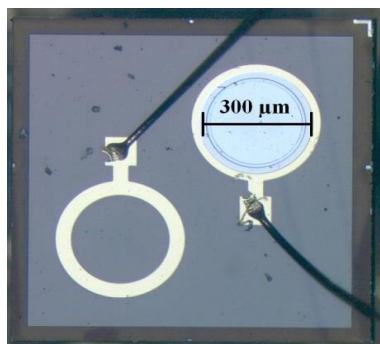
❖ **Definirea electrodului de poartă al capacitoarelor MOS pe SiC. Depunere metal catalitic.**

Pentru realizarea electrodului de poartă al capacitoarelor MOS s-a depus un film subțire de Pd, cu o grosime de aproximativ 50 nm. Acesta a fost depus prin sputtering (metoda pulverizării catodice) și definit printr-un proces de fotogravură peste oxidul crescut pe SiC.

❖ **Definirea pad-urilor capacitoarelor MOS pe SiC – depunere și definire Cr/Au.**

❖ **Încapsularea capacitoarelor MOS pe SiC.**

Metodele descrise anterior pentru încapsularea diodelor Schottky pe SiC pot fi aplicate cu succes și în cazul încapsulării capacitorelor MOS pe SiC, iar în Fig. 2.9 este prezentată imaginea optică a unui capacitor MOS încapsulat într-o capsulă de tip TO39, utilizând tehnologia lipirii firului de Au.



**Fig. 2.9** Încapsularea capacitorului MOS pe SiC utilizând o capsulă de tip TO39

Structurile circulare identice care se observă în imaginea optică reprezintă capacitorul MOS – senzor, cea din partea dreaptă, identificabil prin stratul de Pd din zona activă, respectiv capacitorul proiectat pentru eliminarea capacității parazite introdusă de pad, în partea stângă. Pentru contactarea electrodului de pe fața structurii MOS s-a utilizat tehnologia lipirii firului de Au. Spatele chip-ului, reprezentând cel de-al doilea electrod al capacitorului MOS, a fost conectat la capsulă prin una din cele 4 metode descrise anterior. Structura din partea stângă a fost conectată la cel de-al treilea pin al capsulei, metalul fiind depus direct pe oxidul de câmp.

## CAPITOLUL 3

### INTERFAȚA SiO<sub>2</sub>/SiC

Un proces termic post-oxidare al oxidului crescut pe SiC reprezintă un pas important în realizarea unui capacitor MOS pe SiC stabil. Proprietățile electrice ale unei interfețe SiO<sub>2</sub>/SiC sunt afectate de o valoare mare a densității de stări de la interfață. Aceste defecte, active din punct de vedere electric, sunt reprezentate de diferite aglomerări ale atomilor de C la suprafața SiC [16, 17] și de legăturile triple de oxycarburi de siliciu (SiC<sub>x</sub>O<sub>y</sub>) [18], apărute la interfață în timpul procesului de creștere a oxidului pe SiC. Acestea din urmă sunt considerate a fi principala sursă responsabilă cu creșterea semnificativă a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC [19, 20]. Compușii SiC<sub>x</sub>O<sub>y</sub> se formează instant la suprafața SiC, atunci când placheta de SiC intră în contact cu aerul [21]. Acești compuși sunt inerți din punct de vedere chimic, neputând fi îndepărtați printr-o simplă corodare umedă. În continuare, se vor prezenta caracterizările electrice pentru cele 3 tipuri de capacitatoare MOS pe SiC, fiind denumite în următorul mod:

- ❖ „AO” reprezintă capacitorul MOS pe SiC al cărui oxid nu a fost supus nici unui tratament termic post-oxidare;

- ❖ „N<sub>2</sub>” reprezintă capacitorul MOS pe SiC al cărui oxid a fost supus tratamentului termic post-oxidare în atmosferă de azot;

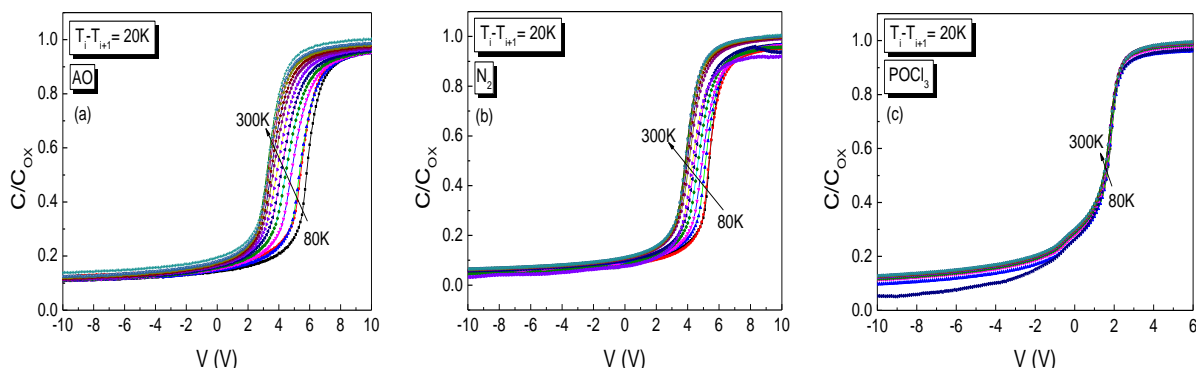
- ❖ „POCl<sub>3</sub>” reprezintă capacitorul MOS pe SiC al cărui oxid a fost supus tratamentului termic post-oxidare în atmosferă de oxiclură de fosfor;

Capacitoarele MOS pe SiC au fost caracterizate electric atât direct pe plachetă, cât și după încapsulare, utilizând echipamentul Keithley 4200-SCS. Toate curbele capacitate-tensiune (C-V) au fost obținute polarizând structurile de test din zona de acumulare spre golire adâncă (deep depletion). Setup-ul de măsură standard a fost adaptat astfel încât să determinăm stările de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, distribuite pe nivele energetice în banda interzisă a SiC, până la 0.6 eV sub banda de conducție, utilizând doua metode.

#### 3.1 METODA „GRAY-BROWN”

Această metodă presupune realizarea unor măsurători C-V, înregistrate la frecvențe înalte ( $f = 1$  MHz), dar la temperaturi joase, de la azot lichid (80 K) la temperatura camerei (300 K), cu un pas de temperatură de 20 K. Datele astfel obținute, constând în caracteristici capacitate-tensiune-temperatura (C-V-T), sunt utilizate pentru determinarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC ( $D_{it}$ ). Acestea sunt distribuite pe nivele energetice din imediata vecinătate a benzii de conducție ( $E_c$ ) a SiC, până la 0.2 eV sub minimul acesteia. Astfel, pentru a realiza aceste măsurători, la diferite temperaturi în intervalul 80-300 K, a fost necesară plasarea structurilor încapsulate într-un criostat de tip „Janis VPF 100 Cryostat”, în care temperatura este reglată utilizând controlerul de temperatură LakeShore. Întregul sistem a fost conectat la un echipament de caracterizare electrică a dispozitivelor semiconductoare, Keithley 4200 SCS.

În Fig. 3.1 sunt prezentate caracteristicile C-V-T obținute la frecvență de 1 MHz, pentru cele trei tipuri de structuri analizate (notate AO, N<sub>2</sub>, POCl<sub>3</sub>):



**Fig. 3.1** Caracteristici C-V -T pentru cele 3 tipuri de capacitatoare MOS pe SiC: (a) AO; (b) N<sub>2</sub>; (c) POCl<sub>3</sub>

Așa cum se observă în Fig. 3.1 (a), curbele C-V ale probei AO sunt deplasate către tensiuni mai mari odată cu scăderea temperaturii, indicând o creștere a tensiunii de benzi netede ( $V_{FB}$ ). În plus, valoarea lui  $D_{it}$  crește pe măsură ce nivelele energetice asociate stărilor de interfață se apropie de banda de conducție a SiC [22, 23]. Comparând proba N<sub>2</sub> cu proba AO, ilustrată în Fig. 3.1 (b), se observă că pentru capacitorul MOS, al cărui oxid a fost tratat termic în atmosferă de N<sub>2</sub>, are loc o reducere a shift-ului dintre caracteristicile C-V-T, fapt ce presupune o reducere a  $D_{it}$ . Mai mult, în cazul probei POCl<sub>3</sub>, caracteristicile sunt aproape suprapuse cu scăderea temperaturii de măsură, ceea ce înseamnă că tensiunea de benzi netede este aproape constantă și asigură o bună stabilitate a capacitorului MOS. În plus, această comportare semnalează o reducere substanțială a  $D_{it}$ .

Conform metodei Gray-Brown, nivelul Fermi este împins către marginea benzii de conducție a SiC odată cu scăderea temperaturii, ducând la apariția unui shift al caracteristicii C-V. Prin urmare, densitatea stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC ( $D_{it}$ ) poate fi estimată conform relației [24]:

$$D_{it}(E_c - E_t) = \frac{C_{ox}(V_{FB}^{T_{i+1}} - V_{FB}^{T_i})}{q(E_F^{T_{i+1}} - E_F^{T_i})} \quad (3.1)$$

În această relație,  $E_c - E_t$  este nivelul mediu de energie al stărilor de interfață, iar  $T_{i+1} < T_i$  sunt două temperaturi consecutive de măsură.

Valoarea diferenței  $E_c - E_t$  poate fi calculat conform relației [25]:

$$E_c - E_t = \frac{(E_c - E_F^{T_{i+1}}) + (E_c - E_F^{T_i})}{2} \quad (3.2)$$

Distribuția densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC este ilustrată în Fig. 3.2, pentru toate cele 3 tipuri de capacitoare MOS pe SiC. Valorile pentru  $D_{it}$  au fost calculate cu ajutorul ecuației (3.1), utilizând atât variația tensiunii de benzi netede cu temperatura, cât și deplasarea nivelului Fermi spre banda de conducție atunci când temperatura de măsură scade până la  $T = 80$  K.

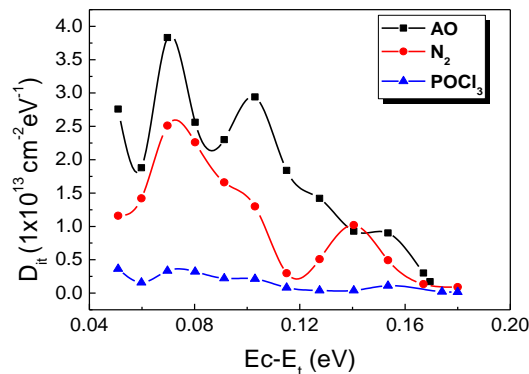


Fig. 3.2 Densitatea stărilor de interfață distribuită sub banda de conducție ( $E_c - E_t < 0.2 \text{ eV}$ )

Așa cum se observă, analiza C-V-T descrisă anterior, ajută la determinarea densității de stări de interfață, distribuite pe nivele de energie cu valori de până la 0.17 eV, la temperatura camerei, sub banda de conducție a SiC. Chiar dacă măsurătorile sunt făcute la înaltă frecvență ( $f = 1$  MHz), stările aflate pe nivelele mai puțin adânci de energie, plasate în imediata vecinătate a  $E_c$ , până la maxim  $E_c - E_t \sim 0.2$  eV, au un timp de răspuns suficient de rapid pentru a urmări semnalul de înaltă frecvență. Însă, ele devin active atunci când temperatura scade și energia de activare termică devine de asemenea mai mică [26].

**Valorile obținute pentru  $D_{it}$  demonstrează presupunerea făcută din analiza caracteristicilor C-V-T, și anume reducerea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, în urma celor două tratamente termice post-oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub> și POCl<sub>3</sub>. Densitatea stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC scade cu aproape un ordin de mărime în urma unui tratament termic post-oxidare în atmosfera de POCl<sub>3</sub>. De asemenea, o scădere a  $D_{it}$  este observată și la proba N<sub>2</sub>.**

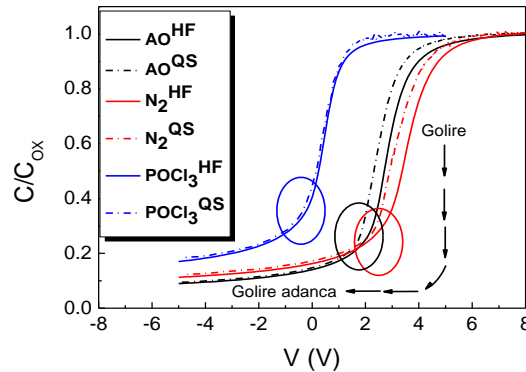
### 3.2 METODA „CASTAGNE ȘI VAPAILLE” – COMPARAȚIA UNOR CARACTERISTICI C-V OBȚINUTE LA FRECVENȚĂ JOASĂ (REGIM QUASI-STATIC), RESPECTIV FRECVENȚĂ ÎNALTĂ

Această metodă constă în comparația curbilor C-V înregistrate la înaltă ( $f = 1$  MHz), respectiv joasă frecvență ( $f < 1$  kHz) [27]. Un caz particular al acestei metode constă în analiza datelor obținute la înaltă frecvență, respectiv în regim quasi static. Deoarece stările de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC au un timp de răspuns mare atunci când se află pe nivele mai adânci din banda interzisă a semiconductorului, acestea nu pot fi determinate printr-o simplă măsurătoare la înaltă frecvență. De aceea, este nevoie de o măsurătoare lentă pentru determinarea acestora. Bazele acestei teorii constau în comparația dintre o caracteristică C-V obținută în regim quasi-static și una aproape ideală, în care stările de la interfața oxid/semiconductor nu sunt puse în evidență. Aceasta din urmă poate fi o caracteristică C-V teoretică sau obținută la o frecvență la care stările de interfață nu au timp să răspundă (frecvență înaltă). Regimul de măsură quasi-static asigură un timp suficient de mare pentru ca stările de la interfața oxid/semiconductor să răspundă. Prin această metodă se determină densitatea stărilor de interfață distribuite mai adânc în banda interzisă a semiconductorului, în intervalul [0.2 : 0.6] eV, sub minimul benzii de conducție. Prin urmare, s-au înregistrat și comparat măsurătorile C-V la înaltă frecvență ( $f = 1$  MHz), respectiv obținute în regim quasi-static (QS), ambele tipuri de măsurători fiind realizate la temperatura camerei. Din

comparația celor două caracteristici HF vs. QS,  $D_{it}$  poate fi estimată.

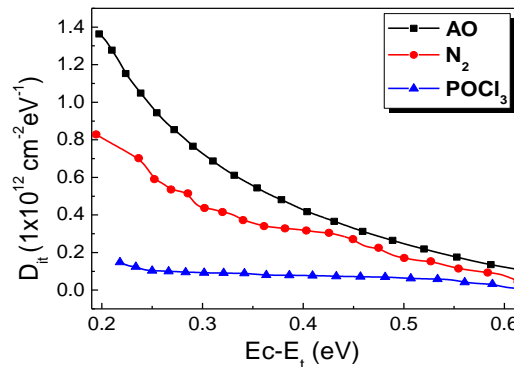
$$D_{it} = \frac{C_{ox}}{qS} \left( \frac{C_{QS}/C_{ox}}{1 - C_{QS}/C_{ox}} - \frac{C_{HF}/C_{ox}}{1 - C_{HF}/C_{ox}} \right) \quad (3.3)$$

Așa cum se poate observa în Fig. 3.3, diferențele dintre caracteristicile la înaltă frecvență, respectiv în regim quasi-static sunt evidente în zona de golire a caracteristicilor C-V.



**Fig. 3.3** Caracteristici C-V la înaltă frecvență, respectiv în regim quasi-static pentru toate cele 3 tipuri de capacitoare MOS

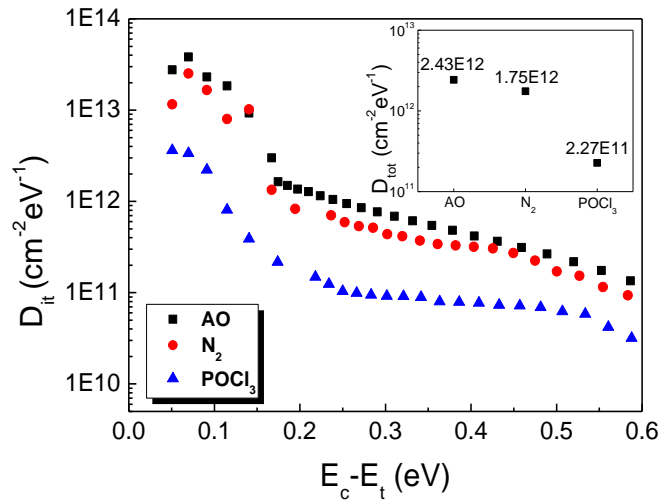
Se observă o diminuare a siflului dintre caracteristicile la înaltă frecvență, respectiv quasi-static, în urma diferitelor tratamente termice post-oxidare. Această reducere a diferenței dintre caracteristici duce la o diminuare a densității stărilor de la interfața  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  conform ecuației (3.3). Reprezentarea grafică pentru distribuția densității stărilor de interfață pe nivele mai adânci sub banda de conducție este ilustrată în Fig. 3.4.



