

# **Töltött részecskék besugárzásával keltett kristályhibák szilíciumkarbidban**

Ph.D. tézisfüzet

**ZOLNAI Zsolt**

Témavezető: **Dr. LOHNER Tivadar**

Magyar Tudományos Akadémia

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet, MTA MFA

Egyetemi konzulensek: **Prof. DEÁK Péter**  
**Dr. HÁRS György**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, BME  
Atomfizika Tanszék

**MTA MFA – BME AFT**

**2005**

## A kutatások előzménye

A mikroelektronika vívmányai nagymértékben befolyásolják mindennapi életünket és nagy hatást gyakorolnak az egész társadalomra. Az egyre kisebb méretű – és egyben olcsóbban legyártható és megbízhatóbb működésű – eszközök előállítására iránti fokozódó követelmények a hagyományos szilícium alapú mikroelektronikai technológiát napjainkra a teljesítőképessége határáig juttatták. A növekvő kereskedelmi igények kielégítése és a félvezető eszközök alkalmazási területeinek további bővítése elengedhetetlenné teszi új anyagok és technológiák kutatását és bevezetését.

Kezdetben a félvezető eszközöket germániumból (Ge) készítették, végül a szilícium (Si) vívta ki a vezető szerepet a félvezetőiparban, főként annak köszönhetően, hogy jó minőségű Si egykristályokat viszonylag egyszerű előállítani.

Később, az 1980-as évektől kezdve megnőtt az érdeklődés a széles tiltott sávú félvezetők iránt, mivel ezeket az anyagokat kedvező fizikai tulajdonságaik alkalmassá teszik nagyteljesítményű és nagyfrekvenciájú alkalmazásokra, valamint magas hőmérsékleten történő üzemelésre, ahol a működési körülmények által támasztott követelmények túlmutatnak a hagyományos szilícium alapú technológia nyújtotta lehetőségeken.

A szilíciumkarbid (SiC) egyike a legígéretesebb széles tiltott sávú félvezetőknek nagy elektronmozgékonyosságának, telítési elektronsebességének, letörési elektromos térerősségének és jó hővezető képességének köszönhetően [Harris, 1995]. A neutronokra vonatkoztatott kis hatáskeresztmetszete, neutron besugárzás alatti kismértékű felaktiválódása, jó hővezetése, illetve mechanikai és termikus stabilitása lehetővé teszik burkoló-, illetve köpenyanyagként történő felhasználását fissionos atomreaktorokban, de várhatóan a jövő fúziós atomreaktoraiban is.

## Célkitűzések

Félvezető egykristályoknak a konkrét eszközökben történő felhasználását megnehezítő egyik probléma az anyagban jelenlévő kristályhibák kevéssé ismert szerepe. Az egyes hibacentrumok viselkedhetnek töltéshordozó csapdákként, befolyásolhatják a generációs és rekombinációs folyamatokat és a töltéshordozók élettartamát, vagy szórócentrumokként csökkenthetik azok mozgékonyosságát. A kristályhibák már a kristály növesztésekor is jelen vannak, de a félvezető eszközök gyártásánál alkalmazott technológiai lépések – pl. ionimplantáció, elektron besugárzás, vagy maratás – hatására is keletkezhetnek. Az így létrejött hibacentrumok diffundálhatnak, magasabb hőmérsékleten kihőkezelődhetnek, vagy komplex hibákká transzformálódhatnak.

A hibahelyek hatása az eszközök működésére általában kedvezőtlen, de esetenként hasznos is lehet – pl. kis töltéshordozó-élettartamok gyakran szükségesek gyors kapcsolóelemek megvalósításához. Egy másik példa a kompenzált (semi-insulating, SI) félvezető szubsztrátok előállítása – ezt a problémát nem tudnánk áthidalni az anyagban jelen lévő mély nívókat keltő hibacentrumok nélkül. Az egyes hibahelyek mikroelektronikai eszközök működésében betöltött szerepének megértésénél fontos támpont a centrum elektromos és mágneses tulajdonságainak vizsgálata.

