

Határfelületi jelenségek félvezetőkben

MTA Doktori értekezés tézisei

Battistig Gábor

**Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpont
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet**



Budapest

2016

Előzmények

A mikroelektronika az elmúlt pár évtizedben gyökeresen megváltoztatta életünket, mindennapjaink minden percében jelen van valamilyen formában, jelentősége és hatása folyamatosan növekszik. Az általánosan használt mikrotechnológia kifejezés mindazokra a gyártási folyamatokra vonatkozik, ahol a „munkadarab” felületi, felületközeli elektromos (és napjainkban már mechanikai, optikai, biológiai, kémiai, stb.) tulajdonságait lehet tudatosan, előre tervezetten, reprodukálhatóan megváltoztatni, akár atomi szinten is. A félvezető ipar kívánalmainak megfelelően fejlődő mikrotechnológia a fizikusok, vegyészek, mérnökök, anyagtechnológusok, gépészek és még számtalan diszciplína képviselői együttes munkájának eredménye.

A mikroelektronika fejlődése két irányból is ösztönözte a különféle anyagvizsgálati módszerek és technikák igen gyors fejlődését. Egyrészt a technológia fejlődése megkívánja az egyre pontosabb, nagyobb érzékenységű módszerek alkalmazását, új eljárások bevezetését az új anyagok, szerkezetek és tulajdonságok vizsgálatára. Másrészt a mikroelektronika, ezen belül is a számítógépek hihetetlen gyors fejlődése olyan számítási, szabályozási és vezérlési kapacitásokat hozott létre, amelyekkel már igen bonyolult folyamatok, nagy érzékenységű szabályozása is megvalósítható.

A mikrotechnológia azonban már régen túlnőtt a mikroelektronika viszonylag szűk világán. Az alapvetően a szilícium alapú integrált áramkörök gyártásához kifejlesztett módszerek az ipar sok egyéb területén is megjelentek és váltak meghatározóvá. A különféle mechanikai alkatrészek felületkezelése, illetve kemény, kopásálló bevonatok készítése ma már mindennapos. A vákuumporlasztással előállított TiN bevonatok szerszámokon és pl. csavarokon széles körben megtalálhatók. Ezeket a módszereket az autógyártásban is alkalmazzák többek között a dugattyúk palástjának és a hengerek belső felületének kopásállóvá tételében.

Eddigi tudományos munkáim szorosan kapcsolódtak a mikroelektronikai technológiákhoz és azok vizsgálati módszereihez. Fő témáim főleg Si és SiC félvezetők adalékolására, amorf és kristályos anyagok optikai vagy mágneses tulajdonságainak megváltoztatására az ion implantáció tanulmányozása, valamint a különféle félvezetők oxidációjakor lejátszódó atomi

transzport folyamatok vizsgálata voltak. Az anyagvizsgálati eljárások közül az ionsugaras analitikai módszereket nemcsak alkalmaztam, hanem új vizsgálati metodikákat is kifejlesztettem főleg a nagyon vékony, felületközei rétegek nagy mélységi felbontóképességgel való vizsgálatára. Fontos feladatombnak tekintettem a technológiai eljárások anyag- és tulajdonság-módosító hatásainak kutatását és megértését, illetve a kutató-fejlesztő munka során felmerülő olyan szerkezetek, rétegek, eszközök előállítását, amelyek az előre elképzelt tulajdonságokkal, funkciókkal rendelkeznek. Aktívan részt veszek MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) eszközök, érzékelők fejlesztésében és megvalósításában. Az elmúlt időszakban a 3D erőmérők, a termooszlop alapú több száz GHz tartományban érzékeny sugárzásmérők és a pellisztor típusú gázérezékelők kutatás-fejlesztése a legfontosabbak. Munkáimban jelentősen támaszkodom az MFA-ban működő, Magyarországon egyedülálló Si CMOS mikrotechnológiai sorra, az MFA-ban rendelkezésre álló anyagvizsgálati módszerekre, valamint a Wigner FK RMI-ben üzemelő 5 MV-os Van de Graaff iongyorsítóra. Az évek alatt sok hasznos kooperáció alakult ki itthon és külföldön különböző laborokkal, ezek közül az itt bemutatott munkáimban a legfontosabbak a Wigner FK SZFI Infravörös és Raman-spektroszkópia laboratóriumával és az Institut des NanoSciences de Paris ionsugaras analitikai laborjával közösen végzett munkáim.