**Fig. 3.4** Distribuția densității stărilor de interfață, pe nivele mai adânci sub banda de conducție a SiC

*Se observă o reducere semnificativă a densității stărilor de la interfața  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ , cu mai mult de un ordin de mărime, în urma unui tratament termic post-oxidare în atmosferă de  $\text{POCl}_3$ . Efectul fosforului în timpul unui tratament termic post-oxidare, asupra densității stărilor de la interfața  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ , este bazat pe pasivarea defectelor introduse de ruperea legăturii Si-C în timpul oxidării termice. Astfel, un atom de fosfor poate substitui până la 3 atomi de C, îndepărtând stările de interfață asociate acestora [28]. Rezultate similare, de reducere a densității de stări de la interfața  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ , au fost obținute în urma tratamentului termic post-oxidare în atmosferă de azot (proba  $\text{N}_2$ ), date în acord cu observațiile din literatură [29]. În acest caz, diminuarea densității este mai redusă, însă are valori comparabile cu cea de la proba  $\text{POCl}_3$  pe nivele mai adânci de energie sub banda de conducție. Avantajul metodei propuse de noi constă în timpul redus al tratamentului, fiind de fapt un tratament termic rapid (RTA), ceea ce diminuează costul de producție al senzorilor.*

În Fig. 3.5 este ilustrată densitatea stărilor de la interfața  $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  obținută prin ambele metode descrise anterior: din caracteristici C-V la temperaturi diferite în intervalul [80-300] K și măsurători C-V succesive la înaltă frecvență, respectiv în regim quasi-static. Insetul din Fig. 3.5 relevă o scădere semnificativă a densității totale stărilor de interfață pe măsura tratamentelor termice post oxidare în diferite atmosfere.



**Fig. 3.5.** Distribuția densității stărilor de interfață în intervalul [0.05-0.6] eV sub banda de conducție a SiC

Densitatea totală a stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC a fost calculată pentru toate cele 3 tipuri de capacitatoare MOS, integrând pe întreg domeniul cuprins între 0.05 eV și 0.6 eV sub banda de conducție:

$$D_{tot} = \int_{0.05 \text{ eV}}^{0.6 \text{ eV}} D_{it}(E_c - E_t) d(E_c - E_t) \quad (3.4)$$

unde:

$E_c$  reprezintă banda de conducție a SiC, iar

$E_t$  reprezintă nivelul de energie al stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC.

Așadar, în cazul capacitorului MOS pe SiC AO, densitatea totală a stărilor de interfață are o valoare de  $2.43 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , aceasta scăzând pe măsura diferitelor tratamente termice post-oxidare. Tratamentul termic rapid efectuat în atmosferă de azot a condus la o reducere a densității totale a stărilor de interfață până la o valoare de  $1.75 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . O reducere consistentă este observată în cazul probei POCl<sub>3</sub>, densitatea totală a stărilor fiind redusă cu mai mult de un ordin de mărime, mai exact până la o valoare de  $2.27 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ .

Potrivit rezultatelor obținute, putem spune că un tratament termic post-oxidare în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, la o temperatură de 1000°C, timp de 30 de minute, a reprezentat o soluție tehnologică benefică pentru îmbunătățirea performanțelor electrice ale capacitatoarelor MOS pe SiC realizate. O reducere a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, cu mai mult de un ordin de mărime, conduce la avantaje importante în realizarea unor dispozitive de tip MOS. Pe lângă stabilitatea caracteristicilor electrice, oferită la diferite temperaturi de măsură ale capacitatoarelor MOS pe SiC, această soluție tehnologică poate fi aplicată și în cazul fabricației unor tranzistoare MOS cu efect de câmp, fiind direct implicată în creșterea mobilității purtătorilor prin canal [30].

## CAPITOLUL 4

### CARACTERIZARE ELECTRICĂ A DEFECTELOR ÎN OXIDUL DE POARTĂ ALE STRUCTURILOR MOS

În acest capitol se vor prezenta câteva tehnici de caracterizare electrică ale oxidului crescut pe SiC, punând în evidență efectul tratamentelor termice post-oxidare în atmosferă de azot ( $N_2$ ), respectiv oxiclorigură de fosfor ( $POCl_3$ ).

#### 4.1. TESTE DE STRES ÎN TENSIUNE ALE CAPACITORULUI MOS PENTRU ANALIZA STRĂPUNGERII OXIDULUI DE POARTĂ

Trecerea curentului printr-un sistem de tip MOS poate fi în general descrisă de mecanismul de tunelare. La câmpuri electrice mari, purtătorii pot tunela prin banda interzisă a oxidului, conform mecanismului Fowler-Nordheim, procesul fiind studiat intensiv în cazul structurilor MOS pe Si [31,32]. Acest fenomen de tunelare poate oferi informații importante privind fiabilitatea oxidului. Astfel, mișcarea purtătorilor poate crea diferite defecte în oxid sau la interfața metal/oxid, uneori ajungându-se la distrugerea finală a dispozitivului MOS prin străpungerea oxidului.

Pentru a verifica acest mecanism de tunelare (Fowler – Nordheim) s-au făcut măsurători electrice curent-tensiune (I-V) pe toate cele 3 tipuri de capacitore MOS pe SiC. Structurile au fost polarizate în direct, crescând progresiv tensiunea pe poartă până la observarea unei creșteri bruște a curentului, care indică străpungerea distructivă a oxidului de poartă. Caracteristicile densitate de curent funcție de câmpul electric aplicat (J-E) sunt prezentate în Fig. 4.1.

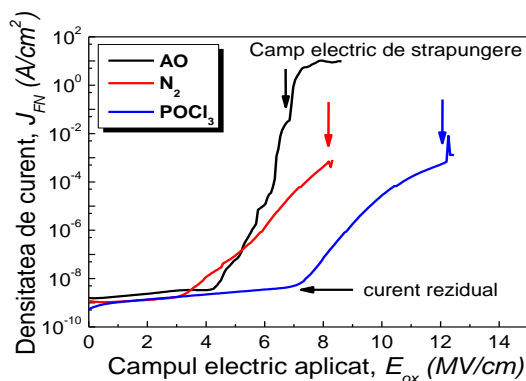


Fig. 4.1. Caracteristici J-E ale capacitorelor MOS pe SiC

Fig. 4.1. evidențiază variația densității de curent în funcție de câmpul electric aplicat pe poarta capacitorului MOS pe SiC. În cazul probei AO, densitatea de curent se menține constantă până la o valoare de aproximativ 4.5 MV/cm a câmpului electric aplicat, având valori de ordinul nA/cm<sup>2</sup>. Aceasta crește odată cu câmpul electric aplicat, având valori de ordinul 10<sup>-5</sup>-10<sup>-4</sup> A/cm<sup>2</sup> până la valori ale câmpului electric aplicat de aproximativ 6.3 MV/cm. Valoarea densității de curent demonstrează că străpungerea distructivă a oxidului încă nu a avut loc la aceste valori ale câmpului electric și că domină fenomenul de tunelare de tip Fowler – Nordheim. O creștere bruscă a densității de curent este observată în jurul valorii de 6.8 MV/cm a câmpului electric aplicat, având ca rezultat străpungerea distructivă a capacitorului MOS. În ceea ce privește proba tratată în N<sub>2</sub>, se observă o creștere a densității de curent la un câmp electric aplicat mic, în jurul a 3.3 MV/cm. Pe de altă parte, fenomenul de tunelare are loc pe un domeniu mai larg de câmpuri electrice aplicate, atingând o valoare de aproximativ 7-8 MV/cm la un nivel de densitate de curent de ordinul 10<sup>-5</sup> - 10<sup>-4</sup> A/cm<sup>2</sup>. O îmbunătățire semnificativă a calității oxidului este observată la proba tratată în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, prezentând curenți reziduali de ordinul nA/cm<sup>2</sup> până la câmpuri electrice aplicate de 7 MV/cm. Câmpuri electrice aplicate de peste 10 MV/cm redau densități de curent prin oxidul MOS de ordinul 10<sup>-5</sup> - 10<sup>-4</sup> A/cm<sup>2</sup>. Câmpul electric de străpungere al oxidului are o valoare de peste 12 MV/cm, o valoare aproape dublă față de cea a oxidului netratat (proba AO). Pentru determinarea barierei de potențial dintre SiO<sub>2</sub> și SiC ( $\Phi_b$ ) s-a utilizat formalismul Fowler -Nordheim și în acest sens s-a reprezentat în scală logaritmică densitatea de curent ce trece prin oxidul MOS raportat la pătratul câmpului electric aplicat,  $\ln(\frac{J_{FN}}{E_{ox}^2})$  în funcție de inversul câmpului electric aplicat,  $1/E_{ox}$ . Prin fitarea zonei liniare a acestei curbe cu o ecuație de gradul întâi rezultă  $\Phi_b$ . În Fig. 4.2 sunt reprezentate caracteristici Fowler – Nordheim obținute din măsurători I-V, pentru cele 3 tipuri de capacitore MOS pe SiC.



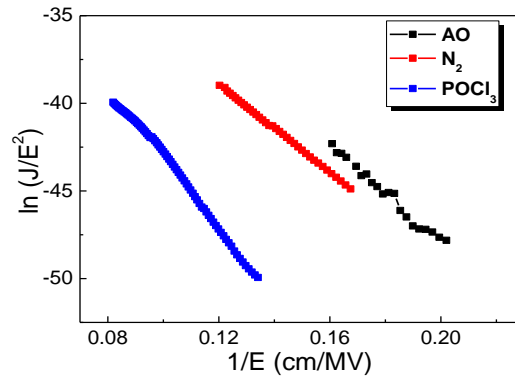


Fig. 4.2. Reprezentare Fowler-Nordheim pentru determinarea barierei de potențial de la interfața oxidului cu SiC

În urma analizei Fowler-Nordheim, s-au determinat următorii parametri pentru cele 3 tipuri de oxid MOS pe SiC: curentul rezidual raportat la aria activă a capacitorului MOS (densitate de curent), câmpul electric de străpungere al oxidului și bariera de potențial de la interfața oxidului cu SiC. Aceste valori sunt listate în tabelul 4.1:

Tab. 4.1 Valorile parametrilor oxidului MOS crescut pe SiC, determinați prin analize Fowler-Nordheim. Pentru aceste caracterizări s-a ales capacitoare MOS pe SiC cu aceeași arie, având diametrul ariei active de 300 μm

Proba C1 (d=300μm)	Curent rezidual	Câmp electric de străpungere	Înălțimea barierei de potențial de la interfața oxidului cu SiC
	$I_s$ (A/cm <sup>2</sup> )	$E_b$ (MV/cm)	$\Phi_b$ (eV)
AO	$3.3 \cdot 10^{-9}$	6.73	2.23
N <sub>2</sub>	$1.5 \cdot 10^{-9}$	7.03	2.47
POCl <sub>3</sub>	$1.48 \cdot 10^{-9}$	12.2	2.98

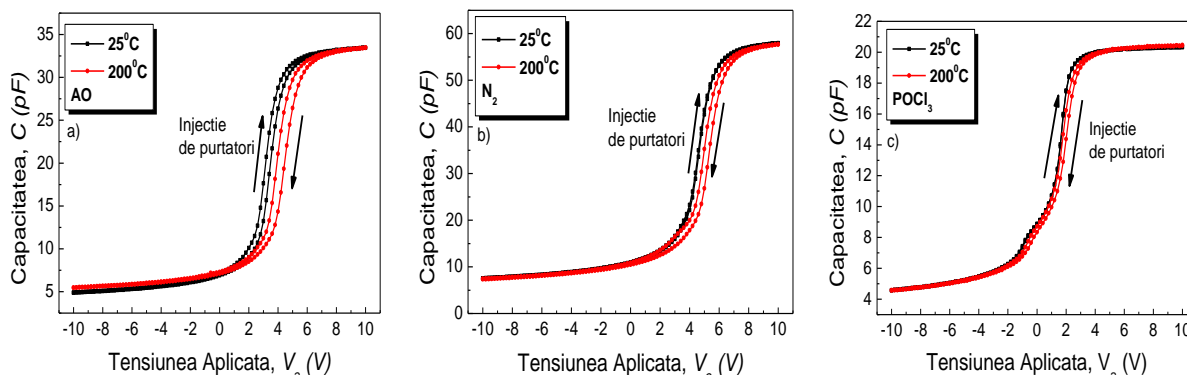
Așa cum putem observa în tabelul 4.1, curentul rezidual are o valoare de două ori mai mică în urma tratamentelor termice post-oxidare. Câmpul electric de străpungere al oxidului crește în cazul tratamentului în azot, însă este îmbunătățit semnificativ atunci când acesta este supus unui tratament termic în atmosferă de POCl<sub>3</sub>. Valoarea efectivă a înălțimii barierei de potențial de la interfața oxidului cu SiC, pentru proba AO, este 2.23 eV. În ceea ce privește oxidul crescut pe SiC în atmosferă uscată de O<sub>2</sub>, atomii de C rămași la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC în timpul oxidării termice, degradează atât calitatea interfeței, cât și fiabilitatea oxidului. Prin urmare, densitatea stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC are o valoare cu aproape două ordine de mărime față de cea din cazul SiO<sub>2</sub>/Si [33]. Această valoare mare a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC afectează bariera de potențial prin scăderea acesteia, având ca rezultat creșterea numărului de purtători injectați în oxid [34]. Așa cum se poate observa în tabelul 4.1,  $\Phi_b$  crește în ambele cazuri ale tratamentelor termice post-oxidare (N<sub>2</sub> și POCl<sub>3</sub>). Aceasta are o valoare de 2.47 eV în cazul probei N<sub>2</sub>, crescând în cazul tratamentului termic în atmosferă de POCl<sub>3</sub>. În ultimul caz,  $\Phi_b$  atinge o valoare de 2.98 eV, mai apropiată de valoarea sa ideală de 2.7 eV [35].

*Coroborând aceste rezultate cu cele din capitolul anterior, putem concluziona că tratamentele termice post oxidare în diferite atmosfere au condus la reducerea  $D_{ii}$  și la creșterea barierei de potențial de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC.*

## 4.2. TESTELE DE STRES ÎN TEMPERATURĂ ȘI TENSIUNE

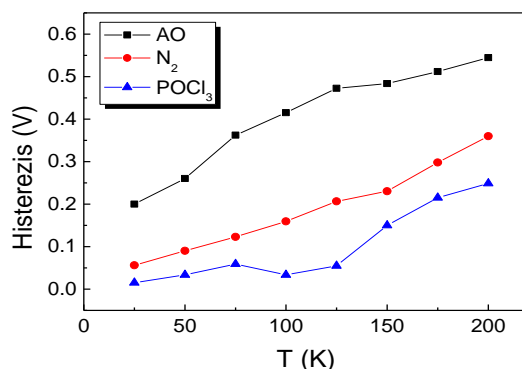
### 4.2.1. Analiza histerezisului caracteristicilor C-V la temperaturi înalte

Caracteristicile C-V bidirecționale au fost obținute, polarizând capacitorele MOS de la -10 V la +10 V și apoi spre -10 V, la diferite temperaturi de măsură. Măsurătorile C-V au fost realizate la înaltă frecvență,  $f = 1$  MHz, la temperaturi cuprinse între 25 și 200 °C. În Fig. 4.3 sunt prezentate caracteristici C-V bidirecționale măsurate la temperatura camerei, respectiv 200°C, pentru cele trei tipuri de capacitore MOS pe SiC: AO, N<sub>2</sub> și POCl<sub>3</sub>.



**Fig. 4.3** Caracteristici C-V bidirecționale pentru cele trei tipuri de capacitore MOS-SiC: (a) AO; (b) N<sub>2</sub>; (c) POCl<sub>3</sub>

Sensul caracteristicilor bidirecționale C-V are sensul acelor de ceasornic, indicând faptul că electronii, purtătorii majoritari din SiC, au fost injectați în oxid atunci când capacitorul MOS a fost polarizat în zona de acumulare [36]. Pentru a analiza evoluția histerezisului cu creșterea temperaturii de măsură, în Fig. 4.4 se prezintă variația deplasării caracteristicii C-V atunci când capacitorul MOS este polarizat dinspre golire adâncă (-10 V) spre acumulare (+10 V) și invers.



**Fig. 4.4** Dependența de temperatură a histerezisului pentru cele 3 tipuri de capacitore MOS-SiC

După cum se observă, la temperatura camerei, în cazul **probei AO**, este prezent un histerezis cu o valoare de aproximativ 0.2 V. În urma tratamentelor termice post oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub> sau POCl<sub>3</sub>, această valoare este redusă. În cazul **probei POCl<sub>3</sub>**, histerezisul este aproape insesizabil, având o valoare foarte apropiată de 0 V. *Acest fenomen confirmă îmbunătățirea proprietăților electrice ale oxidului MOS după tratamentele termice post-oxidare.*

Pe măsură ce temperatura de măsură crește, barierea de potențial de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC scade ( $\Phi_b$ ), favorizând creșterea injectiei de purtatori în oxid. Acest lucru are drept consecință creșterea valorii histerezisului cu temperatura. Prin urmare, în cazul **probei AO**, valoarea histerezisului este de aproximativ 0.55 V la o temperatură de 200°C. Valoarea histerezisului se reduce aproape la jumătate pentru fiecare temperatură de măsură pentru **proba N<sub>2</sub>**. În schimb, histerezisul **probei POCl<sub>3</sub>** este aproape constant până la temperatura de 125 °C, având valori sub 0.05 V, și atinge o valoare de aproximativ 0.25 V la temperatura de 200°C. *Această scădere a valorii histerezisului în urma tratamentelor termice post oxidare indică o reducere a sarcinii în oxid, asigurând o stabilitate a capacitorului MOS cu temperatura.*

#### 4.2.2. Determinarea tipului de sarcină din oxid prin aplicarea unui câmp electric, la temperatură înaltă, pe poarta capacitoarelor MOS realizate

O altă metodă pentru caracterizarea sarcinii din oxidul MOS se bazează pe aplicarea unui câmp electric pe poartă în timp ce capacitoarele sunt supuse unui stres termic. Această metodă (BTS – Bias Temperature Stress) este cunoscută pentru investigarea neidealităților dintr-un sistem MOS și pentru evaluarea defectelor din oxid [37]. De asemenea, ea este utilizată pentru a investiga dacă apar sau nu instabilități la polarizarea negativă / pozitivă la temperaturi înalte (NBTI – Negative Bias Temperature Instability, PBTI - Positive Bias Temperature Instability) [38] și pentru evidențierea injecției de purtători [39] sau prezența unor ioni mobili în oxid [40]. În Fig. 4.5 este ilustrată diagrama metodei BTS, aplicată celor trei tipuri de capacitoare MOS pe SiC realizate.