A SiC vegyületfélvezető, és kristályszerkezetéből adódóan különböző, ún. inekvivalens rácshelyekkel rendelkezik (ezek száma a 4H-SiC politípusban 2, míg a 6H-SiC politípusban 3), ezzel téve lehetővé az anyagban jelen lévő eltérő tulajdonságú, különböző atomi struktúrájú hibacentrumok nagy számát. Így a kristályhibák vizsgálata komplikált, és

napjainkig a SiC-ban csak néhány hibacentrum egyértelmű azonosítása történt meg különböző elektromos, mágneses és spektroszkópiai vizsgálati módszerek együttes alkalmazásának eredményeként.

Egy másik probléma a SiC esetén az adalékolás, mivel itt – a hagyományos szilícium-technológiával ellentétben – a szennyező donor, illetve akceptor atomok kis diffúziós együtthatói nem teszik lehetővé a termikus diffúzió, mint adalékolási technika alkalmazását [Zetterling, 2002]. A SiC esetén a közepes- és nagy dózisu ionimplantáció az egyetlen alkalmas szelektív adalékolási eljárás. Az ionbombázás káros mellékhatása a kristályhibák keltése; a kialakuló hibastruktúra a bombázó ionok tömegétől és a target fő kristálytani tengelyeihez mért irányától, a besugárzott dózistól, az alkalmazott áramsűrűségtől és a target hőmérsékletétől is függ. Az implantálási folyamat, illetve az azt követő hőkezelés alatt a kristályhibák és az adalék atomok közötti kölcsönhatások az adalékok semlegesítését és ezen keresztül az elektromos tulajdonságok romlását eredményezhetik [D. Åberg *et al.*, 2001; U. Gerstmann *et al.*, 2003]. Ebben az esetben a SiC nagy termikus stabilitása hátrányos, mivel a besugárzás létrehozhat olyan stabil hibastruktúrákat, amelyeknek az utólagos kihőkezelése nagyon nehéz, vagy lehetetlen. Mivel a SiC szobahőmérsékleten amorfizálható [Jiang *et al.*, 2004] a kristályos-amorf fázisátmenet folyamatának megértése és azt követően az amorf fázis hőkezelés útján történő visszakristályosításának lehetősége a vizsgálatok középpontjában áll. A fő cél rögzített iondózis – azaz adalékkoncentráció – mellett minimalizálni az egyidejűleg létrehozott kristályhibák mennyiségét.

A Ph.D. értekezésem célja hozzájárulni a SiC-ban elektron besugárzás által keltett ponthiba centrumok azonosításának és jellemzésének folyamatához, illetve a nitrogén és alumínium ionok (mint a SiC donor, illetve akceptor típusú adalékolói) implantációja által a SiC-ban keltett rácskárosodás kialakulásának megértéséhez.

## Kísérleti módszerek

A Ph.D. értekezésem két fő részből áll. Az első részben olyan ponthiba centrumok elektromos és mágneses tulajdonságait, valamint termikus stabilitását vizsgáltam, amelyek a SiC-ban elektron besugárzás hatására keletkező szilícium vakancia, szén vakancia, illetve szén vakancia-szén antisite típusú hibákkal hozhatók összefüggésbe. Az alkalmazott vizsgálati módszerek a folytonos üzemmódú X-sáv (9.5 GHz) elektron paramágneses rezonancia (EPR), illetve a fénygerjesztéssel indukált EPR (photo-EPR).

Az EPR technika alkalmas a ponthiba centrumok spinállapotának és elektronszerkezetének vizsgálatára, szimmetria tulajdonságaik analízisére, és a centrumokat körülvevő szomszédos atomok kémiai azonosítására. Ezen felül a photo-EPR technika lehetővé teszi egy adott hibacentrum elektromos töltésállapotának megváltoztatását (elektronoknak a hibacentrumról való leszakítását, illetve többlet elektronok hibahelyhez kötését) külső fényforrásból történő gerjesztés hatására. A módszer bizonyos esetekben a ponthibák gerjesztett elektronállapotainak a vizsgálatára is alkalmas. Ezeknek a vizsgálatoknak a nagy részét Linköpingben, Svédországban a Linköpingi Egyetem Fizikai és Méréstechnikai Intézeténél (LiU, IFM) végeztem.