Dolgozatomban egy, a nagysűrűségű, kis vonalszélességű szilícium integrált áramkörti technológiában alkalmazható újszerű tisztítási, felületkezelési módszer kidolgozásáról, a szilíciumkarbid egykristály ionsugaras adalékolásának egy aspektusáról, a szilíciumkarbid nanoszemcsék SiO_2/Si határfelületen történő előállításával, vizsgálatával és lehetséges alkalmazásuk néhány kérdéséről számolok be.

A kutatás tárgya és célkitűzései

A mai nagyintegráltságú félvezető eszközök gyártástechnológiájában központi kérdés a kapuelektrodát a félvezetőtől elszigetelő dielektrikum réteg megfelelő kialakítása. A jellemző méretek folyamatos csökkenése miatt új anyagokat, nagy dielektromos állandójú szigetelőket és új eljárásokat kell kidolgozni és alkalmazni. A kapu dielektrikum kialakításának egyik kritikus lépése a rétegleválasztás előtt a Si felület kémiai tisztítása. A különféle eljárások mindegyikében azonos, hogy a tisztításhoz vizet alkalmaz, ezáltal a művelet után egy nagyon

reaktív, hidrogénnel borított Si felület marad hátra. Ez a felület időben nem stabil, viszonylag rövid időn belül megkezdődik itt az oxidképződés. Ezért folyamatos kutatómunka tárgya a kémiai tisztított felület passziválása és a spontán oxidképződés megakadályozása. Felmerült az az ötlet, hogy, ha a kémiai tisztítás során a felületet hidrogén helyett deutériummal (D) borítjuk, akkor egy stabilabb felületet kell kapnunk, mivel a D-Si kötéserőssége nagyobb, mint a H-Si kötésé. A kémiai tisztítási kísérleteimben ezért nehézvízzel (D_2O) hígított oldatokat használtam. A kooperációban végzett vizsgálatok igazolták, hogy a nehézvízes kezelés után lassabban indul meg a spontán oxidáció és az így kezelt Si felületre a sztöchiometrikus összetételt jobban megközelítő, tömörebb Si_3N_4 dielektrikum réteg növeszthető.

A félvezető ipar folyamatosan keresi az új anyagokat és áramkörüi vagy technológiai megoldásokat speciális funkciókat megvalósító eszközök sorozatgyártásához. A félvezető tulajdonságú szilícium karbid (SiC) a leggyakrabban alkalmazott félvezető anyagokkal szemben számos előnnyel rendelkezik: nagy tiltott sáv szélesség, nagy hővezetőképesség, nagy átütési szilárdság és magas töltéshordozó mozgékonyosság jellemzi. Ezek a tulajdonságok teszik a SiC-ot attraktívvá nagy teljesítményű, magas hőmérsékletű és nagyfrekvenciás eszköz-alkalmazásokban.

Technológiai szempontból a SiC nem könnyen kezelhető anyag, már az egykristály formában történő előállítása is nagy nehézséget jelent. A SiC eszközökben is szükség van a vezetőképesség lokális megváltoztatására. A diffúziós adalékolás nem jöhet számításba, mert ebben a kristályban az adalékalékanyagok diffúziója még nagyon magas ($> 1200^\circ C$) hőmérsékleten is gyakorlatilag elhanyagolható. Az ion implantáció az egyetlen lehetséges adalékolási módszer, mely alkalmazásakor szintén jelentős problémák merülnek fel.

Az ion implantáció során a félvezető kristály felületközeli tartományába nagy energiával bejuttatott adalékatomok roncsolják a kristály szerkezetét, rácskárosodást okoznak, ezzel jelentősen rontják a félvezető tulajdonságokat. Az implantációt követő magashőmérsékletű hőkezelés során két folyamat játszódhat le, egyrészt a rácskárosodás csökken, vagy teljesen helyreáll az eredeti kristálystruktúra, másrészt az adalékatomok rácshelyekre, kötésbe kerülnek és ezzel elektromosan aktívvá válnak.