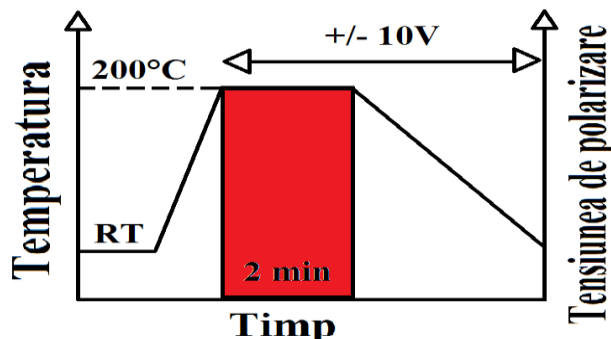


Fig. 4.5 Procedura pentru determinarea tipului de sarcină din oxidul MOS

Conform procedurii prezentate grafic în Fig. 4.5 măsurătorile *BTS* – *PBTI* au constat în următoarele etape:

- Inițial, caracteristicile capacitoarelor MOS au fost înregistrate la temperatura camerei la o frecvență de 1 MHz, fiind polarizate de la +10 V (acumulare) la -10 V (golire adâncă).
- Apoi, temperatura incintei în care s-au măsurat capacitoarele MOS a fost ridicată la 200°C. Când s-a atins această temperatură, capacitoarele MOS au fost polarizate cu +10 V timp de 2 minute.
- În final, temperatura de măsură a fost setată să scadă până la temperatura camerei, timp în care polarizarea capacitorului MOS a fost menținută. O nouă caracteristică C-V s-a obținut după ce temperatura de măsură a ajuns la temperatura camerei.

Aceiași pași au fost urmați pentru măsurătorile *BTS* - *NBTI*. Astfel, au fost înregistrate caracteristicile C-V atunci când capacitorul MOS a fost polarizat cu -10 V.

În cazul acestor determinări experimentale, câmpul electric aplicat a fost de aproximativ  $\pm 3.3$  MV/cm ( $\pm 10$  V aplicați pe poarta capacitoarelor MOS, oxidul având o grosime de aproximativ 30 nm). Așadar, valoarea câmpului aplicat prezintă o valoare de cel puțin două ori mai mică față de câmpul electric de străpungere al oxidului, determinat din analizele Fowler Nordheim. În Fig. 4.6 se prezintă caracteristici C-V măsurate la temperatura camerei, înainte și după stresul aplicat, pentru cele 3 tipuri de capacitoare MOS pe SiC realizate.

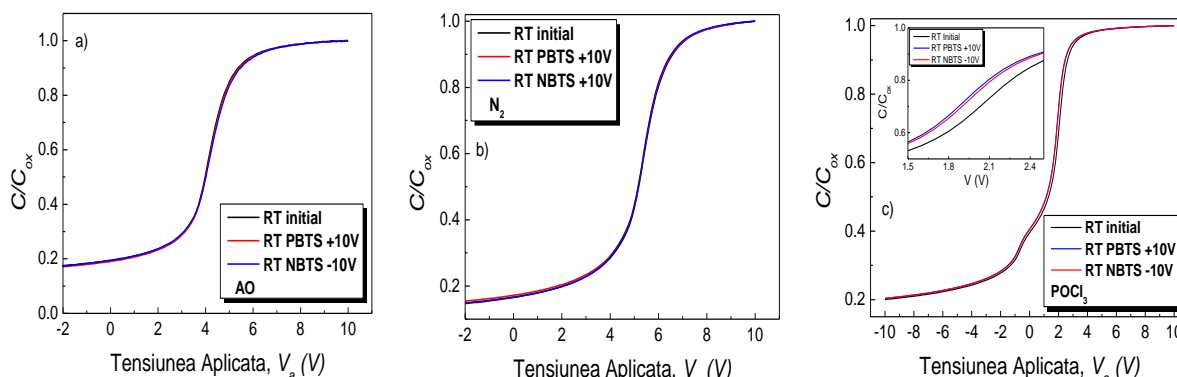
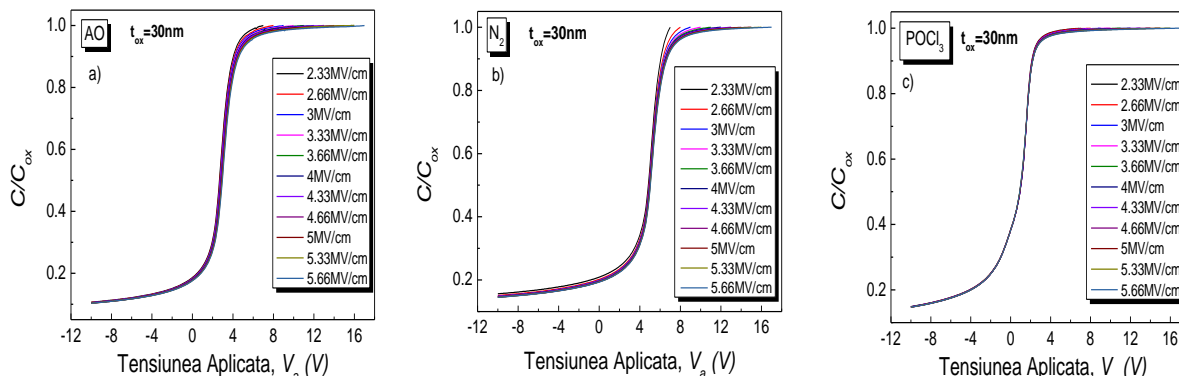


Fig. 4.6 Caracteristici C-V pentru identificarea tipului de sarcină din oxid pentru cele 3 capacitoare MOS pe SiC: (a) AO; (b) N<sub>2</sub>; (c) POCl<sub>3</sub>

Așa cum putem observa în Fig. 4.6 (a, b), capacitoarele MOS AO și N<sub>2</sub> nu prezintă nici o deplasare a caracteristicilor C-V în urma experimentelor BTS, fenomen ce demonstrează absența unei sarcini mobile în oxid sau a unei injecții de purtători datorat stresului. **Prin urmare, sarcina din oxidul MOS, pentru capacitoarele AO și N<sub>2</sub>, este fixă.** În schimb, în cazul capacitorului POCl<sub>3</sub>, se observă o deplasare a caracteristicilor „PBTS” și „NBTS” către tensiuni mai mici, evidențiind **prezența unei sarcini captate în oxid**. Acest comportament poate fi datorat atomilor de P înglobați în oxid în timpul tratamentului termic post-oxidare în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, ce pot acționa ca centrii ai sarcinilor captate în oxid [39].

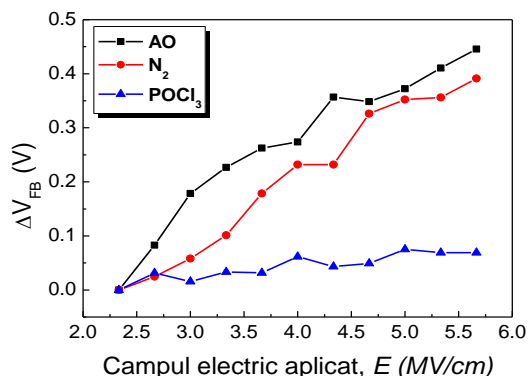
### 4.3 TESTE DE STRES LA CÂMPURI ELECTRICE DE POARTĂ INTENSE

În urma analizelor Fowler-Nordheim s-a observat o îmbunătățire a calității oxidului MOS, obținându-se curenți reziduali mai mici și un câmp electric de străpungere mai mare pentru probele tratate termic în atmosferă de  $N_2$ , respectiv  $POCl_3$ . Ca o analiză suplimentară în ceea ce privește fiabilitatea oxidului MOS, stabilitatea tensiunii de benzi netede a fost monitorizată prin măsurători C-V succesive, care pornesc de la altă tensiune de polarizare [41]. Astfel, capacitatoarele MOS au fost polarizate, dinspre acumulare spre golire adâncă, crescând tensiunea aplicată pe poartă cu 1V după fiecare măsurătoare electrică. În Fig. 4.7 se prezintă caracteristici C-V obținute prin creșterea câmpului electric aplicat pe poarta capacitatoarelor MOS pe SiC.



**Fig. 4.7** Caracteristici C-V pentru cele 3 tipuri de capacitatoare MOS pe SiC, aplicând câmpuri electrice diferite: (a) AO; (b)  $N_2$ ; (c)  $POCl_3$

În urma tratamentelor termice post-oxidare în atmosferă de  $N_2$ , respectiv  $POCl_3$ , se observă o diminuare a deplasării dintre caracteristicile C-V atunci când câmpul electric aplicat crește. Pentru proba tratată în atmosferă de  $POCl_3$ , caracteristicile C-V sunt aproape suprapuse pentru valori ale câmpului electric cuprinse între 2.33 și 5.66 MV/cm. Pentru o evidențiere mai precisă în ceea ce privește efectul câmpului electric aplicat pe poarta capacitatoarelor MOS, s-a determinat tensiunea de benzi netede –  $V_{FB}$  – pentru fiecare caracteristică C-V. Astfel, în Fig. 4.8 se prezintă variația tensiunii de benzi netede cu creșterea câmpului electric aplicat pe poarta capacitatoarelor MOS pe SiC.



**Fig. 4.8** Variația tensiunii de benzi netede cu creșterea câmpului electric aplicat pe poarta capacitatoarelor MOS pe SiC

**Probele AO și  $N_2$**  prezintă o variație similară, tensiunea de benzi netede având o creștere liniară cu câmpul electric aplicat. În cazul **probei AO**,  $V_{FB}$  crește cu aproape 0.45 V atunci când câmpul electric variază de la 2.33 MV/cm la 5.66 MV/cm. O variație mai mică este observată la **proba  $N_2$** ,  $V_{FB}$  crescând cu aproximativ 0.4 V atunci când se atinge un câmp electric de 5.66 MV/cm. În schimb, un comportament diferit este observat la **proba  $POCl_3$** ,  $V_{FB}$  având o valoare aproape constantă cu câmpul electric aplicat. Aceasta variază cu numai 0.07 V atunci când câmpul electric aplicat este modificat de la 2.33 MV/cm până la 5.66 MV/cm. Acest comportament poate fi datorat prezenței fosforului ce este responsabil cu reducerea stărilor de la interfața  $SiO_2/SiC$ . Astfel,  $SiO_2$  este transformat într-o sticlă fosfossilicată prin fixarea atomilor de P în rețeaua oxidului în timpul tratamentului termic post-oxidare în atmosferă de  $POCl_3$ . Prin urmare, un atom de P înlocuiește atomul de Si din tetraedrul  $SiO_4$ , formând o legătură dublă P=O și 3 legături simple P-O [54]. Orice abateri de la această configurație de rețea poate fi considerată un defect introdus de P. Însă, într-o cantitate bine controlată a P și în funcție de timpul și temperatura procesului, acestea au și un efect pozitiv prin reducerea semnificativă a stărilor de la interfața  $SiO_2/SiC$ . Atomii de P nereacionați pasivează suprafața SiC prin înlocuirea atomilor de C produși în timpul oxidării termice [42]. Pe de altă parte, un tratament termic post-oxidare în atmosferă de  $POCl_3$ , la o temperatură de 1000°C, timp de 1 h, duce la rezultate mult diferite față de ce s-a obținut în cazul unui tratament în aceleași condiții, dar într-un timp înjumătățit. Fiorenza et al. [39] au obținut variații mari ale tensiunii de benzi netede, de aproximativ 2 V, la modificări ale câmpului electric aplicat de până la 5 MV/cm. Acest comportament a fost argumentat prin faptul că P introduce defecte în rețeaua oxidului, ce se definesc prin sarcini negative

captate în oxid. Mai exact, atomii de P care nu au reacționat cu Si sau O, se consideră a fi defecte în rețeaua oxidului și pot acționa ca centrii ai sarcinilor captate.

*Astfel, dacă în cazul unui tratament în  $POCl_3$ , timp de 1 h la o temperatură de  $1000^\circ C$ , s-a raportat o înrăutățire a calității structurii MOS [39], varianta tehnologică propusă de mine pentru acest tratament termic post-oxidare în atmosferă de  $POCl_3$  conduce la îmbunătățirea semnificativă a calității oxidului, în ceea ce privește: tensiunea de străpungere a oxidului, curenții reziduali, bariera de potențial dintre banda de conducție a SiC și cea a oxidului, variația histerezisului cu temperatura și în final variația tensiunii de benzi netede cu creșterea câmpului electric aplicat pe poarta capacitatoarelor MOS.*

## CAPITOLUL 5

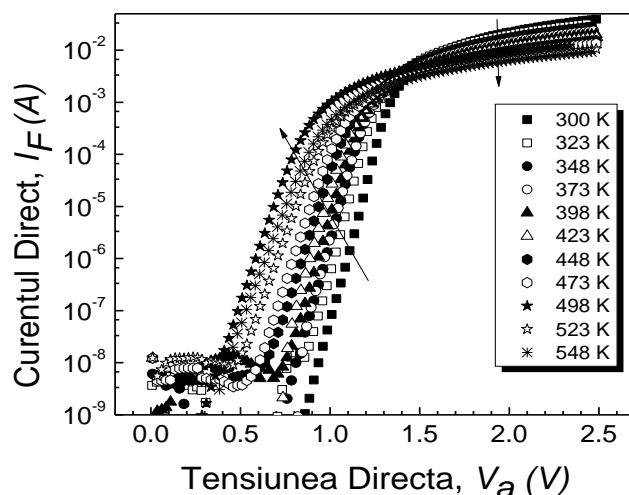
### SENZORI PE SiC PENTRU APLICAȚII ÎN MEDII OSTILE

*În acest CAPITOL al tezei se vor prezenta rezultatele obținute la testarea capacității diodei Schottky pe SiC, a cărei tehnologie de fabricație a fost prezentat în CAPITOLUL 2, de a fi utilizată ca senzor de temperatură. Aceasta va fi caracterizată electric la temperaturi ridicate, monitorizând variația tensiunii directe cu temperatura de măsură. Caracterizarea senzorilor de temperatură va avea în vedere testarea unor diode al căror contact Schottky Ni/4H-SiC a fost supus unui tratament termic post-metalizare la o temperatură de  $600^\circ C$ , timp de 2 minute în atmosferă de Ar [43]. Efectul celorlalte tratamente termice post-metalizare, descrise în capitolul 2, asupra performanțelor de senzor ale diodelor Schottky pe SiC, este analizat în teza de doctorat a colegului meu Gheorghe Pristavu [44].*

*Pe de altă parte, vor fi investigate performanțele capacitatoarelor MOS pe SiC, a căror tehnologie de fabricație a fost descrisă în CAPITOLUL 2, ca senzor de hidrogen. Realizarea și caracterizarea unor capacitatoare MOS pe SiC, care să funcționeze ca senzori de hidrogen la o temperatură ridicată, reprezintă de fapt subiectul principal al acestei teze și de aceea investigarea caracteristicilor acestui dispozitiv, în termeni de sensibilitate și fiabilitate, va primi o atenție specială.*

#### 5.1. DIODA SCHOTTKY PE SiC PENTRU SENZORI DE TEMPERATURĂ

Principiul de funcționare al unui senzor de temperatură pe bază de diode Schottky constă în variația tensiunii directe cu temperatura de măsură atunci când este polarizată la un current constant. În consecință, comportamentul electric la diferite temperaturi al pe SiC are un rol crucial. Diodele Schottky pe SiC au fost încapsulate și măsurate electric la diferite temperaturi, în intervalul 300 – 548 K, 11 temperaturi diferite. Aceste măsurători s-au realizat cu ajutorul unui sistem de caracterizare electrică PARSTAT 2273, conectat la un sistem de control a temperaturii. În Fig. 5.1 este evidențiat comportamentul unei diode Schottky pe SiC cu temperatura de măsură, cu ajutorul unor caracteristici I-V obținute la diferite temperaturi.



**Fig. 5.1** Caracteristici I-V la diferite temperaturi de măsură (I-V-T) ale diodelor Schottky pe SiC

Analizând caracteristicile I-V-T se observă 3 regimuri de funcționare ale diodei Schottky:

❖ La tensiuni mici ( $0 - 0.4$  V), variația curentului direct cu tensiunea aplicată este liniară, având un caracter rezistiv, iar  $I_F \sim I_s$ , unde  $I_s$  reprezintă curentul de saturație.

❖ Pe măsură ce tensiunea crește ( $V_a < 1.5$  V), caracteristica devine exponențială, iar curentul direct variază conform ecuației (2.2). Se observă că aceste curbe I-V-T au un caracter exponențial pe aproximativ 5 ordine de mărime ale curentului direct, în întreaga gamă de temperatură.