Az értekezés második részében az ionimplantáció által keltett rácskárosodás mélységbeli eloszlását vizsgálom a besugárzott Al és N ion dózis, illetve a besugárzás iránya és a SiC <0001> kristálytani tengelye által bezárt szög függvényében. Ilyen jellegű vizsgálatokra széles körben alkalmazott kísérleti technika az ún. csatornahatással kombinált

Rutherford visszaszórási spektrometria (Rutherford Backscattering Spectrometry in combination with Channeling, RBS/C). Az RBS/C méréseket általában  $^4\text{He}^+$  analízáló ionnyalábbal végzik az 1-2 MeV energiatarományban. Ebben az esetben a target atomokról történő ion visszaszórás Rutherford hatáskeresztmetszettel jellemezhető, amely kb. hétszer kisebb a  $^4\text{He}^+(\text{C}, \text{C})^4\text{He}^+$  visszaszórási reakcióra, mint a  $^4\text{He}^+(\text{Si}, \text{Si})^4\text{He}^+$  visszaszórásra. Emiatt az RBS/C technikával – a szénre nézve kisebb érzékenység és a jelentős zavaró Si háttér miatt – általában csak a szilíciumkarbid Si alrácát vizsgálják.

A Ph.D. munkámban az RBS/C technika egy speciális esetét alkalmaztam, 3.5 MeV energiájú  $^4\text{He}^+$  analízáló ionnyalábbal történő csatornahatással kombinált ion visszaszórásos spektrometriát (Backscattering Spectrometry in combination with Channeling, BS/C). Itt a magasabb  $^4\text{He}^+$  ionenergia miatt egy néhány 100 keV széles nukleáris rezonancia jelenik meg a  $^4\text{He}^+(\text{C}, \text{C})^4\text{He}^+$  reakció hatáskeresztmetszetében, amelynek nagysága kb. hatszorosa a Rutherford értéknek. Eközben a  $^4\text{He}^+(\text{Si}, \text{Si})^4\text{He}^+$  reakció továbbra is Rutherford hatáskeresztmetszettel rendelkezik. A módszer előnye, hogy egyszerre kaphatunk információt a szilíciumkarbid Si és C alrácának rácskárosodásról jó érzékenység és mélységfelbontás mellett.

Az ionimplantációt és a BS/C vizsgálatokat a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében (MTA MFA), illetve Részecske és Magfizikai Kutatóintézetében (MTA RMKI) végeztük.

## Új tudományos eredmények

1. Meghatároztam az EI5 és EI6 paramágneses hibacentrumok elektron paramágneses rezonancia (EPR) intenzitásának hőmérsékletfüggését elektronokkal besugárzott 4H SiC-ban. Az EI5 centrum korábbi kísérletek alapján a köbös rácshelyen ülő pozitív töltésű szénvakanciaként került azonosításra, míg az EI6 centrum megjelenését a pozitív töltésű Si antisite hibához rendelték. A centrumok hiperfinom (HF) szatellitjeinek EPR intenzitását követtem a 250°C–1600°C hőkezelési tartományban, külső megvilágítás mellett, illetve megvilágítás nélkül.
  - a) Az EI5 centrummal kapcsolatban kimutattam, hogy a vakancia töltésállapot megváltozása és a vakancia koncentráció hőkezelés hatására bekövetkező csökkenése egyaránt hatással van az EPR jel intenzitására. A centrum HF vonalainak 1350°C-on történt hőkezelés utáni egyértelmű azonosításával kimutattam, hogy a szén vakancia termikus stabilitása jóval nagyobb a korábbi kísérletekben találtaknál [1].
  - b) Kimutattam, hogy az EI6 centrum hőkezelési tulajdonságai hasonlóak az EI5 centruméhoz, mind külső megvilágítást alkalmazva, mind anélkül. Ez alapján az EI6 centrum megjelenését – ellentétben a korábbi azonosítással – a hexagonális rácshelyen ülő pozitív töltésű szénvakanciához rendelttem [1].
2. Azonosítottam a P6/P7 paramágneses hibacentrumokat elektronokkal besugárzott 4H-SiC-ban. Négy különálló  $S = 1$  spinállapotú centrumot találtam, ezek közül kettő (P6a,b)  $C_{3v}$  szimmetriával, kettő (P7a,b) pedig  $C_{1h}$  szimmetriával rendelkezik. A különböző centrumokhoz tartozó g-tenzor és a zérustér D-tenzor paraméterek, a szimmetria, és a spektrumok száma illetve az inekvivalens rácshelyek száma közötti egyezés eredményeképpen a P6a,b centrumokat a köbös, illetve hexagonális rácshelyen ülő és a  $\langle 0001 \rangle$  kristálytani iránnyal párhuzamosan orientált szén vakancia-szén antisite