A jelen dolgozatomban bemutatom azokat a kutatási eredményeimet, amelyeket a 6H-SiC egykristály ion implantációs adalékolása miatt fellépő rácskárosodás vizsgálata során értem

el. A hexagonális kristályszerkezet már viszonylag kis dózissal ($\approx 10^{14}$ ion/cm²) implantációval is jelentősen roncsolódik, a roncsolt réteg részben vagy egészben megmarad az implantációt követő hőkezelés során is. Fontos eredményem annak kísérleti igazolása, hogy a SiC felületközeli rétegében az ion implantáció és a hőkezelés során lejátszódó folyamatok teljes megértéséhez több, esetleg egymásnak ellentmondó eredményt szolgáltatató komplementer anyagvizsgálati módszert kell alkalmazni és eredményeiket értelmezni. Az ion implantáció során nemcsak a bejuttatott adalékatomok száma – dózis, de az időegység alatt a felületbe csapódó ionok száma – ion-áramsűrűség is meghatározó kristály-hibaszerkezet kialakulásában. A hőkezelés során csak nagyon kis dózisok és áramsűrűségek esetében áll helyre a hosszútávú rend, az eredeti kristályszerkezet, nagyobb roncsoltság esetében csak rövidtávú rend tud létrejönni, ezért köbös egykristályos szemcsék, nagy diszlokáció-sűrűségű ikerkristályok alakulnak ki.

A SiC egy nagyon stabil, jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyag. Előnye még biokompatibilitása. Nagyon kis szemcseméretűk esetében a kvantumbezártság jelensége miatt a sávszerkezete torzul, fotolumineszcenciát tapasztalhatunk. A kisméretű, 5-10 nm tartományba eső SiC nanoszemcsék előállítás kritikus feladat. Kísérleteinkben a SiO₂-dal borított egykristályos Si szeleten magashőmérsékletű CO-ban történő hőkezelés során a Si határfelületen SiC nanoszemcsék keletkeznek, melyek jellemző mérete a 20-50 nm tartományba esik. A lejátszódó atomi transzport folyamatok megértésére izotóp-jelöléses kísérleteket végeztem, amivel sikerült a meghatározó anyagtranszport mechanizmust feltárni. A SiC nanoszemcsék alakja a hordozó Si egykristály orientációjától függ. A SiC-Si határfelület atomosan tiszta, nem alakulnak ki makroszkópikus hibastruktúrák.

Új tudományos eredmények, tézisek

Szilícium felületének passziválása deutériummal

A Si MOS tranzisztorok működése nagyban függ a kapulektróda alatt kialakított igen vékony szigetelő réteg tulajdonságaitól, a szigetelőben és a szigetelő/Si határfelületen képződő hibák fajtáitól és mennyiségétől. A vékony dielektrikum réteg kialakítása előtti kémiai tisztítási folyamat döntően meghatározza a később növesztett szigetelő réteg elektromos

tulajdonságait. Kísérleteimben a Si tisztítására természetes víz helyett nehézvizet (D_2O) használtam és vizsgáltam a deutérium-passzívált felület időbeli stabilitását, összehasonlítottam a H_2O és D_2O kezelés után kialakuló vékony szilícium nitrid réteg összetételeit.

- A/1 Kidolgoztam egy módszert a szilícium szelet folyadék- és gőzfázisban történő tisztítására, amelyben ioncserélt víz helyett nehézvizet (D_2O) használtam. Megállapítottam, hogy a nehézvizet kezelés után a Si felületet nagyrészt deutérium passzíválja [A1; A2; A3].
- A/2 Megállapítottam, hogy a deutériummal passzívált felület stabilabb. FT-IR és nedvesítési szög mérésekkel kimutattam, hogy a hidrogénnel passzívált Si felületen már 1-3 órás szobahőmérsékletű tárolás során elindul az oxidáció, a natív oxid képződés, míg a deutériummal passzívált felületen ez a folyamat csak közelítőleg 24 órás tárolás után válik jelentőssé [A1; A4; A5].
- A/3 Megmutattam, hogy a gőzfázisú D passzíválást követő, gyors hőkezelőben, NH_3 közegben ugyanolyan technológiai paraméterekkel végzett nitridálás során eszköztechnológiai szempontból kedvezőbb módon kevesebb oxigén épül be a kialakuló szilícium nitrid rétegbe, mint H_2O -s kezelést követően. 10% NH_3+Ar gázban 50 sec ideig $1000^\circ C$ -on történő kezelés hatására a deutériummal passzívált felületen tömörebb, 3.5 nm, míg a hidrogénnel passzívált felületen 4.35 nm vastag Si_3N_4 réteg alakul ki [A1; A3].