❖ La tensiuni de polarizare mari ( $V_a > 1.5$ V), caracteristicile sunt din nou liniare, intervenind efectul rezistenței serie.

În urma prelucrărilor datelor experimentale s-au obținut, pentru fiecare temperatură de măsură, următoarele valori ale factorului de idealitate, curentului de saturație, barierei Schottky și rezistenței serie, listate în tabelul 5.1:

**Tab. 5.1.** Valorile parametrilor diodei Schottky pe SiC la diferite temperaturi

T (K)	n	$I_s$ (A)	$\Phi_{Bn}$ (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )
300	1.295	6.627E-21	1.416	28.76
323	1.21	2.54E-20	1.492	33.6247
348	1.16	2.27E-19	1.546	40.7166
373	1.067	4.5E-19	1.6399	49.091
398	1.094	1.85382	1.626	58.823
423	1.04	6.768E-17	1.686	68.917
448	1.07	1.595E-15	1.668	81.168
473	1.048	8.94E-15	1.6954	95.1474
498	1.02	4.02E-14	1.725	109.53
523	1.032	2.849E-13	1.7277	128.534
548	1.023	1.46E-12	1.737	146.198

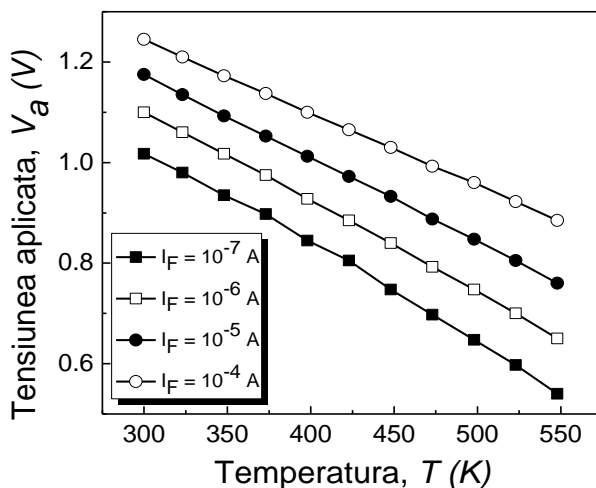
❖ Factorul de idealitate este aproape constant cu temperatura, fiind foarte apropiat de valoarea sa ideală, 1.

❖ Curentul de saturație crește exponențial cu temperatura, însă are o valoare de ordinul pA, la temperatura de 548 K, demonstrând faptul că dioda Schottky pe SiC poate funcționa fără probleme la această temperatură.

❖ Bariera Schottky a diodei are valoarea de aproximativ 1.4 V la temperatura camerei, însă cu creșterea temperaturii de măsură, valoarea acesteia se îmbunătățește, atingând într-un final o valoare constantă, în jurul valorii de 1.7 V.

❖ Rezistența serie are valoarea de aproximativ 28.76  $\Omega$  la temperatura camerei, aceasta crescând cu temperatura de măsură până la 146.2  $\Omega$ , la temperatura de 548 K. Această creștere a valorii rezistenței serie se datorează scăderii mobilității purtătorilor în semiconductor cu creșterea temperaturii.

Atunci când dioda Schottky funcționează ca senzor de temperatură, aceasta este polarizată la un curent constant, iar variația tensiunii aplicate trebuie să fie liniară cu temperatura de măsură. Acest fapt este demonstrat de caracteristicile ilustrate în Fig. 5.2, fiind obținute pentru valori ale curentului direct, pentru care caracteristica I-V rămâne exponențială la toate temperaturile de măsură.



**Fig. 5.2** Variația tensiunii aplicate cu temperatura de măsură

Fig. 5.2 demonstrează funcționarea corectă a senzorului de temperatură, bazat pe o diodă Schottky pe SiC, până la temperatura de 548 K. Plecând de la temperatura camerei, tensiunea aplicată prezintă o scădere liniară până la această temperatură.

Un parametru foarte important al senzorului de temperatură este sensibilitatea, valoarea acesteia fiind determinată în urma unor fitări liniare ale caracteristicilor ilustrate în Fig. 5.2, valorile sensibilității senzorului de temperatură pe SiC, în funcție de curentul de polarizare, fiind prezentate în Fig. 5.3:

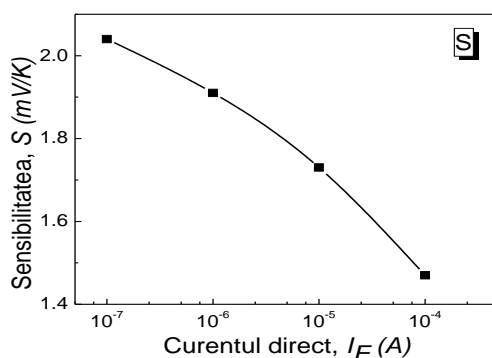


Fig. 5.3 Sensibilitatea senzorului de temperatură, bazat pe o diodă Schottky pe SiC, în funcție de curentul direct

La un curent constant,  $I_F = 10^{-7}$  A, sensibilitatea senzorului are o valoare de  $S = 2.04$  mV/K. Această valoare scade cu creșterea curentului de polarizare, având  $S = 1.47$  mV/K la un curent de polarizare de  $I_F = 10^{-4}$  A.

**În consecință, caracterizările electrice cu temperatura, ale diodelor Schottky pe SiC, demonstrează că senzorii pot funcționa în condiții optime până la o temperatură de 548 K.**

## 5.2. CAPACITORUL MOS PE SiC PENTRU SENZORI DE HIDROGEN

În continuare se va testa o structură de tip capacitor MOS (Pd/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC), care integrează un strat de oxid de câmp, fiind dezvoltate 2 tipuri de tratamente post-oxidare pentru îmbunătățirea performanțelor și a fiabilității dispozitivului. Tehnologia de fabricație a fost detaliată în CAPITOLUL 2.

Caracterizarea electrică a capacitorilor MOS pe SiC a fost realizată cu echipamentul Keithley 4200-SCS, care, pentru testarea performanțelor ca senzor, a fost conectat la un sistem format din 6 regulatoare de debit al gazului („mass flow controllers” - MFC), dintre care s-au utilizat doar 3. În acest fel, putem obține informații despre comportamentul capacitorului MOS pe SiC în prezența hidrogenului, fiind necesare pentru înțelegerea, dezvoltarea și optimizarea senzorului. Întregul sistem de testare al senzorilor de hidrogen bazați pe capacitori MOS pe SiC este ilustrat schematic în Fig. 5.4.

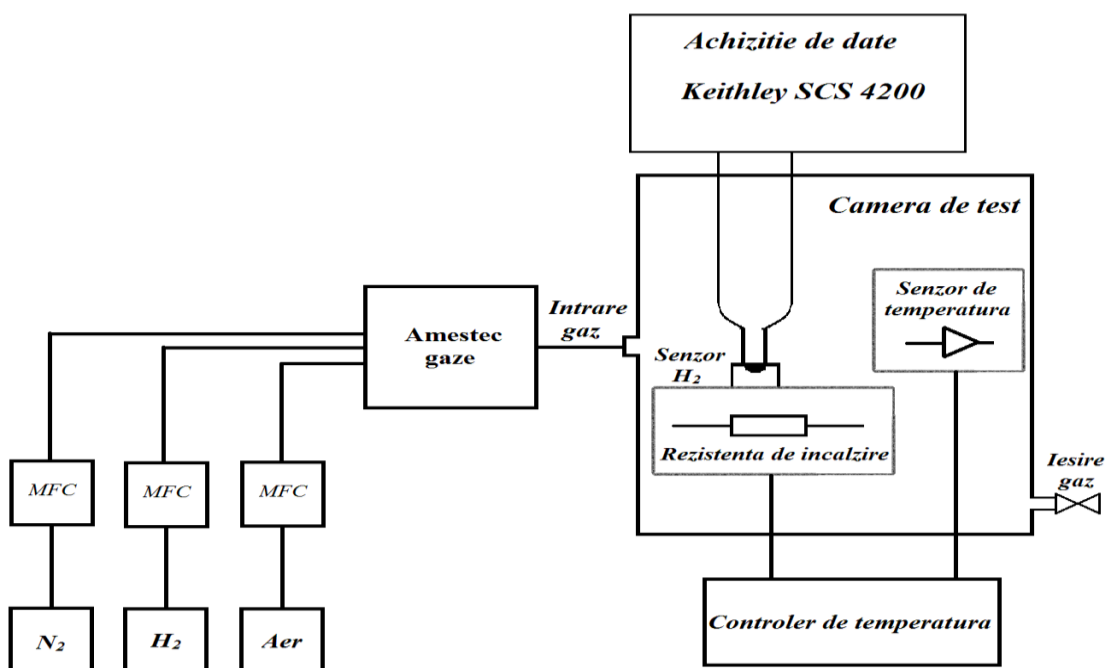


Fig. 5.4 Schema sistemului de testare a senzorilor de hidrogen bazați pe capacitori MOS pe SiC

Performanțele capacitoarelor MOS pe SiC ca senzori de hidrogen au fost evaluate analizând comportamentul caracteristicilor C-V în prezența hidrogenului. Prin urmare, senzorii MOS încapsulați au fost caracterizați electric la diferite temperaturi, cuprinse în gama 25 - 200°C, la diferite concentrații de H<sub>2</sub>, cuprinse în gama 20 - 1800 ppm în N<sub>2</sub>. Aceștia au fost polarizați dinspre zona de acumulare (+10 V) către golire adâncă (-10 V), obținându-se caracteristici C-V pentru toate cele 3 tipuri de capacitatoare MOS pe SiC: **AO**, N<sub>2</sub> și **POCl<sub>3</sub>**. Cu ajutorul acestor caracteristici a fost evaluat răspunsul senzorilor de H<sub>2</sub> în funcție de temperatura de măsură, la o tensiune aplicată constantă. Răspunsul senzorilor în funcție de temperatura de măsură fost determinat conform relației:

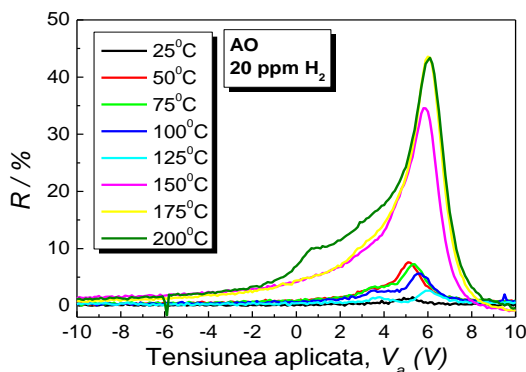
$$R = \frac{C_{H_2} - C_{N_2}}{C_{N_2}} * 100 [\%] \quad (5.1)$$

În care:  $C_{H_2}$  - valoare capacității obținută într-un mediu cu H<sub>2</sub>, iar  
 $C_{N_2}$  - valoare capacității într-un mediu cu N<sub>2</sub>.

Astfel, s-au obținut caracteristici C-V la temperaturi diferite pentru cea mai mică concentrație de H<sub>2</sub> oferită de către sistemul de măsură, și anume 20 ppm, pentru toate cele 3 tipuri de senzori MOS pe SiC: AO, N<sub>2</sub> și POCl<sub>3</sub>. Ulterior, răspunsul senzorilor a fost evaluat la diferite concentrații de H<sub>2</sub>, cuprinse în gama menționată mai sus, la anumite temperaturi de măsură. În urma acestor măsurători, s-a analizat variația răspunsului senzorilor cu creșterea concentrației de H<sub>2</sub>, atunci când au fost polarizați dinspre acumulare către golire adâncă. În plus, răspunsul maxim al senzorilor, obținut în urma polarizării cu o tensiune constantă, pentru fiecare concentrație de H<sub>2</sub> a fost evaluat. În final, senzorii au fost caracterizați din punct de vedere dinamic, determinând timpul de răspuns, respectiv de revenire, în urma comutării ON/OFF al valvelor reguletoarelor de debit pentru furnizarea H<sub>2</sub>. Performanțele celor 3 tipuri de senzori, bazați pe capacitatoare MOS pe SiC, vor fi discutate separat, precizând în final avantajele, respectiv dezavantajele introduse de tratamentele termice post-oxidare realizate, în scopul îmbunătățirii senzorilor de H<sub>2</sub>.

#### ❖ *Senzorul AO de H<sub>2</sub>*

Pentru a evalua răspunsul senzorului de H<sub>2</sub> în funcție de temperatură, s-au obținut caracteristici C-V la o concentrație fixă de 20 ppm H<sub>2</sub>, la temperaturi cuprinse în intervalul 25 - 200°C. Pentru a analiza comportamentul la fiecare temperatură de măsură a senzorului, s-a determinat răspunsul acestuia cu ajutorul ecuației (5.1), iar în Fig. 5.5 este prezentată variația acestuia cu temperatura pentru o concentrație fixă de 20 ppm.



**Fig. 5.5** Răspunsul *senzorului AO* la concentrația de 20 ppm de H<sub>2</sub>, la diferite temperaturi

Așa cum putem observa, senzorul are un răspuns slab până la o temperatură de 125 °C, având o valoare de sub 10 %. Începând cu temperatura de 150°C, răspunsul senzorului se îmbunătățește semnificativ, atingând o valoare de aproximativ 43 % la temperatura de 200°C.

Pentru a testa performanțele senzorului la diferite concentrații de H<sub>2</sub>, s-au făcut măsurători electrice la concentrații de H<sub>2</sub> care au variat între 20 – 1800 ppm, la temperaturile 25, 150, respectiv 200 °C. Aceste temperaturi au fost alese conform Fig. 5.5, de unde rezultă performanțe promițătoare ale senzorului de la o temperatură minimă de 150 °C. În Fig. 5.6 se prezintă variația răspunsului la diferite concentrații de H<sub>2</sub>, cuprinse în gama menționată mai sus, fiind analizată la temperatura camerei, respectiv 200°C.



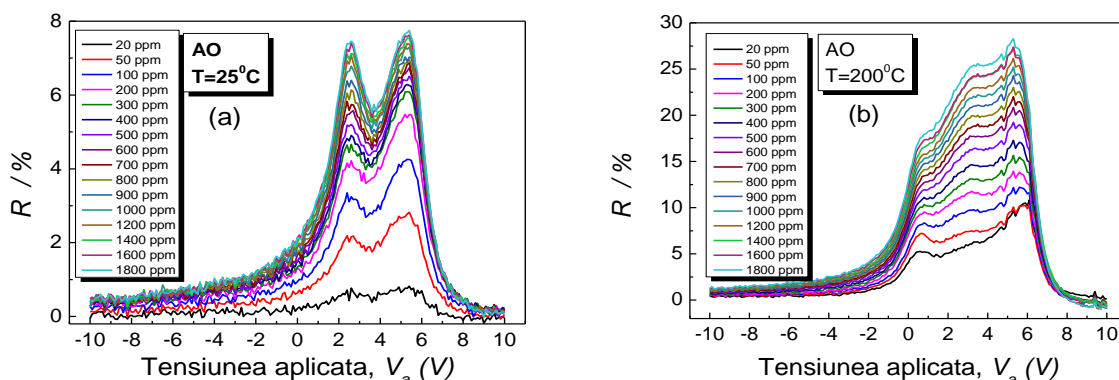


Fig. 5.6 Variația răspunsului senzoriului AO la diferite concentrații de  $H_2$ , la temperatura camerei (a), respectiv  $200^\circ C$  (b)

La temperatura camerei, se observă o creștere a răspunsului cu concentrația de  $H_2$ , atingând o valoare maximă de aproximativ 7.7 %, la o concentrație de  $H_2$  de 1800 ppm. Răspunsul senzoriului de  $H_2$  prezintă două maxime, în jurul valorii 7.7 %, la tensiunii de polarizare de 2.6 V, respectiv 5.4 V.

Deoarece răspunsul maxim al senzoriului a fost obținut la o temperatură de  $200^\circ C$  (conform Fig. 5.5), s-a analizat comportarea acestuia la diferite concentrații de  $H_2$  și pentru această temperatură. Astfel, în Fig. 5.7 se prezintă variația răspunsului la diferite concentrații de  $H_2$ , obținută la temperatură de  $200^\circ C$ . Și în acest caz, răspunsul crește cu concentrația de  $H_2$ , atingând o valoare maximă de aproximativ 28 % la o concentrație de  $H_2$  de 1800 ppm, pentru o tensiune de polarizare de 5.2 V. La temperatura de  $200^\circ C$ , prezența mai multor maxime de răspuns este clar evidențiată de o posibilă activarea a stărilor de la interfața  $SiO_2/SiC$  la temperatură ridicată.

Comportamentul dinamic al senzoriului de  $H_2$  a fost analizat prin obținerea de caracteristici capacitate vs. timp (C-t), la o tensiune de polarizare constantă. Așadar, în Fig. 5.7 este evidențiată variația capacității în timp, la o concentrație de  $H_2$  de 20 ppm și o temperatură de  $200^\circ C$ , atunci când senzorul este polarizat la o tensiune constantă.