( $V_C-C_{Si}$ ) párokként azonosítottam. A P7a,b centrumokat ugyanazon  $V_C-C_{Si}$  párhibáknak a  $\langle 0001 \rangle$  kristálytani irányhoz képest  $70^\circ$ -ban orientált (azaz a 3 fennmaradó tetraéderezes kötés irányába mutató) konfigurációjával magyaráztam.

Kísérleteim azt mutatták, hogy a P6/P7 centrumok viselkedése besugárzott anyagban hőkezelés hatására összhangban van az elméleti modellekkel, amelyek magasabb hőmérsékleten a Si vakancia  $V_C-C_{Si}$  párra történő transzformációját mutatják [2].

3. Azonosítottam a  $T_{V2a}$  paramágneses hibacentrumot magas hőmérsékletű kémiai gőzfázisú leválasztással (HTCVD) növesztett, kompenzált 4H-SiC (SI-SiC) szeletekben. Ugyanazon mintákban a negatív töltésű Si vakancia ( $V_{Si}^-$ ) EPR spektruma nem jelent meg. Az általam vizsgált mintákban a  $T_{V2a}$  spektrum csak két EPR vonalat tartalmazott. Ez a körülmény, korábbi Zeeman vizsgálatok eredményével együtt, amelyek a  $T_{V2a}$  centrumhoz rendelhető fotolumineszcencia (PL) átmenet felhasadásának hiányát mutatták külső mágneses térben, a centrum  $S = 1$  spin triplett alapállapot modelljét támasztja alá. Fénygerjesztéssel indukált EPR kísérletekből arra a következtetésre jutottam, hogy a centrum gerjesztett állapota  $S = 0$  spin szingulett állapot. Ezt a modellt felhasználtam a centrumhoz rendelhető PL átmenet leírására, amely szerint a megengedett sugárzásos átmenet a gerjesztett állapot szingulett nívójáról az alapállapot  $|1,0\rangle$  nívójára történik [3].
4.
  - a) Kimutattam, hogy 4H-SiC-ban a 3.5 MeV energiájú He ionok által a csatornahatással kombinált ion visszaszórásos analízis (BS/C) mérések közben okozott rácskárosodás egy három lépéses folyamatban alakul ki: (1) kis dózisoknál nem figyelhető meg kimutatható változás, (2) ezt követően egy effektív dózistartományban a rácskárosodás mértéke arányosan nő a dózissal, (3) végül telítésbe megy és nem következik be teljes amorfizáció. A (3) telítési szakasz jelenléte azzal magyarázható, hogy a He ionok a felület közelében nagyon ritka ütközési kaszkádokat keltenek. Megmutattam, hogy a roncsolási folyamat (2) szakaszában a roncsolás mértéke függ a nyaláb áramsűrűségétől is. Ebből becslést adtam a 3.5 MeV He BS/C méréseknél a SiC mintákon használandó optimális mérődózisra és áramsűrűsége [4].
  - b) Kimutattam, hogy 6H-SiC-ban a He ionokra vonatkoztatott átlagos elektronos fékeződés a  $\langle 0001 \rangle$  kristálytani irányban 20 %-kal kisebb a random irányban mérhetőnél. Ezzel növeltem a BS/C spektrumok kiértékelésénél az energiaskála mélységskálává történő transzformálásának pontosságát [8].
5. A 3.5 MeV He BS/C technika alkalmazásával meghatároztam a szobahőmérsékleten történő, 200 keV energiájú, random irányú, relatíve kis dózisú  $Al^+$  implantáció által 6H-SiC-ban keltett rácskárosodás mélységbeli eloszlását, mind a Si, mind a C alrácson. A relatív roncsoltság,  $n_D$  értéke minden esetben a 0.2 érték alatt maradt. A mért roncsoltsági profilokat a SRIM program által számított vakancia profilokkal összehasonlítva az implantált dózis függvényében meghatároztam az effektív kimozdítási küszöbenergiákat ( $E_d$ ), a Si és a C alrácson. Azt találtam, hogy szénre  $E_d$  értéke 14.8 eV és 19.3 eV, míg szilíciumra 24.8 eV és 26.8 eV közé esik [5].