SiC implantációs adalékolásának néhány kérdése

A SiC alapú nagyteljesítményű, nagyfrekvenciás eszközök gyártástechnológiájának alapvető folyamata az ion implantáció. Mivel a SiC esetében az adalékatomok diffúziója még igen magas hőmérsékleten is elhanyagolható, ennek a félvezető anyagnak a lokális adalékolása csak ion implantációval valósítható meg. Munkámban vizsgáltam, hogy az ionbombázás hatására hogyan sérül a SiC kristályszerkezete és mely technológiai paraméterek a meghatározók ebben a folyamatban. A kísérleti mintáimat különféle nagy mélységfelbontású anyagvizsgálati módszerrel tanulmányoztam.

- B/1 Kísérletileg megmutattam, hogy SiC félvezető egykristály akceptor típusú adalékolása 150 keV-es Al ionok implantációjával már a 10^{14} - 10^{15} ion/cm² dózis-tartományban nagyfokú rácskárosodást okoz. A minta felületi rétege elveszti kristályos tulajdonságait, gyakorlatilag amorffá válik. Az implantált ionok által okozott rácskárosodás nem csak az ionok mennyiségétől (dózis, fluxus) hanem az ütközések gyakoriságától (ion-áramsűrűség) is nagymértékben függ - azonos dózissal kisebb mértékű rácskárosodás lépett fel 0.4 μ A/cm² Al ion-áramsűrűséggel, mint > 1 μ A/cm² ion-áramsűrűség esetében. A kialakult rácstroncsoltság a kis áramsűrűséggel implantált SiC minták esetében nagyobb valószínűséggel szüntethető meg 1100°C-os hőkezeléssel [B1 B2; B3].
- B/2 1100°C hőmérsékletű hőkezelés hatására a roncsolt réteg alatt található egykristályos réteg felől szilárdfázisú epitaxiával megindul a kristályszerkezet visszaalakulása. Megmutattam, hogy a 150 keV-es implantáció során, ha az Al adalék dózisa $< 10^{15}$ ion/cm² a felület közelében egy kevésbé károsodott réteg marad, amely szintén mintául szolgál a visszakristályosodáshoz. Az eredeti kristályszerkezet tökéletesen azonban csak nagyon kis, $< 10^{14}$ ion/cm² dózis esetében állítható vissza [B1; B4].
- B/3 Megmutattam, hogy a SiC 150 keV-es Al implantálása után $> 10^{15}$ ion/cm² dózisok esetében a szilárdfázisú epitaxia során nem áll vissza az eredeti (esetemben 6H hexagonális) kristályszerkezet. Az 1100°C-os kezelés során kialakuló eltérő kristályszerkezetű és orientációjú szemcsék sok kiterjedt rétegződési hibát, ikerkristályokat és diszlokációkat tartalmaznak. Az ion implantált SiC kristályrács roncsoltságára, azonos minták esetében is eltérő eredményt adott a csatornahatással kiegészített ion visszaszórás, a spektroszkópiai ellipszometria és az atomi felbontású transzmissziós elektronmikroszkópia. Ennek oka az, hogy az ionsugaras módszer a kristályszerkezetben lévő hosszútávú rendre, a spektroszkópiai ellipszometria viszont

a rövidtávú rendre érzékeny, a nagyfelbontású TEM pedig csak nagyon lokális képet mutat meg a minta egy kis térrészéről. [B1].

Szilícium karbid nanokristályok SiO₂/Si határfelületen

20-50 nm mérettartományba eső egykristályos SiC nanorészecskéket állítottam elő SiO₂/Si határfelületen CO gázban történő magashőmérsékletű hőkezeléssel. Vizsgáltam a folyamat alatt lejátszódó atomi transzportfolyamatokat és a kialakuló nanoszemcsék szerkezetét.

- C/1 Elsőként vizsgáltam izotóp jelöléssel majd izotóppérzékeny ionsugaras analitikai módszerekkel a szénmonoxid SiO₂-n keresztül történő diffúzióját. Az izotóp-dúsított ¹³C¹⁸O gázban végzett kísérletek alapján egyértelműen megállapítottam, hogy a molekula formában a határfelületig diffundált CO ott disszociál, a reaktív C és O a SiO₂/Si határfelületen egymás közelében reagál a hordozó Si atomjaival, ezáltal ott SiC és SiO₂ keletkezik [C1; C2].
- C/2 Megmutattam, hogy a képződő köbös kristályos SiC nanoszemcsék alakja a hordozó Si kristály orientációjától függ. (100)Si hordozón kétfogású szimmetriát mutató, csillag alakú, a Si hordozóhoz atomosan tiszta határfelülettel kapcsolódó nanokristályok fejlődnek ki. (111)Si hordozón a nanokristály alakja háromfogású szimmetriával rendelkezik, míg (110)Si-on hasáb alakú kristályszerkezetű nanoszemcsék nőnek [C3].
- C/3 Elsőként készítettem közel teljes felületi borítottsággal SiC nanokristályos réteget, amely SiC gőzfázisú epitaxiális továbbnövesztéshez mintát adó nukleációs réteggé szolgál. Megmutattam, hogy az epitaxia során ez a réteg megakadályozza a Si kidiffúzióját a hordozó felől, így a polikristályos SiC réteg alatt a Si hordozó üreg- és hibamentes marad.