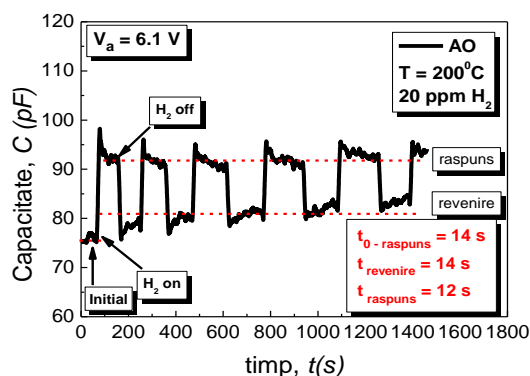
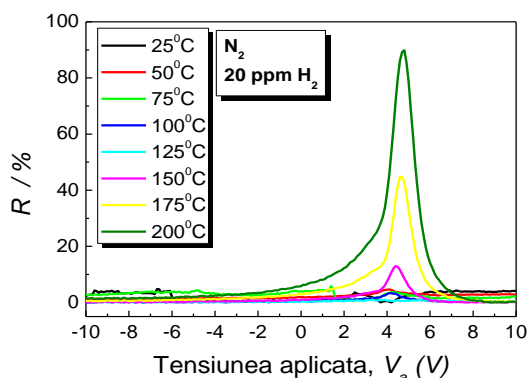


Fig. 5.7 Răspunsul senzoriului AO de  $H_2$  în regim tranzitoriu, la o temperatură de  $200^\circ C$  și o concentrație de  $H_2$  de 20 ppm

Inițial, senzorul răspunde în 14 s la o concentrație mică de  $H_2$  (20 ppm), atingând astfel valoarea maximă a capacității măsurate. În ceea ce privește revenirea senzoriului la valoarea inițială a capacității, acesta are nevoie de un timp de 14 s pentru a se stabili la o capacitate aproximativ constantă. Atomii de  $H_2$  sunt captați fie la suprafața Pd-ului, fie la interfața  $SiO_2/SiC$ , iar îndepărtarea acestora poate dura mai mult timp. Astfel, așa cum se observă și în Fig. 5.7, valoarea capacității nu ajunge la cea inițială atunci când  $H_2$  este închis ( $H_2$  off), având o tendință de creștere a capacității de revenire pe toată durata măsurătorii electrice. Așa cum am mai spus, acest comportament poate fi cauzat de posibile schimbări de fază ale metalului catalitic ce pot avea loc în timpul bombardării cu atomi de  $H_2$ . După revenirea capacității la o valoare aproximativ constantă ( $H_2$  este OFF), senzorul răspunde din nou în numai 12 s.

#### ❖ Senzorul $N_2$ de $H_2$

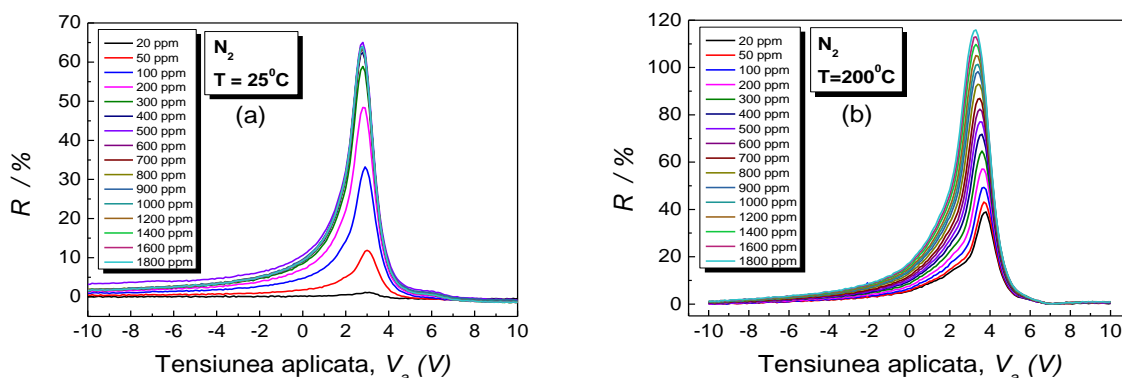
Analize identice au fost aplicate și capacitorului MOS pe SiC – senzoriul  $N_2$ , testându-i astfel performanțele de senzor la diferite concentrații de  $H_2$ , respectiv diferite temperaturi de măsură. Așadar, primele experimente au avut în vedere comportarea cu temperatura a senzoriului, la o concentrație mică de  $H_2$ , mai exact 20 ppm. Prin urmare, în Fig. 5.8 se prezintă variația acestuia cu temperatura pentru o concentrație fixă de 20 ppm în funcție de tensiunea de polarizare.



**Fig. 5.8** Răspunsul senzorului  $N_2$  la diferite temperaturi de măsură, la concentrația 20 ppm  $H_2$

Așa cum putem observa în Fig. 5.8, răspunsul senzorului  $N_2$  devine semnificativ pentru o concentrație de  $H_2$  de 20 ppm, de la o temperatură minimă de măsură de aproximativ 150°C. La această temperatură, senzorul are un răspuns de aproximativ 13 %, crescând semnificativ până la temperatura de 200°C, unde atinge o valoare maximă de aproximativ 90 %.

Pentru a testa performanțele senzorului la diferite concentrații de  $H_2$ , acesta a fost caracterizat electric în condiții similare cu cele aplicate senzorului AO. Astfel, concentrația de  $H_2$  a variat între 20 – 1800 ppm, fiind obținute caracteristici C-V la aceleași temperaturi fixe de măsură: 25, 150, respectiv 200°C. Prin urmare, în Fig. 5.9 se prezintă variația răspunsului la diferite concentrații de  $H_2$ , la temperatura camerei, respectiv 200°C.

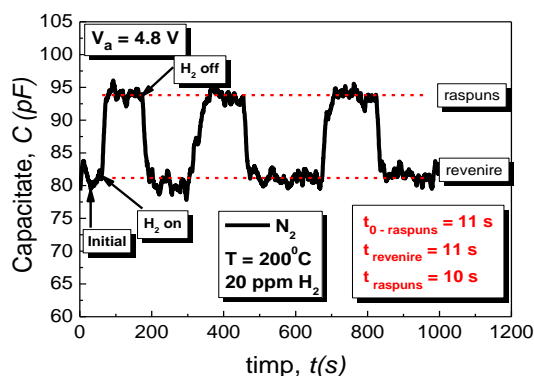


**Fig. 5.9** Variația răspunsului senzorului  $N_2$  la diferite concentrații de  $H_2$ , la temperatura camerei (a), respectiv 200°C (b)

La temperatura camerei, așa cum putem observa în Fig. 5.9, răspunsul senzorului crește odată cu creșterea concentrației de  $H_2$ , atingând o valoare maximă de aproximativ 64 %, pentru o concentrație de  $H_2$  de 1800 ppm. Se observă o îmbunătățire semnificativă a performanțelor senzorului la temperatura camerei, răspunsul maxim crescând de mai bine de 8 ori față de valoarea obținută în cazul senzorului AO. Pentru a analiza performanțele senzorului și la temperatură ridicată, s-au efectuat măsurători electrice identice, pentru temperatura de 150, respectiv 200°C.

Pentru a analiza răspunsul senzorului  $N_2$  și la temperatura de 200°C, temperatură pentru care s-a obținut un răspuns maxim la o concentrație fixă de 20 ppm  $H_2$ , au fost obținute măsurători electrice la diferite concentrații de  $H_2$ . Prin urmare, în Fig. 5.9 (b) se prezintă variația răspunsului obținut la temperatura de 200°C, pentru concentrații diferite de  $H_2$ . Se observă o evoluție a răspunsului pentru fiecare creștere a concentrației de  $H_2$ , atingând o valoare maximă de aproximativ 115.9 %, pentru o concentrație de  $H_2$  de 1800 ppm. La cea mai mică concentrație de  $H_2$  (20 ppm), senzorul are un răspuns de aproximativ 39 %. Practic, are loc o creștere de aproape 3 ori mai mare a răspunsului atunci când concentrația de  $H_2$  variază de la 20 ppm la 1800 ppm.

Comportamentul dinamic al senzorului  $N_2$  a fost analizat la o temperatură de 200°C, pentru o concentrație de 20 ppm  $H_2$ , practic în aceleași condiții de testare a senzorului AO. În Fig. 5.10 se prezintă variația capacității în timp, în prezența, respectiv absența  $H_2$ , atunci când senzorul este polarizat la o tensiune constantă.



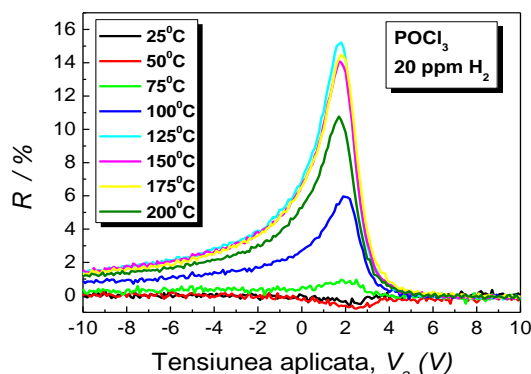
**Fig. 5.10.** Răspunsul *senzorului*  $N_2$  de  $H_2$  în regim tranzitoriu, la o temperatură de  $200^\circ\text{C}$  și o concentrație de  $H_2$  de 20 ppm

Inițial, *senzorul*  $N_2$  este ținut în atmosferă de azot, după un anumit timp fiind deschisă valva reguletoarelor de debit ce furnizează o concentrație fixă de  $H_2$ , mai exact 20 ppm. Atunci când  $H_2$  este ON, valoarea maximă a capacității este atinsă în doar 11 s, cu 3 s mai repede decât în cazul *senzorului*  $AO$ . În acest moment, *senzorul* este menținut în atmosferă de  $H_2$ , la o concentrație de 20 ppm, până când valoarea capacității se stabilizează, arătând o valoare constantă în timp. Apoi, valva destinată furnizării  $H_2$  este închisă ( $H_2$  OFF), iar capacitatea *senzorului* revine la valoarea inițială după un timp de 11 s, fiind din nou mai rapid cu 3 s față de *senzorul*  $AO$ . Pentru a evalua din nou timpul de răspuns al *senzorului*, valva de  $H_2$  este deschisă ( $H_2$  ON), valoarea capacității atingând o valoare maximă în 10 s, cu 4 s mai rapid decât *senzorul*  $AO$ .

#### ❖ *Senzorul* $POCl_3$ de $H_2$

Ca și în cazul celor doi senzori caracterizați anterior, primele experimente au avut în vedere comportarea *senzorului*  $POCl_3$  la diferite temperaturi, pentru o concentrație fixă de  $H_2$ . Acesta a fost caracterizat în aceleași condiții, fiind analizate performanțele de senzor prin testarea la diferite temperaturi de măsură, respectiv concentrații de  $H_2$ . Pentru a analiza comportarea acestuia în temperatură, s-au obținut caracteristici C-V la o concentrație fixă de  $H_2$  (20 ppm), la temperaturi diferite, cuprinse în gama  $25\text{--}200^\circ\text{C}$ , cu ajutorul cărora s-a determinat variația răspunsului cu temperatura.

Pentru a evalua răspunsul *senzorului* pentru fiecare temperatură de măsură în parte, la o concentrație fixă de  $H_2$  de 20 ppm, s-a calculat valoarea acestuia cu ajutorul ecuației (5.1). În Fig. 5.11 se prezintă o astfel de variație a răspunsului *senzorului*  $POCl_3$  de  $H_2$  din care putem deduce temperatura optimă de funcționare a acestuia:



**Fig. 5.11.** Răspunsul *senzorului*  $POCl_3$  la diferite temperaturi de măsură, pentru o concentrație fixă de  $H_2$  – 20 ppm

În Fig. 5.11 se observă un comportament diferit al capacitorului MOS pe SiC „ $POCl_3$ ” față de „ $AO$ ” și „ $N_2$ ”, atunci când acesta acționează ca senzor de  $H_2$ . În acest caz, putem observa că temperatura optimă de funcționare, din punct de vedere al răspunsului la  $H_2$ , nu mai este  $200^\circ\text{C}$ , ci o temperatură intermediară din gama menționată anterior.

Similar analizelor aplicate *senzorilor*  $AO$  și  $N_2$ , performanțele *senzorului*  $POCl_3$  au fost testate și la diferite concentrații de  $H_2$ , atunci când temperatura de măsură este constantă. Astfel, s-au obținut valori ale răspunsului la diferite concentrații de  $H_2$  pentru următoarele temperaturi de măsură: 25, 150, respectiv  $200^\circ\text{C}$ . În Fig. 5.12 se prezintă variația răspunsului *senzorului*  $POCl_3$  la diferite concentrații de  $H_2$ , între 20 – 1800 ppm, pentru o temperatură de măsură de  $25^\circ\text{C}$ .

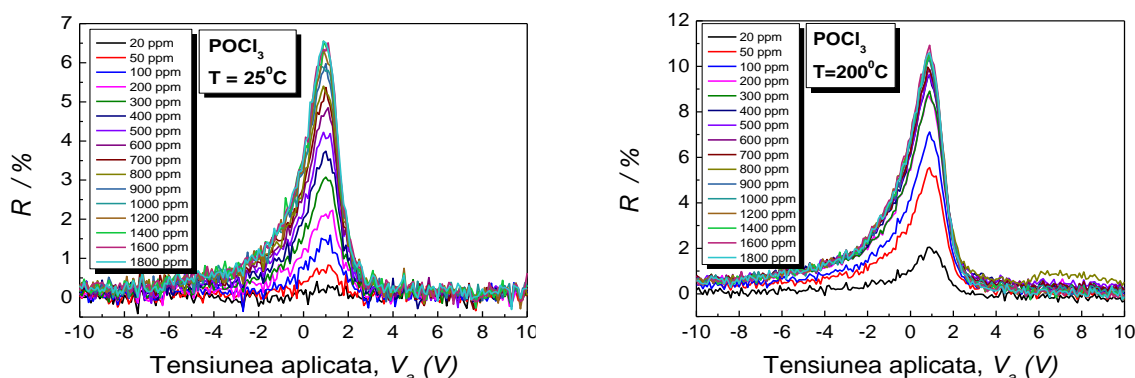


Fig. 5.12 Variația răspunsului senzoriului  $POCl_3$  la diferite concentrații de  $H_2$ , la  $25^\circ C$  (a), respectiv  $200^\circ C$  (b)

În Fig. 5.12 (a) se observă o creștere a răspunsului cu concentrația de  $H_2$ , atingând o valoare maximă de aproximativ 6.6 % pentru o concentrație de  $H_2$  de 1800 ppm. Răspunsul este comparabil cu cel obținut în cazul senzoriului  $AO$ , însă are o valoare de aproape 10 ori mai mică față de cel obținut la senzoriul  $N_2$ .

Pentru a stabili performanțele senzoriului  $POCl_3$  la cea mai ridicată temperatură de măsură utilizată, s-au aplicat aceleași analize, ce au rolul de a identifica comportarea senzoriului în prezența a diferite concentrații de  $H_2$ . În acest sens, în Fig. 5.12 (b) se prezintă variația răspunsului senzoriului  $POCl_3$ , atunci când concentrația de  $H_2$  variază între 20 – 1800 ppm la o temperatură fixă de  $200^\circ C$ .

Așa cum am arătat și în Fig. 5.11, performanțele senzoriului  $POCl_3$  scad de la o temperatură de măsură mai mare de  $175^\circ C$ . Pe de altă parte, se respectă tendința de creștere a răspunsului cu concentrația de  $H_2$ , atingând o valoare maximă de aproximativ 10.6 %, pentru o concentrație de  $H_2$  de 1800 ppm. **Comparativ cu rezultatele celorlalți senzori, această valoare este de aproape 11 ori mai mică față de cea obținută în cazul senzoriului  $N_2$  și de aproape 3 ori mai mică față de valoarea determinată la senzoriul  $AO$ .**

Comportamentul dinamic al senzoriului  $POCl_3$  a fost evaluat, de asemenea, la o concentrație mică de  $H_2$  (20 ppm) și la o temperatură de  $200^\circ C$ , urmărind variația capacității în timp în atmosferă de  $H_2$  ( $H_2$  ON), respectiv  $N_2$  ( $H_2$  OFF). În Fig. 5.13 se prezintă variația capacității în timp, în prezența, respectiv absența  $H_2$ , atunci când senzoriul este polarizat la o tensiune constantă.

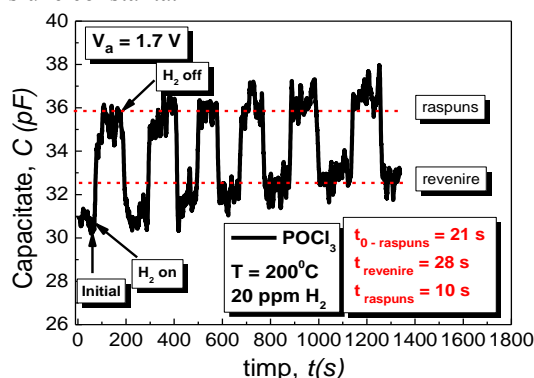


Fig. 5.13 Răspunsul senzoriului  $POCl_3$  de  $H_2$  în regim tranzitoriu, la o temperatură de  $200^\circ C$  și o concentrație de  $H_2$  de 20 ppm

Primul pas în testarea comportamentului dinamic al senzoriului  $POCl_3$  constă în menținerea acestuia într-o atmosferă inertă cu  $N_2$ . În momentul deschiderii valvei de  $H_2$  ( $H_2$  ON), senzoriul are un răspuns inițial de aproximativ 21 s, atingând astfel o valoare constantă în timp a capacității măsurate. În comparație cu ceilalți doi senzori  $AO$ , respectiv  $N_2$ , testați în aceleași condiții, timpul inițial de răspuns este mai mare cu 7 s (față de senzoriul  $AO$ ), respectiv cu 10 s (față de senzoriul  $N_2$ ). În continuare, senzoriul este menținut un anumit timp în atmosferă de  $H_2$ , până când valoarea capacității se stabilizează, după aceea valva ce furnizează  $H_2$  este închisă. În acest moment, valoarea capacității începe să scadă, ajungând într-un timp de aproximativ 28 s la valoarea sa inițială. **Comparând timpul de revenire al senzoriului  $POCl_3$  cu valorile obținute în cazul celorlalți doi senzori, analizați în aceleași condiții, putem spune că acesta prezintă cele mai slabe performanțe.** Astfel, senzoriul  $POCl_3$  are un timp de revenire de două ori mai mare față de senzoriul  $AO$  și este mai lent cu aproape 17 s față de senzoriul  $N_2$ , atunci când are loc revenirea capacității la valoarea sa inițială.