6. A 3.5 MeV He BS/C technika alkalmazásával meghatároztam a szobahőmérsékleten 500 keV energiájú  $N^+$  ionok implantálásával 6H SiC-ban keltett rácskárosodás mélységbeli eloszlását az implantált dózis, illetve a bombázó ionok haladási iránya és a kristálytani  $\langle 0001 \rangle$  tengely által bezárt szög függvényében.
- Kimutattam, hogy a keletkező kristályhibák mennyisége jelentősen lecsökkenthető a csatorna implantáció segítségével, különösen kis dózisok esetén. Azt találtam, hogy a  $\langle 0001 \rangle$  kristálytani tengelyhez képest már  $4^\circ$  döntési szög is elegendő a random irányúval ekvivalens roncsolási körülmények eléréséhez [6-8].
  - A BS/C analízis, mechanikus lépcsőmagasságmérés, Crystal-TRIM szimulációk, és a szobahőmérséklet és  $800^\circ C$  között végzett hőkezelések összevetéséből megmutattam, hogy a rácshibák kialakulása jól leírható a direkt-impakt, defekt-stimulált (D-I/D-S) amorfizációs modellel. A rácskárosodás,  $n_D < 0.2$  relatív roncsoltságok esetén főként ponthibák jelenlétének köszönhető, míg  $n_D > 0.2$  esetén az ionnyaláb által közvetlenül, illetve közvetve amorfizált régiók adják a fő járulékot. A roncsolási folyamat előrehaladásának üteme a Si és C target atomoknak a nukleáris ütközésekben közvetlenül leadott energia nagyságától függ a bombázó ionok valamennyi vizsgált belövési irányának (a  $\langle 0001 \rangle$  kristálytani tengelyhez mért szögének) esetében [8].

## Az eredmények hasznosítása

Az EPR vizsgálataimból levont következtetések előrelépést jelentenek a SiC-ban elektron besugárzás által keltett ponthibák azonosításában, keletkezésük és kölcsönhatásaik megértésében. Az eredmények közelebb visznek az ionimplantáció alkalmazásával előállított nagyteljesítményű dióda és tranzisztor struktúrák kontrollált gyártásának megvalósításához.

Az ion visszaszórásos analízissel kapott eredményeim az implantált adalékatomok és az ion besugárzás által keltett rácskárosodás mélységbeli eloszlásának tervezésében nyújtanak segítséget SiC eszközstruktúrák kialakításánál.

A fenti kutatás az erlangeni Fraunhofer Intézet Integrált Rendszerek és Eszközök csoportjával együttműködésben zajlik.

## Publikációk

### A doktori értekezés tézispontjaihoz kapcsolódó publikációk:

- [1] **Z. Zolnai**, N.T. Son, C. Hallin, and E. Janzén: Annealing behaviour of the carbon vacancy in electron-irradiated 4H-SiC, Journal of Applied Physics 96 (2004) p. 2406
- [2] **Z. Zolnai**, N. T. Son, B. Magnusson, C. Hallin, and E. Janzén: Annealing behaviour of vacancy- and antisite-related defects in electron-irradiated 4H-SiC, Materials Science Forum 457-460 (2004) p. 473
- [3] N.T. Son, **Z. Zolnai**, and E. Janzén: Silicon vacancy related  $T_{V2a}$  center in 4H-SiC, Physical Review B 68 (2003) p. 205211