Așa cum se poate observa și în Fig. 5.13, după realizarea unui astfel de ciclu (răspuns – revenire), valoarea capacității nu revine la valoarea sa inițială, având o tendință de creștere odată cu numărul ciclurilor parcurse. Acest lucru se poate datora schimbărilor de fază ale Pd-ului în prezența  $H_2$  sau atomilor de hidrogen captați la interfața Pd/SiO<sub>2</sub>, în urma expunerii senzoriului la o temperatură ridicată într-un mediu cu  $H_2$ , un timp suficient pentru a avea loc astfel de fenomene. După câteva cicluri parcurse de răspuns/revenire, senzoriul  $POCl_3$  are un

timp de răspuns mai scurt datorită creșterii capacității de revenire. Acesta are un timp de răspuns identic cu *senzorul N<sub>2</sub>* și este mai rapid cu 2 s față de *senzorul AO*, aceștia fiind testați în aceleași condiții (20 ppm, 200°C).

**În concluzie**, putem vorbi despre îmbunătățirea performanțelor senzorilor în urma tratamentelor termice post-oxidare aplicate. Așadar, un tratament termic post-oxidare în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, realizat la o temperatură de 1000°C, timp de 30 de minute, reprezintă o soluție tehnologică benefică pentru fabricația unui capacitor MOS pe SiC, stabil la diferite temperaturi de măsură. Stabilitatea acestora a fost demonstrată în capitolul 3 prin determinarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, evidențiind un rezultat favorabil pentru un astfel de dispozitiv. Cu alte cuvinte, o reducere semnificativă a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, cu mai mult de un ordin de mărime, a fost semnalată în urma acestui tratament, un argument foarte important în asigurarea unei stabilități cu temperatura a dispozitivului MOS.

Pe de altă parte, asupra performanțelor ca senzor al acestui dispozitiv, un astfel de tratament nu are același impact, intervenind o serie de inconveniente în ceea ce privește timpul de răspuns/revenire, respectiv răspunsul în capacitate al *senzorilor POCl<sub>3</sub>* testați la diferite concentrații de H<sub>2</sub>. În schimb, un tratament termic rapid post-oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub>, la o temperatură de 1100°C, timp de 6 minute, putem spune că reprezintă o soluție tehnologică optimă pentru realizarea unor dispozitive MOS pe SiC care să funcționeze ca senzori de H<sub>2</sub> în condiții de temperatură ridicată. Chiar dacă valoarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC nu a fost redusă la fel de mult ca în cazul tratamentului realizat în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, acest tratament are o influență pozitiv-semnificativă asupra performanțelor ca senzor al dispozitivului MOS pe SiC. Pe lângă valorile semnificativ mai mari ale răspunsului în capacitate la diferite concentrații de H<sub>2</sub>, acești senzori prezintă timpi de reacție mai mici, simțind astfel prezența H<sub>2</sub> într-un timp mai scurt față de ceilalți doi senzori.

## CONCLUZII

Cercetarea realizată în cadrul programului de doctorat a avut ca scop dezvoltarea unor dispozitive pe SiC, care să acționeze ca senzori în medii ostile. Astfel, s-au proiectat și realizat dispozitive de tipul diodă Schottky, respectiv capacitor MOS pe SiC pentru aplicații din domeniul senzorilor de temperatură, respectiv de gaz (H<sub>2</sub>). În acest sens, pe parcursul programului de doctorat au fost investigate aspecte fundamentale în dezvoltarea unor senzori cu sensibilitate și fiabilitate ridicate, descrise pe parcursul a 5 capitole principale, care au condus la îndeplinirea obiectivului propus.

Astfel, în **CAPITOLUL 1** au fost discutate principalele proprietăți ale SiC, scoțând în evidență avantajele acesteia pentru realizarea unor dispozitive pentru aplicații de temperatură ridicată. Banda interzisă de valoare mare și posibilitatea creșterii unui oxid pe suprafața acesteia reprezintă atuurile principale ale SiC, demonstrând astfel capabilitățile unui semiconductor potrivit pentru astfel de aplicații.

**CAPITOLUL 2** a început cu descrierea unui set de măști fotolitografice, comun pentru realizarea atât a capacitorilor MOS, cât și a diodelor Schottky, astfel reducându-se considerabil costurile de fabricație ale celor două dispozitive pe SiC.

Capitolul a continuat cu descrierea etapelor de fabricație, urmărind punerea la punct a unui flux tehnologic cu cât mai multe etape comune pentru fabricației celor două dispozitive pe SiC. S-a discutat faptul că funcționarea unei diode Schottky pe SiC ca senzor de temperatură ridicată necesită o bariera de potențial (Schottky) cu o valoare cât mai mare și s-au propus și realizat tratamente noi de îmbunătățire a performanțelor standard.

- În acest sens, au fost prezentate tratamente termice post-metalizare pentru formarea unei siliciuri de Ni la suprafața SiC, un compus ce asigură o bariera Schottky mai mare și o stabilitate excelentă la temperaturi ridicate. Optimizare acestui proces a constat în stabilirea condițiilor unui astfel de tratament, astfel încât să se obțină pe o suprafață cât mai mare a SiC un astfel de compus (siliciură de Ni). În final, a fost demonstrat printr-o analiză de difracție de raze X că un tratament termic post-metalizare în atmosferă de N<sub>2</sub>, la o temperatură de 800°C, timp de 8 minute a condus la obținerea unei siliciuri de Ni pe toată suprafața SiC. Procesul de încapsulare al structurilor finale (diode Schottky) a reprezentat o etapă critică în funcționarea acestora la temperatură ridicată (450°C), fiind descrise 4 tehnici de lipire a chip-ului pe ambaza capsulei.
- În ceea ce privește fabricația capacitorului MOS pe SiC, un rol crucial l-a jucat creșterea oxidului pe SiC. Astfel, obținerea unei interfețe SiO<sub>2</sub>/SiC sau Pd/SiO<sub>2</sub> cu o calitate înaltă reprezintă cheia funcționării acestuia la temperatură ridicată ca senzor de H<sub>2</sub>. În acest scop, două tratamente termice post-oxidare, în atmosferă de N<sub>2</sub>, respectiv POCl<sub>3</sub>, au fost aplicate pentru reducerea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, respectiv îmbunătățirea calității oxidului crescut pe SiC. Pentru funcționarea acestora ca senzori de H<sub>2</sub> la o temperatură ridicată s-au utilizat procese identice de încapsulare cu cele aplicate în cazul diodelor Schottky pe SiC.

**CAPITOLUL 3** s-a concentrat pe caracterizarea interfeței SiO<sub>2</sub>/SiC, aceasta jucând un rol foarte important în asigurarea unei stabilități a capacitorului MOS în momentul utilizării unei temperaturi de măsură ridicată. Comportarea capacitorilor MOS la temperatură joasă a fost analizată prin obținerea de caracteristici C-V în intervalul 80 – 300 K, scoțând în evidență eficiența tratamentului termic post-oxidare în atmosferă de POCl<sub>3</sub>. În plus, cu ajutorul acestor caracteristici s-a determinat valoarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, distribuită pe nivele mai puțin adânci (până la 0.2 eV) sub banda de conducție a SiC. Determinarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, pe nivele mai adânci sub banda de conducție a SiC (0.2 – 0.6 eV), s-a realizat cu ajutorul unor caracteristici C-V, obținute la înaltă frecvență, respectiv în regim quasi-static. Acesta din urmă asigură un timp suficient de lung pentru ca stările de interfață să răspundă, astfel introducând diverse modificări ale caracteristicilor C-V, în special pe zona de golire a capacitorilor MOS pe SiC. **În urma determinărilor realizate, s-a demonstrat eficiența tratametelor termice post-oxidare aplicate, obținându-se reduceri semnificative ale valorilor densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC cu mai mult de un ordin de mărime.**

În **CAPITOLUL 4** a fost analizată calitatea oxidului MOS, cu ajutorul unor tehnici de caracterizare electrică, folosite în general și pentru analize de fiabilitate. Prin urmare, au fost realizate măsurători curent-tensiune, crescând câmpul electric aplicat până la străpungerea distructivă a oxidului de poartă, iar caracteristicile au fost fitate conform formalismului Fowler-Nordheim pentru determinarea următorilor parametri: curenții reziduali, câmpul electric de strapungere și bariera de potențial dintre banda de conducție a SiC și cea a SiO<sub>2</sub>. Acesta din urmă are un rol foarte important în timpul funcționării unui capacitor MOS la o temperatură ridicată. Astfel, valoarea acestuia trebuie să fie cât mai apropiată de valoarea ideală (2.7 eV) în cadrul unui sistem de tip Pd/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC, deoarece scade cu creșterea temperaturii de măsură, favorizând astfel, trecerea purtătorilor din banda de conducție a SiC în SiO<sub>2</sub>. **În urma acestor determinări, s-a demonstrat eficiența tratamentelor termice post-oxidare, prin îmbunătățirea parametrilor electrici determinați.** Astfel, curenții reziduali și tensiunea de străpungere prezintă valori mai mari, iar valorile pentru bariera de potențial dintre banda de conducție a SiC și cea a SiO<sub>2</sub> sunt mai apropiate de cea ideală, în urma aplicării tratamentelor termice post-oxidare. **Ca și în cazul îmbunătățirii interfeței SiO<sub>2</sub>/SiC, tratamentul termic post-oxidare în atmosferă de POCl<sub>3</sub> prezintă îmbunătățiri semnificative ale oxidului crescut pe SiC, fiind demonstrate de valorile parametrilor menționați anterior.**

De asemenea, o atenție specială a fost acordată investigării sarcinii din oxidul de poartă, o analiză importantă fiind reprezentată de variația histerezisului unei caracteristici C-V bidirecțională cu temperatura. **Și în acest caz, cea mai mică valoare a variației histerezisului cu temperatura a fost obținută în cazul capacitorului MOS, al cărui oxid a fost tratat termic în atmosferă de POCl<sub>3</sub>.**

Pentru determinarea tipului de sarcină în oxid s-a utilizat o metodă ce constă în aplicarea unui câmp electric pe poarta capacitorilor MOS atunci când acestea sunt supuse unui stres termic (BTS – Bias Temperature Stress). **În final, a fost demonstrată prezența unei sarcini fixe în oxidul crescut care nu a fost supus unui tratament termic, respectiv în cazul celui care a suferit un tratament termic rapid post-oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub>. În schimb, în cazul capacitorului MOS pe SiC, al cărui oxid a fost tratat termic în atmosferă de POCl<sub>3</sub> a fost semnalată prezența unei sarcini captate în oxid.** Aceasta poate fi datorată atomilor de fosfor încorporați în oxid în timpul tratamentului termic.

O metodă de testare a fiabilității structurilor MOS realizate, a constat în determinarea variației tensiunii de benzi netede cu creșterea câmpului electric aplicat pe poartă. **O reducere a variației tensiunii de benzi netede cu câmpul electric aplicat este observată în cazul capacitorului MOS cu oxidul tratat în atmosferă de N<sub>2</sub>, însă o îmbunătățire semnificativă este semnalată în cazul capacitorului MOS, al cărui oxid a fost tratat termic în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, variația tensiunii de benzi netede cu creșterea câmpului electric aplicat fiind aproape constantă.**

În **CAPITOLUL 5** au fost discutate performanțele ca senzori ale dispozitivelor pe SiC realizate, și anume dioda Schottky ca senzor de temperatură, respectiv capacitorul MOS ca senzor de H<sub>2</sub>.

Astfel, în acest capitol a fost analizată pentru început comportarea ca senzor de temperatură a diodei Schottky fabricate pe SiC. Senzorul de temperatură a prezentat o funcționare excelentă până la temperatura de 548 K. Analiza acestui senzor de temperatură a constat în determinarea parametrilor electrici standard ai unei diode Schottky, urmărind variația acestora cu temperatura de măsură. Astfel, s-au determinat: factorul de idealitate, curentul de saturație, bariera Schottky și rezistența serie. **S-au obținut valori ale factorului de idealitate foarte apropiate de valoare sa ideală, 1, curenți de saturație de valori foarte mici (fiind de ordinul pA la o temperatură de 548 K), bariera Schottky cu valori ce permite funcționarea corectă până la o temperatură de 548 K a senzorului și valori ale rezistenței serie acceptabile, care cresc cu temperatura de măsură.** O caracteristică foarte importantă a diodei Schottky pe SiC, atunci când acționează ca senzor de temperatură, constă în variația tensiunii directe cu temperatura de măsură. În acest caz, dioda prezintă o variație liniară a tensiunii aplicate până la o temperatură de 548 K. Cu ajutorul acestor caracteristici a fost determinată sensibilitatea senzorului de temperatură, parametru de definește performanțele de senzor ale diodei Schottky pe

SiC. Au fost obținute valori cuprinse între  $1.47 \text{ mV/K}$  și  $2.04 \text{ mV/K}$ , la curenți constanți de poalrizare de  $I_F = 10^{-4} \text{ A}$ , respectiv  $I_F = 10^{-7} \text{ A}$ .

În ceea ce privește testarea capacitoarelor MOS pe SiC ca senzori de hidrogen, experimentele s-au bazat pe măsurători electrice C-V, obținute la diferite concentrații de  $\text{H}_2$ , cuprinse în gama 20 – 1800 ppm, utilizând diferite temperaturi de măsură, cuprinse în intervalul 25 - 200°C. Au fost analizate atât variația răspunsului senzorilor testați cu temperatura de măsură, valori obținute din deplasarea caracteristicilor C-V către stânga în prezența  $\text{H}_2$ , cât și comportamentul dinamic al acestora. S-a dovedit că un tratament termic post-oxidare în atmosferă de  $\text{N}_2$ , la o temperatură de 1100°C, timp de 6 minute, îmbunătățește semnificativ performanțele de sensor ale capacitoarelor MOS pe SiC realizate. La o concentrație de  $\text{H}_2$  de 20 ppm, timpul de răspuns al senzorului  $\text{N}_2$  are valori de ordinul a 10 s.

## CONTRIBUȚII ORIGINALE

Dezvoltarea senzorilor pe SiC, prezentați în această teză de doctorat, s-a bazat atât pe investigații ale mecanismelor fundamentale de transport în structurile test, cât și pe propunerea și punerea la punct a unor procese tehnologice noi, conducând în final la obținerea unor îmbunătățiri semnificative ale parametrilor de funcționare ai structurilor finale. Fiecare etapă de realizare a dispozitivelor fabricate pe SiC a reprezentat o analiză amănunțită pentru obținerea unui rezultat optim în ceea ce privește funcționarea senzorilor în medii ostile. *Astfel, contribuții originale au fost aduse la nivelul fiecărei etape parcurse pentru obținerea unor senzori eficienți de temperatură, respectiv hidrogen, pe SiC, de la alegerea fluxului tehnologic, proiectarea măștilor fotolitografice și alegerea parametrilor proceselor tehnologice, la investigarea și analizarea caracteristicilor de dispozitiv, pentru propunerea în final a alternativei optime.*

În continuare este realizată o trecere în revistă a principalelor contribuții prezentate pe larg pe parcursul tezei de doctorat:

- ❖ Proiectarea măștilor fotolitografice a reprezentat o etapă critică în dezvoltarea unor astfel de senzori pe SiC. Primele experimente au avut în vedere realizarea unor măști fotolitografice pentru fabricația unor capacitoare MOS pe SiC sub forma unor matrici. Astfel că, un chip cuprindea 4 arii active diferite, cu o configurație circulară având diametrele de: 18, 24, 36, respectiv 64  $\mu\text{m}$ . Aceste capacitoare MOS erau condiționate de proiectarea unor structuri de compensare, ce aveau rolul de a elimina capacitatea parazită introdusă de pad. Astfel, au fost proiectate structuri identice, alăturate celor active, fiind definite direct pe oxidul de câmp depus. În consecință, puteam determina valoarea exactă a capacității printr-o măsurătoare diferențială dintre cele două structuri. Capacitoarele MOS realizate pe SiC, cu ajutorul acestor măști fotolitografice, au demonstrat o funcționare corectă până la temperaturi de 300°C [1, 2]. **Pentru a reduce costurile de fabricație ale dispozitivelor pe SiC, s-a propus proiectarea unui set de măști fotolitografice comun, atât pentru realizarea diodelor Schottky, cât și a capacitoarelor MOS pe SiC. Astfel, prin implementarea unor etape comune ale fluxului tehnologic de fabricație al diodelor Schottky, respectiv al capacitoarelor MOS pe SiC, au fost realizate dispozitive cu un comportament electric favorabil până la temperaturi de 400°C [3].**

- ❖ În ceea ce privește contribuțiile originale aduse asupra fluxului tehnologic de realizare al dispozitivelor pe SiC, acestea cuprind o serie de etape tehnologice care au condus la îmbunătățiri semnificative, din punct de vedere electric, atât ale diodelor Schottky, cât și ale capacitoarelor MOS pe SiC.