- [4] N.Q.Khánh, **Z. Zolnai**, T. Lohner, L. Tóth, L. Dobos and J. Gyulai: He ion Beam Density Effect on Damage Induced in SiC During Rutherford Backscattering Measurement, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 161-163 (2000) p. 424
- [5] **Z. Zolnai**, N.Q. Khánh, E. Szilágyi, E. Kótai, A. Ster, M. Posselt, T. Lohner, and J. Gyulai: Investigation of Ion Implantation Induced Damage in the Carbon and Silicon Sublattices of 6H-SiC, Diamond and Related Materials 11 (2002) p. 1239
- [6] **Z. Zolnai**, N.Q. Khánh, T. Lohner, A. Ster, E. Kótai, I. Vickridge, and J. Gyulai: Damage Distributions Induced by Channeling Implantation of Nitrogen into 6H Silicon Carbide, Materials Science Forum 433-436 (2003) p. 645
- [7] **Z. Zolnai**, A. Ster, N.Q. Khánh, E. Kótai, M. Posselt, G. Battistig, T. Lohner, and J. Gyulai: Ion Beam Analysis and Computer Simulation of Damage Accumulation in Nitrogen Implanted 6H-SiC: Effects of Channeling, Materials Science Forum 483-485 (2005) p. 637
- [8] **Z. Zolnai**, A. Ster, N.Q. Khánh, E. Kótai, M. Posselt, G. Battistig, T. Lohner, and J. Gyulai: Influence of crystallographic orientation and Ion Fluence on Damage Accumulation in Nitrogen Implanted 6H-SiC, manuscript for Journal of Applied Physics

## **Egyéb publikációk:**

### **Tudományos folyóirat cikkek:**

- [9] T. Lohner, N.Q. Khánh, **Zs. Zolnai**: Spectroellipsometric Characterization of Ion Implanted Semiconductors and Ellipsometry, acta physica slovacica 48 (1998) p. 441
- [10] E. Szilágyi, N.Q. Khánh, Z.E. Horváth, T. Lohner, G. Battisig, **Z. Zolnai**, E. Kótai and J. Gyulai: Ion Bombardment Induced Damage in Silicon Carbide Studied by Ion Beam Analytical Methods, Materials Science Forum 353-356 (2001) p. 271
- [11] P. Petrik, N. Q. Khánh, Z. E. Horváth, **Z. Zolnai**, I. Bársony, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, C. Schmidt, C. Schneider and H. Ryssel: Characterization of  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  films using spectroscopic ellipsometry, Rutherford backscattering spectrometry and X-ray diffraction, Journal of Non-Crystalline Solids 303 (2002) p. 179
- [12] P. Petrik, N.Q. Khánh, Z.E. Horváth, **Z. Zolnai**, I. Bársony, T. Lohner, M.Fried, J. Gyulai, C. Schmidt, C. Schneider, H. Ryssel: Non-Destructive Characterization of  $SrBi_2Ta_2O_9$  films, E-MRS Spring Meeting 2002, June 18-21, 2002, Strasbourg, France, Materials Science in Semiconductor Processing 5 (2002) p. 141
- [13] J. Balogh , I. Vincze, D. Kaptás, T. Kemény, T. Pusztai, L. F. Kiss, E. Szilágyi, **Z. Zolnai**, I. Kézsmárki, A. Halbritter, G. Mihály: Interface Magnetoresistance of Fe/Ag Multilayers, physica status solidi (a) 189 (2002) p. 621
- [14] D. Gogova, H. Larsson, R. Yakimova, **Z. Zolnai**, I. Ivanov, B. Monemar: Fast growth of high quality GaN, physica status solidi (a) 200 (2003) p. 13