- **S-a demonstrat eficiența unei rampe în oxid în cazul unei diode Schottky pe SiC, în ceea ce privește tensiunea de străpungere și distribuția densității de curent [4].** Obținerea unui astfel de profil reprezintă o etapă critică în realizarea unui dispozitiv pentru aplicații de temperatură ridicată. În acest sens, a fost pus la punct un proces de corodare al oxidului, pentru obținerea unui unghi cât mai mic al rampei, proces ce poate conduce la obținerea unor performanțe înalte în ceea ce privește funcționarea electrică a dispozitivelor. **Astfel, pentru a optimiza acest proces de corodare s-au realizat o serie de încercări ce au presupus modificarea temperaturii soluției de corodare, respectiv timpul necesar îndepărtării totale a oxidului din aria activă [5].**
- Un astfel de profil cu o configurație de rampă în oxidul de câmp a fost utilizată și pentru fabricația capacitoarelor MOS pe SiC, acestea acționând ca senzori de  $\text{H}_2$ . **Caracteristicile electrice ale dispozitivelor MOS realizate au condus la o funcționare favorabilă în prezența unei concentrații mari de  $\text{H}_2$ , până la o temperatură de 250°C [6, 7, 8].**

În urma acestui proces, se deschid ferestre în oxidul de câmp, depus printr-o tehnică CVD, în care se poate crește un oxid pe SiC sau se depune un metal pentru formarea unui contact Schottky. Aceste două etape reprezintă cheia fabricației unui capacitor MOS, respectiv unei diode Schottky pe SiC, procesele fiind studiate și exploatate amănunțit în scopul obținerii unor structuri capabile să funcționeze la o temperatură ridicată.

Astfel, obținerea unui contact Schottky optim Ni/4H-SiC este condiționată de un tratament termic post-metalizare într-o atmosferă inertă. În acest sens, au fost efectuate mai multe astfel de tratamente în atmosferă de Ar, respectiv N<sub>2</sub>, la diferite temperaturi. **În urmă acestor experimente, s-au stabilit condițiile unui astfel de tratament pentru obținerea unui contact Schottky Ni/4H-SiC stabil la temperaturi ridicate.** Tratamentul termic post-metalizare are rolul de a transform metalul depus într-o siliciură, în urma reacției la temperatură ridicată cu semiconductorul. În plus, în urma tratamentului termic se dorește obținerea pe întreaga suprafață activă a contactului Schottky a unui astfel de compus, deoarece acesta prezintă o stabilitate excelentă la temperaturi ridicate. **S-a demonstrat că un tratament termic post-metalizare într-o atmosferă inertă de N<sub>2</sub>, la o temperatură de 800°C, timp de 8 minute, asigură formarea unei siliciuri de Ni pe întreaga suprafață a contactului Schottky.** Rezultatele au fost validate printr-o difractograma de raze X, dar și prin măsurători electrice la diferite temperaturi [9, 10, 11, 12, 13].

În ceea ce privește fabricația unui capacitor MOS, acesta presupune creșterea unui oxid pe SiC printr-un proces de oxidare termică. În urma acestuia, densitatea stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC este cu până la două ordine de mărime mai mare față de cazul oxidării Si-ului. Acest inconvenient este cauzat de prezența atomilor de C nereactionați în timpul procesului de oxidare termică. Aceștia rămân la suprafața SiC, introducând diferite defecte în cadrul unei interfețe SiO<sub>2</sub>/SiC, având ca rezultat instabilități ale capacitorului MOS pe SiC. Pentru reducerea acestor efecte negative s-au studiat diverse tratamente termice post-oxidare, realizate în condiții de temperatură, respectiv atmosferă bine precizate. S-a dorit dezvoltarea unor astfel de procese care să reducă densitatea stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC în scopul obținerii unor structuri MOS stabile. În urma procesului de oxidare termică, realizat la o temperatură de 1100°C, timp de 2 ore, într-o atmosferă uscată de O<sub>2</sub>, au fost aplicate două tratamente termice post-oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub>, la o temperatură de 1100°C, timp de 6 minute, respectiv în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, la o temperatură de 1000°C, timp de 30 de minute. Aceste tratamente termice post-oxidare au condus la rezultate foarte bune în ceea ce privește reducerea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC.

Astfel, cu ajutorul unor caracteristici C-V, obținute la diferite temperaturi, cuprinse în intervalul 80-300 K, s-a putut determina experimental valorile densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, distribuite pe nivele mai puțin adânci sub banda de conducție a SiC ( $E_c - E_t < 0.2$  eV). **În urma acestor determinări, s-a observat o ușoară reducere a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC în cazul capacitorului MOS, al cărui oxid crescut a fost tratat în atmosferă de N<sub>2</sub>. Însă, îmbunătățirea semnificativă se regăsește în cazul capacitorului MOS cu oxidul tratat în atmosferă de POCl<sub>3</sub>.** În acest caz, valoarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC a scăzut cu aproape un ordin de mărime, la un nivel energetic din imediată apropiere a benzii de conducție a SiC ( $E_c - 0.05$  eV).

Pentru a analiza efectul acestor tratamente termice asupra stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, distribuite pe nivele mai adânci în banda interzisă a SiC, s-au făcut măsurători electrice la temperatura camerei, utilizând o frecvență înaltă, respectiv un regim quasi-static, acesta din urmă fiind considerat un caz particular al unei măsurători la frecvență joasă. Și în acest caz, reducerea stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC este evidentă în cazul capacitorului MOS, al cărui oxid crescut a fost tratat în atmosferă de N<sub>2</sub>, fiind semnalată o reducere a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC cu aproape 75 %, la un nivel energetic de aproximativ 0.2 eV sub banda de conducție a SiC. În cazul capacitorului MOS cu oxidul tratat în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, performanțele electrice ale dispozitivului realizat sunt semnificativ îmbunătățite, fiind demonstrate printr-o scădere cu mai mult de un ordin de mărime a densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC, la un nivel energetic de aproximativ 0.2 eV sub banda de conducție. **Aceste tratamente termice au condus și la îmbunătățiri semnificative ale calității oxidului crescut pe SiC, având ca rezultate creșterea câmpului electric de strapungere, scăderea curenților de saturație și obținerea unei bariere de potențial, dintre banda de conducție a SiC și ce a oxidului, mai apropiată de valoarea sa ideală, 2.7 eV. În consecință, dezvoltarea acestor procese au contribuit cu succes la realizarea unor dispozitive de tip MOS stabile la temperatură ridicată [14, 15, 16, 17].**

Funcționarea la temperatură ridicată a dispozitivelor realizate pe SiC este condiționată de un proces de încapsulare al dispozitivelor finale bine pus la punct. Problema principală cu care se confruntă acest proces tehnologic constă în lipirea chip-ului pe amabaza capsulei. În acest sens, au fost utilizate diferite tehnici, cu rolul de a facilita funcționarea dispozitivelor pe SiC la temperaturi de până la 450°C [18, 19].

**Analizând valorile răspunsului în capacitate, obținute pentru o concentrație de H<sub>2</sub> de 20 ppm, putem spune că acestea prezintă valori apropiate de la un senzor la celălalt.**

**În concluzie,** putem vorbi despre îmbunătățirea performanțelor senzorilor în urma tratamentelor termice post-oxidare aplicate. Așadar, un tratament termic post-oxidare în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, realizat la o temperatură de 1000°C, timp de 30 de minute, reprezintă o soluție tehnologică benefică pentru fabricația unui capacitor MOS pe SiC, stabil la diferite temperaturi de măsură. În schimb, un tratament termic rapid post-oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub>, la o temperatură de 1100°C, timp de 6 minute, putem spune că reprezintă o soluție tehnologică optimă pentru realizarea unor dispozitive MOS pe SiC care să funcționeze ca senzori de H<sub>2</sub> în condiții de temperatură ridicată.



Chiar dacă valoarea densității stărilor de la interfața SiO<sub>2</sub>/SiC nu a fost redusă la fel de mult ca în cazul tratamentului realizat în atmosferă de POCl<sub>3</sub>, acest tratament are o influență pozitiv-semnificativă asupra performanțelor ca sensor al dispozitivului MOS pe SiC. Pe lângă valorile semnificativ mai mari ale răspunsului în capacitate la diferite concentrații de H<sub>2</sub>, acești senzori prezintă timpi de reacție mai mici, detectând astfel prezența H<sub>2</sub> într-un timp mai scurt față de ceilalți doi senzori.

**În consecință, putem afirma că soluția tehnologică principală pentru realizarea unor senzori de H<sub>2</sub>, bazați pe capacitatoare MOS pe SiC, care să funcționeze la temperaturi ridicate și să prezinte anumite performanțe în privința detecției anumitor concentrații de H<sub>2</sub>, constă în aplicarea unui astfel de tratament termic rapid post-oxidare în atmosferă de N<sub>2</sub>.**

## LISTA LUCRĂRILOR ORIGINALE

### - Articole publicate în reviste cotate ISI

1. "A new 4H-SiC hydrogen sensor with oxide ramp termination", Răzvan Pascu, Mihaela Kusko, Florea Craciunoiu, Gheorghe Pristavu, Gheorghe Brezeanu, Marian Badila, Viorel Avramescu, **Materials Science in Semiconductor Processing**, Available online 19 August 2015, doi:10.1016/j.mssp.2015.08.019.
2. "A model to non-uniform Ni Schottky contact on SiC annealed at elevated temperatures", G. Pristavu, G. Brezeanu, M. Badila, R. Pascu, M. Dănilă, and P. Godignon, **Applied Physics Letters** 106, 261605 (2015); doi: 10.1063/1.4923468.
3. "POCl<sub>3</sub> annealing effect on the flat band voltage instabilities for a SiC based MOS capacitor at high temperature", Răzvan Pascu, Gheorghe Pristavu, Florea Craciunoiu, Marian Badila, Mihaela Kusko, Gheorghe Brezeanu, Jenica Neamțu, Raluca Gavrilă, **Romanian Journal of Information Science and Technology**, nr. 4, Vol. 17, pp. 340 – 352, 2014,.

### - Articole publicate în proceeding-uri indexate ISI

1. "Electrical characterization of Ni-silicide Schottky contacts on SiC for high performance temperature sensor", Răzvan Pascu, Gheorghe Pristavu, Gheorghe Brezeanu, Florin Drăghici, Marian Badila, Florea Craciunoiu, **Materials Science Forum**, Vols 821-823 pp 436-439, 2015.
2. "SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interface states reduction by POCl<sub>3</sub> post-oxidation annealing", Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Mihaela Kusko, Mihai Mihăilă, Gheorghe Pristavu, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, **IEEE CAS Proceedings**, pp. 255-258, 2015
3. "Barrier non-uniformity of annealed Ni/4H-SiC Schottky contacts with temperature", Pristavu, G.; Brezeanu, G.; Badila, M.; Vasilica, A.; Pascu, R., in Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2015 11th Conference on , vol., no., pp.157-160, June 29 2015-July 2 2015 doi: 10.1109/PRIME.2015.7251358
4. "High temperature Sensors Based on Silicon Carbide (SiC) Devices", Brezeanu, G.; Badila, M.; Draghici, F.; Pascu, R.; Pristavu, G.; Craciunoiu, F.; Rusu, I., **IEEE CAS Proceedings**, pp. 3-10, 2015, articol invitat la International Semiconductor Conference (CAS), Oct. 2015
5. "High Voltage Freewheeling Diodes in an Extended Capability LED Driving Application", Pristavu, G., Vasilica, A.; Anghel, V.; Pascu, R.; Brezeanu, G.; Draghici, F., **IEEE CAS Proceedings**, pp. 175-178, 2015
6. "Temperature behavior of 4H-SiC MOS capacitor used as a gas sensor", Răzvan Pascu, Gheorghe Pristavu, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, Florin Drăghici, Florea Craciunoiu, **IEEE CAS Proceedings**, pp. 185-188, 2014.
7. "Two packaging solutions for high temperature SiC diode sensors", Gheorghe Brezeanu, Florin Drăghici, Marian Badila, Florea Craciunoiu, Gheorghe Pristavu, Răzvan Pascu, Florea Bernea, **Materials Science Forum**, vol. 778-780, pp. 1063-1066, 2014.
8. "High Temperature SiC-Sensors", Gheorghe Pristavu, Răzvan Pascu, Florin Drăghici, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, Florea Craciunoiu, **IEEE Proceeding of 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, pp. 329-332, 2014.
9. "Ordered shapes of the CVD SiO<sub>2</sub> evidenced by wet etching", Angela Baracu, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, **IEEE CAS Proceedings**, pp. 121 – 124, 2014.
10. "4H-SiC Schottky Contact Improvement for Temperature Sensor Applications", Florin Drăghici, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, Gheorghe Pristavu, Ion Rusu, Florea Craciunoiu, Răzvan Pascu, **IEEE CAS Proceedings**, Vol. 2, pp. 163-166, 2013.

11. “A promising technology of Schottky diode based on 4H-SiC for high temperature application”, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Mihaela Kusko, **IEEE PRIME Proceeding**, pp. 297-300, 2013.
12. “The effect of the post-metallization annealing of Ni/n-type 4H-SiC Schottky contact”, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Mihaela Kusko, Florea Drăghici, A. Dinescu, M. Dănilă, **IEEE CAS Proceedings**, Vol.2, pp. 457-460, 2012.
13. “High temperature sensor based on SiC Schottky diodes with undoped oxide ramp termination”, Răzvan Pascu, Florin Drăghici, Marian Badila, Florea Craciunoiu, Gheorghe Brezeanu, Adrian Dinescu, Ion Rusu, **IEEE CAS Proceedings**, Vol. 2, 379-382, 2011.

- **Lucrări prezentate la conferințe internaționale**

1. “SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interface states reduction by POCl<sub>3</sub> post-oxidation annealing”, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Mihaela Kusko, Mihai Mihăilă, Gheorghe Pristavu, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, **prezentare orală, Sesiunea Student Papers-Devices And Sensors, la International Semiconductor Conference (CAS)**, Oct. 2015 – **Best Paper Award**
2. “The improvement of hydrogen sensor response based on Pd/SiO<sub>2</sub>/SiC capacitor by a post-oxidation annealing in N<sub>2</sub> ambient”, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Mihaela Kusko, Gheorghe Pristavu, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu - **prezentare la conferința ICSCRM 2015**, 4 – 9 octombrie, Giardini Naxos, Italia.
3. “The sensitivity dependence of hydrogen sensors based on MOSiC structure on temperature”, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Dragoș Ovezea, Marian Badila, Gheorghe Pristavu, Gheorghe Brezeanu, Cosmin Romanitan, Jenica Neamțu - **prezentare orală la conferința EMRS 2015 Spring**, 11 – 15 mai 2015, Simpozionul „Nanomaterials and processes for advanced semiconductor CMOS devices”
4. “Hydrogen gas sensors based on silicon carbide (SiC) MOS capacitor structure”, Răzvan Pascu, Jenica Neamțu, Florea Craciunoiu, Gheorghe Brezeanu, Dragoș Ovezea - **Poster prezentat la conferința EMRS Fall Meeting 2014**, 15 – 18 septembrie 2014, Simpozionul „Alternative semiconductor integration in Si microelectronics: materials, techniques & applications 2” - **Best Paper Awards**.
5. “Temperature behavior of 4H-SiC MOS capacitor used as a gas sensor”, Răzvan Pascu, Gheorghe Pristavu, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, Florin Drăghici, Florea Craciunoiu, **prezentare orală la International Semiconductor Conference (CAS)**, 2014.
6. “Two packaging solutions for high temperature SiC diode sensors”, Gheorghe Brezeanu, Florin Drăghici, Marian Badila, Florea Craciunoiu, Gheorghe Pristavu, Răzvan Pascu, Florea Bernea, **prezentare poster la conferința ICSCRM**, 2013.
7. “High Temperature SiC-Sensors”, Gheorghe Pristavu, Răzvan Pascu, Florin Drăghici, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, Florea Craciunoiu, **prezentare poster la 20th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging**, 2014.
8. “Ordered shapes of the CVD SiO<sub>2</sub> evidenced by wet etching”, Angela Baracu, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, **prezentare orală la International Semiconductor Conference (CAS)**, 2014.
9. “4H-SiC Schottky Contact Improvement for Temperature Sensor Applications”, Florin Drăghici, Marian Badila, Gheorghe Brezeanu, Gheorghe Pristavu, Ion Rusu, Florea Craciunoiu, Răzvan Pascu, **prezentare poster la International Semiconductor Conference (CAS)**, 2013.
10. “A promising technology of Schottky diode based on 4H-SiC for high temperature application”, Răzvan Pascu, Florea Craciunoiu, Mihaela Kusko, **prezentare orală la PRIME**, 2013. **Bronze Leaf Award**

### ***Mulțumiri***

“Rezultatele prezentate în această lucrare au fost obținute cu sprijinul Ministerului Fondurilor Europene prin Programul Operational Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. **POSDRU/159/1.5/S/132395**.

The work has been funded by the Sectoral Operational Programme Human Resources Development 2007-2013 of the Ministry of European Funds through the Financial Agreement POSDRU/159/1.5/S/132395.”

Contract PCCA 21/2012 “**Senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu (SiC) pentru aplicații industriale în medii ostile**”

Contract PCCA 204/2012 “**Detector de gaze inflamabile și toxice bazat pe matrice de senzori MOS pe carbură de siliciu**”

## PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

*Plecând de la cercetarea realizată asupra celor două dispozitive fabricate pe SiC, performanțele electrice ale acestora pot fi îmbunătățite prin optimizarea fluxului tehnologic și a tehnicilor de încapsulare ale dispozitivelor finale. În plus, îmbunătățirea caracteristicilor electrice ale dispozitivelor fabricate pe SiC poate conduce la creșterea capabilității de funcționare ca senzori în medii ostile. În acest sens, se pot face o serie de investigații micro-fizice, respectiv electrice, privind efectul aplicării unor etape tehnologice intermediare pentru îmbunătățirea performanțelor dispozitivelor realizate pe SiC.*

Atunci când dioda Schottky pe SiC acționează ca senzor de temperatură înaltă, aceasta are nevoie de o barieră de potențial metal/semiconductor (Schottky) cu o valoare cât mai mare. În cercetarea desfășurată în cadrul acestei teze de doctorat s-a avut în vedere dezvoltarea unei diode Schottky pe SiC, utilizând drept metal de poartă, Ni-ul. Așa cum am mai menționat, obținerea unui contact Schottky cu performanțe înalte este condiționată de un tratament termic post-metalizare într-o atmosferă inertă și la o temperatură ridicată. Acest tratament are ca scop obținerea unei siliciuri de Ni pe întreaga suprafață activă a contactului Schottky, aceasta prezentând o stabilitate mai bună a dispozitivului la temperaturi ridicate. În plus, siliciura de Ni oferă și o barieră Schottky mai mare față de cazul unui contact Schottky Ni/4H-SiC netratat termic. Deoarece bariera Schottky depinde în mare parte de lucrul mecanic de extracție al metalului, pentru fabricația unui senzor de temperatură ridicată poate fi utilizat un metal cu un lucru mecanic de extracție mai mare decât cel al Ni-ului, așa cum este cazul Pt. În comparație cu Ni-ul, care prezintă un anumit risc de oxidare într-o atmosferă ambiantă, Pt poate fi procesată fără a exista vreo amenințare de apariție a unui oxid la suprafața acesteia. În schimb, aceasta prezintă un dezavantaj tehnologic major, neputând fi corodată într-o soluție umedă. În acest caz, Pt poate fi definită prin tehnică lift-off, ce constă într-o delimitare a ariilor active cu ajutorul unei măști fotolitografice imprimată într-un fotorezist. Acest proces trebuie să fie bine pus la punct, deoarece există riscul ca fotorezistul să nu fie îndepărtat în totalitate din ariile unde dorim să definim metalul și astfel pot apărea anumite scurtcircuite între mai multe structuri.

O altă problemă, cu care se confruntă funcționarea diodelor Schottky la temperaturi ridicate, este procesul de încapsulare. Dificultatea constă în lipirea cipului pe ambaza capsulei, întâmpinând o serie de probleme în cazul metodelor testate în cercetarea desfășurată în cadrul programului de doctorat:

- lipirea cipului de ambază cu pastă de Ag;
- lipirea cipului de ambază cu o nano-pasta de Ag de înaltă temperatură;
- lipirea cipului de ambază prin intermediu unei preforme din AuIn;
- lipirea cipului de ambază prin eutectic.

În acest sens, se dorește realizarea unui tip de capsulă care să conducă la o creștere semnificativă a fiabilității senzorului de temperatură ridicată. Avantajul acestui tip de capsulă constă în evitarea unui proces de lipire a cipului de ambază cu ajutorul unei tehnici descrise anterior. Astfel, cipul este conectat electric la cele două terminale ale capsulei prin intermediul unor pistonase, care sunt presate de două arcuri aflate în capetele capsulei. În acest fel, pericolul dezlipirii cipului de ambază este eliminat, având ca rezultat creșterea fiabilității diodelor Schottky pe SiC atunci când sunt testate la o temperatură ridicată.

În această teză de doctorat, performanțele capacitivelor MOS realizate pe SiC au fost analizate din punct de vedere electric, atât la diferite temperaturi de măsură, cât și în prezența unor concentrații de H<sub>2</sub>. O serie de analize micro-fizice poate conduce la îmbunătățirea semnificativă a performanțelor ca senzori de H<sub>2</sub> ale dispozitivelor MOS pe SiC. Astfel, oxidul crescut pe SiC și tratat în diferite atmosfere poate fi investigat cu ajutorul unui microscop electronic de transmisie (TEM) ce include un analizor de spectroscopie cu raze x cu energie dispersivă (EDX). Un astfel de profil ne poate oferi exact distribuția atomilor de N sau P (cazuri particulare ale tratamentelor termice post-oxidare utilizate în această teză) distribuți în rețeaua oxidului crescut pe SiC. De cele mai multe ori, un tratament termic post-oxidare în atmosferă de fosfor formează la suprafața SiO<sub>2</sub> un strat de oxid puternic dopat ce poate influența negativ performanțele de senzor ale capacitivelor MOS pe SiC. În urma unor investigații TEM și a unui profil EDX, putem identifica grosimile exacte ale acestor straturi de oxid dopat, ulterior putând fi îndepărtate cu ajutorul unui proces de corodare uscată în plasmă bine controlat (RIE – Reactive Ion Etching). În acest fel se poate asigura o suprafață a oxidului crescut ce asigură un contact mult mai stabil cu metalul catalitic. Aceste experimente încurajează dezvoltarea ulterioară a unui tranzistor MOS cu efect de câmp, un dispozitiv ce este controlat în curent prin aplicarea unei tensiuni pe poartă și oferă sensibilități mai mari atunci când este expus la diferite concentrații de gaz.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] *J.B. Casady, R.W. Johnson*, Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review, *Solid-State Electron*, **Vol. 39**, pp. 1409, 1996.
- [2] *P.G. Neudeck, R.S. Okojie, L.-Y. Chen*, High-temperature electronics - a role for wide bandgap semiconductors?, *Proc. IEEE*, **Vol. 90**, pp. 1065, 2002.
- [3] *N.I. Sax*, "Dangerous Properties of Industrial Materials", 4th ed. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 21-25, USA, 1975.
- [4] *W. J. Choyke, G. Pensl*, "Physical Properties of SiC", *MRS Bulletin*, pp.25–29, 1997.
- [5] *K. Järrendahl, R. Davis*, Material Properties and Characterization of SiC, Semiconductors and Semimetals," *SiC Materials and Devices*, **Vol. 52**, Editura Y. S. Park, 1998.
- [6] *S. E. Saddow, A. Agarwal*, „Advances in Silicon Carbide Processing and Applications”, *Semiconductor Materials and Devices Series*, ISBN 1-58053-740-5, Editura Artech House, 2004.
- [7] *K. Potje-Kamloth*, "Semiconductor junction gas sensors", *Chem. Rev.*, **Vol. 108**, 2008, pp. 367-399.
- [8] *A. R. Usqaocar, C. H. de Groot, C. Boulart, A. Castillo, A. Chavagnac*, "Low power hydrogen sensors using electrodeposited PdNi-Si Schottky diodes" *Sens. Actuators B Chem*, **Vol. 170**, 2012, pp. 176-181.
- [9] *G. Brezeanu, M. Badila, B. Tudor, J. Millan, P. Godignon, F. Udrea, G.A.J. Amaratunga, A. Mihaila*, "Accurate Modeling and Parameter Extraction for 6H-SiC Schottky Barrier Diodes (SBDs) with Nearly Ideal Breakdown Voltage" *IEEE Transactions On Electron Devices*, **Vol 48**, No. 9, September 2001, pp. 2148-2153.
- [10] *R. Pascu, F. Craciunoiu, M. Kusko, F. Draghici, A. Dinescu, M. Danila*, "The effect of the post metallization annealing of Ni/n-type 4H-SiC Schottky contact", *IEEE CAS Proceedings*, **Vol.2**, 2012, pp. 457-460.
- [11] *R. Pascu, F. Craciunoiu, M.Kusko*, "A promising technology of Schottky diode based on4H-SiC for high temperature application", *IEEE Proceeding of 9th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics*, *IEEE PRIME Proceeding 2013*, pp. 297-300.
- [12] *F. Roccaforte, F. la Via, V. Ranieri, P. Musurneci, L. Calcagno, G.G.Condorelli*, *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. A77**, 2003, pp. 727-833.
- [13] *F. Draghici, M. Badila, G. Brezeanu, G. Pristavu, I. Rusu, F. Craciunoiu, R. Pascu*, „4H-SiC Schottky Contact Improvement for Temperature Sensor Applications”, *IEEE CAS Proceedings*, **Vol. 2**, 2013, pp. 163-166.
- [14] *G. Pristavu, G. Brezeanu, M. Badila, R. Pascu, M. Danila, P. Godignon* "A model to non-uniform Ni Schottky contact on SiC annealed at elevated temperatures", *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. 106**, 2015, pp. 261605 1 - 5.
- [15] *L. Teodorescu, A. Gheorghe, F. Draghici, G. Brezeanu, I.Rusu*, "Power Supply Architecture for High Temperature Chuck Systems", *Proc. of the 37th International Semiconductor Conference*, 13-15 Octombrie 2014, pp.193-196.
- [16] *V. V. Afanas'ev, F. Ciobanu, S. Dimitrijević, G. Pensl, and A. Stesmans*, „Band alignment and defect states at SiC/oxide interfaces", *J. Phys.: Condens. Matter*, **Vol. 16**, no. 17, 2004, pp. 1839 - 1857.
- [17] *W. Lu, L. C. Feldman, Y. Song, S. Dhar, W. E. Collins, W. C. Mitchel, and J. R. Williams*, „Graphitic features on SiC surface following oxidation and etching using surface enhanced Raman spectroscopy", *Applied Physics Letters*, **Vol. 85**, 2004, pp. 3495 - 3497
- [18] *B. Hornetz, H. J. Michel, and J. Halbritter*, *J. Mater. Res.*, **Vol. 9**, 1994, 3088 – 3094.
- [19] *S. Wang, S. Dhar, S.-r. Wang, A. C. Ahyi, A. Franceschetti, J. R. Williams, L. C. Feldman, and S. T. Pantelides*, „Bonding at the SiC–SiO<sub>2</sub> Interface and the Effects of Nitrogen and Hydrogen", *Physical Review Letters*, **Vol. 98**, 2007, pp. 026101 1 - 4.
- [20] *R. Palmieri, C. Radtke, M. R. da Silva, H. Boudinov, and E. F. da Silva*, „Trapping of majority carriers in SiO<sub>2</sub>/4H-SiC structures", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **Vol. 42**, no. 12, 2009, pp. 125301 - 125302.
- [21] *C. Orneby and C. G. Pantano*, „Silicon oxycarbide formation on SiC surfaces and the SiC/SiO<sub>2</sub> interface", *J. Vac. Sci. Technol. A*, **Vol. 15**, 1997, pp. 1597.
- [22] *T. E. Rudenko, I. N. Osiyuk, I. P. Tyagulski, H. O. Olafsson, E. O. Sveinbjornsson*, „Interface trap properties of thermally oxidized n-type 4H–SiC and 6H–SiC", *Solid State Electron*, **Vol. 49**, 2005, pp. 545-553.
- [23] *V. V. Afanas'ev, A. Stesmans, M. Bassler, G. Pensl, M. J. Schulz*, "Shallow electron traps at the 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> interface", *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. 76**, 2000, pp. 336 – 339.
- [24] *N. S. Saks, S. S. Mani, A. K. Agarwal*, "Interface trap profile near the band edges at the 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> interface", *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. 76**, 2000, pp. 2250.
- [25] *S. Dhar, X. D. Chan, P. M. Mooney, J. R. Williams, L. C. Feldman*, "Ultrashallow defect states at SiO<sub>2</sub>/4H–SiC interfaces", *Appl. Phys. Lett.*, **Vol. 92**, 2008, pp. 102112 – 1 – 3.
- [26] *V. V. Afanas'ev, A. Stesmans, and C. J. Harris*, "Observation of Carbon Clusters at the 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> Interface", *Mater. Sci. Forum*, **Vol. 857**, 1998, pp. 264 – 268.
- [27] *Sanjeev K Gupta, A. Azam and J. Akhtar*, "Variation of interface trap level charge density within the bandgap of 4H-SiC with varying oxide thickness", *Pramana – J. Phys.*, **Vol. 76**, No. 1, ianuarie 2011, 165 – 172.

- [28] Y.K. Sharma, A.C. Ahyi, T. Issacs-Smith, X. Shen, S.T. Pantelides, X. Zhu, L.C. Feldman, J. Rozen e, J.R. Williams, "Phosphorous passivation of the SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interface", *Solid-State Electronics*, **Vol. 68**, 2012, pp. 103–107.
- [29] John Rozen, Sarit Dhar, S. K. Dixit, V. V. Afanas'ev, F. O. Roberts, H. L. Dang, Sanwu Wang, S. T. Pantelides, J. R. Williams, and L. C. Feldman, "Increase in oxide hole trap density associated with nitrogen incorporation at the SiO<sub>2</sub>/SiC interface", *J Appl Phys*, **Vol. 103**, 2008, pp. 124513 – 1 - 5.
- [30] L. K. Swanson, P. Fiorenza, F. Giannazzo, A. Frazzetto, and F. Roccaforte, "Correlating macroscopic and nanoscale electrical modifications of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interfaces upon post-oxidation-annealing in N<sub>2</sub>O and POCl<sub>3</sub>", *Applied Physics Letters*, **Vol. 101**, 2012, pp. 193501 – 1 – 4.
- [31] R. H. Folwer and L. Nordheim, „Electron Emission in Intense Electric Fields”, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **Vol. 119**, no. 781, 1928, pp. 173 - 181.
- [32] M. Lenzlinger and E. H. Snow, „Fowler-Nordheim Tunneling into Thermally Grown SiO<sub>2</sub>”, *Journal of Applied Physics*, **Vol. 40**, 1969, pp. 278 - 283.
- [33] P. Jamet and S. Dimitrijeva, "Physical properties of N<sub>2</sub>O and NO-nitrided gate oxides grown on 4H SiC", *Applied Physics Letters*, **Vol. 79**, 2001, pp. 323.
- [34] Hirofumi Kurimoto, Kaoru Shibata, Chiharu Kimura, Hidemitsu Aoki, Takashi Sugino, "Thermal oxidation temperature dependence of 4H-SiC MOS interface", *Applied Surface Science*, **Vol. 253**, 2006, pp. 2416–2420.
- [35] Z. Ouennoughi, C. Strenger, F. Bourouba, V. Haeublein, H. Ryssel, L. Frey, "Conduction mechanisms in thermal nitride and dry gate oxides grown on 4H-SiC", *Microelectronics Reliability*, **Vol. 53**, 2013, pp. 1841–1847.
- [36] Athhawut Chanthaphan, Takuji Hosoi, Shuhei Mitani, Yuki Nakano, Takashi Nakamura, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, "Investigation of unusual mobile ion effects in thermally grown SiO<sub>2</sub> on 4H-SiC(0001) at high temperatures", *Applied Physics Letters*, **Vol. 100**, 2012, pp. 252103 -1 – 4.
- [37] Kimizuka, N.; Yamamoto, T.; Mogami, T.; Yamaguchi, K.; Imai, K.; Horiuchi, T., „The impact of bias temperature instability for direct-tunneling ultra-thin gate oxide on MOSFET scaling," in *VLSI Technology. Digest of Technical Papers 1999 Symposium on*, 14-16 June 1999, vol., no., pp.73-74.
- [38] M. J. Marinella, D. K. Schroder, T. Isaacs-Smith, A. C. Ahyi, J. R. Williams, G. Y. Chung, J. W. Wan, and M. J. Loboda, „Evidence of Negative Bias Temperature Instability in 4H-SiC Metal Oxide Semiconductor Capacitors" *Applied Physics Letters*, **Vol. 90**, 2007, pp. 253508-1-3.
- [39] D. Alok, P.K. McLarty, and B.J. Baliga, "Electrical properties of thermal oxide grown using dry oxidation on p type 6H-silicon carbide", *Journal of Applied Physics*, **Vol. 65**, 1994, pp. 2177 - 2179.
- [40] M. J. Marinella, D. K. Schroder, T. Isaacs-Smith, J. R. Williams, G. Y. Chung, and M. J. Loboda, „Carrier Generation Lifetimes in 4H-SiC MOS Capacitors", *IEEE Transactions Electron Devices*, **Vol. 57**, 2010, pp. 1910 – 1923.
- [41] P. Fiorenza, L. K. Swanson, M. Vivona, F. Giannazzo, C. Bongiorno, A. Frazzeto, F. Roccaforte, "Comparative study of "gate oxide in 4H-SiC lateral MOSFETs subjected to post-deposition-annealing in N<sub>2</sub>O and POCl<sub>3</sub>", *Appl Phys A*, **Vol. 115**, 2014, pp. 333–339.
- [42] D.L. Griscom, E.J. Friebele, K.J. Long, J.W. Fleming, „Fundamental defect centers In glass: Electron spin resonance and optical absorption studies of irradiated phosphorus-doped silica glass and optical fibers”, *J. Appl. Phys.*, **Vol. 54**, 1983, pp. 3743 – 3762.
- [43] Pascu, R.; Craciunoiu, F.; Kusko, M., „A promising technology of Schottky diode based on 4H-SiC for high temperature application," *Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, 2013 9th Conference on, 24-27 iunie 2013, pp .297 – 300.
- [44] Gheorghe Pristavu, "Diode Schottky pe carbura de siliciu pentru aplicatii de inalta temperatura si tensiune", *Universitatea Politehnica din Bucuresti, Facultatea de Electronica, Telecomunicatii si Tehnologia Informatiei*, 2015.