- [15] N.T. Son, B. Magnusson, **Z. Zolnai**, A. Ellison, and E. Janzén: Defects in semi-insulating SiC substrates, *Materials Science Forum* 433-436 (2003) p. 45
- [16] E. Janzén, I. G. Ivanov, N. T. Son, B. Magnusson, **Z. Zolnai**, A. Henry, J. P. Bergman, L. Storasta and F. Carlsson: Defects in SiC, *Physica B* 334-342 (2003) p. 15
- [17] N.T. Son, B. Magnusson, **Z. Zolnai**, A. Ellison, and E. Janzén: Defects in high-purity semi-insulating SiC, *Materials Science Forum* 457-460 (2004) p. 37

### **Konferencia cikkek:**

- [18] **Zolnai Zsolt**: Az MFA kutatási területei: Implantált SiC minták vizsgálata ionsugaras analízissel. Talk at the "Tavaszi szél 2000" meeting for young scientists and Ph.D. students ( Apr 15, 2000, Szent István University, Gödöllő, Hungary), and in Abstract Book of the Conference
- [19] **Z. Zolnai**, N.Q. Khánh, E. Szilágyi, Z.E. Horváth, and T. Lohner: Native Oxide and Ion Implantation Damaged Layers on Silicon Carbide Studied by Ion Beam Analysis and Ellipsometry, Proc. " XV International Conference for Physics Students ICPS 2000" (Aug 4-11, 2000, Zadar, Croatia), <http://fizika.org/icps2000/sci/proc.html>
- [20] M. Serényi, Á. Nemcsics, J. Betko, **Zs. Zolnai**, N. Q. Khánh, Zs. J. Horváth: Sputtered a-SiGe:H layers for solar cell purposes, Workshop on Solid State Surfaces and Interfaces II, SSSI-II, (2000 June 20-22, Bratislava, Slovakia) Book of Extended Abstracts p. 65
- [21] E. Szilágyi, E. Kótai, N.Q. Khánh, **Z. Zolnai**, G. Battistig, T.Lohner and J. Gyulai: Ion Implantation Induced Damage in Silicon Carbide Studied by Non-Rutherford Elastic Backscattering, Proc. 13<sup>th</sup> International Conference on Ion Implantation Technology, (Sept 17-22, 2000, Alpbach, Austria), IEEE (2001) p. 131
- [22] N.T. Son, B. Magnusson, **Z. Zolnai**, A. Ellison, and E. Janzén: Magnetic resonance of large-area semi-insulating SiC substrates, Proc. of the American Physical Society Meeting (Austin, Texas, USA; March 3-7, 2003) *Bulletin of The American Physical Society Meeting* **48** (2003) p. 1322
- [23] Zs. J.Horváth, M. Serényi, M. Ádám, B. Pődör, V. Rakovics, P. Turmezei, **Z. Zolnai**, I. Szabó, N. Q. Khánh: Vertical electrical transport in sputtered Al/a-SiGe/c-Si structures, 10th Joint Vacuum Conference, Sept. 28–Oct. 2, 2004, Portoroz, Slovenia, Program and Book of Abstracts p. 123
- [24] Zs. J.Horváth, M. Serényi, M. Ádám, I. Szabó, V. Rakovics, P. Turmezei, **Z. Zolnai**, N. Q. Khánh: Electrical behaviour of sputtered Al/SiGe/Si structures, Solid State Surfaces and Interfaces IV, Nov. 8–11, 2004. Smolenice, Slovakia, Abstract Book p.16

### **Független hivatkozások:**

A 2005. július 8-ig regisztrált független ismert hivatkozások száma a fenti publikációkra 18 volt.



## **Irodalomjegyzék:**

Åberg, D., A. Hallén, P. Pellegrino, and B. G. Svensson, *Applied Physics Letters* 78 (2001) 2908.

Gerstmann, U., E. Rauls, Th. Frauenheim, and H. Overhof, *Physical Review B* 67 (2003) 205202.

Harris, G. L., ed., *Properties of Silicon Carbide*, EMIS Datareviews Series No. 13, 1995

Jiang, W., C. M. Wang, W. J. Weber, M. H. Engelhard, and L. V. Saraf, *J. Appl. Phys* 95 (2004) 4687.

Zetterling, C.-M., ed., *Process Technology for Silicon Carbide Devices*, EMIS Processing Series No. 2, 2002