Eredmények lehetséges hasznosítása

A deutériumos felület-passziválási kísérleteinket a Mattson Thermal Products céggel közösen végeztük. A technológiai berendezéseket gyártó cég alapvetően érdekelt az iparban alkalmazható ígéretes új technológiai eljárások fejlesztésében. A pár nanométer vastagságú szigetelő rétegek tulajdonságait alapvetően befolyásolja a növesztés előtti felülettisztítás

minősége. A kidolgozott új tisztítási eljárás alkalmas tömörebb, kevesebb oxigént tartalmazó Si_3N_4 dielektrikum létrehozására. A nehezen hozzáférhető nehézvíz folyamat közbeni veszteségének minimalizálásával a gőzfázisú marási eljárások is javíthatóak. A költségek várható csökkenésével valószínűsíthető, hogy a mikrotechnológia eszköztárában - speciális alkalmazásokban - megjelenhet a deutériumos passziválás is.

A SiC eszköztechnológiája kulcskérdés működő eszközök sorozatgyártásához. Munkám során a SiC ion implantációs adalékolásakor fellépő rácskárosodások tulajdonságait vizsgáltam. A SiC technológia jelenlegi állása szerint az ion implantáció az okozott rácskárosodás miatt csak korlátozottan alkalmas lokális adalékolására, a gyakorlatban csak a SiC gőzfázisú epitaxiás rétegnövesztése közbeni adalékolását alkalmazzák. Azonban a SiC alapú félvezető eszközök fejlesztésében a megfelelő implantációs technológia kidolgozása a vezetőképesség lokális megváltoztatására még mindig központi feladat. Eredményeim is mutatják, hogy a technológiai folyamat optimalizálása, így az alkalmazott ion-áramsűrűség minimális értéken tartása segít a rácskárosodás minimalizálásában.

A SiC nanokristályok alkalmazása sok területen ígéretes. Kutatások folynak biológiailag aktív bevonattal ellátott SiC szemcsék élő anyagba juttatására és mozgásának, feldúsulási helyeinek fotolumineszcenciás vizsgálatára. A Si felületén kialakítható SiC szemcsés bevonat, a réteg felületének relatív simasága és a nagyméretű kristályszemcsék esélyt adnak további epitaxiás kísérletekhez is: az általunk Si hordozón kialakított SiC polikristályos vékonyréteg megfelelő kiindulási felület és kristályszerkezet a GaN, a fehérfényű LED fényforrások anyagának egykristályos formában történő epitaxiás növesztésekhez. Ezzel kiváltható a drága SiC egykristály hordozó alkalmazása GaN epitaxiás növesztéséhez, olcsóbbá tehető a fehérfényű LED fényforrások gyártása. Együttműködés keretében kísérleteket indítottunk SiC nanorészecskéket tartalmazó Si hordozóra történő GaN epitaxiás rétegek növesztésére és minősítésére.

A mikroméretű elemek felületi passziválása, a környezetnek jobban ellenálló bevonatok készítése, így a SiC nanoszemcsés felületi bevonat alkalmazása a MEMS eszközökben ígéretes területnek látszik. A Si alapú mikroelektronikai technológiákkal kialakított érzékelők, mikromechanikai eszközök sokszor nem ideális körülmények között működnek, veszélyes környezeti hatásoknak, súrlódásnak, nagy hőmérsékleteknek vannak kitéve. A Si felületeken viszonylag egyszerűen, a CMOS technológiával kompatibilis CO-s hőkezeléssel kialakítható,

gyakorlatilag összefüggő, rendkívül vékony (néhányszor tíz nanométer) SiC nanokristályos bevonat nagy keménységű, ellenáll a környezeti hatásoknak, még magasabb hőmérsékleteken stabil. Kutatásainkat ezért ezen a területen is tovább folytatjuk.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [A1] Pap AE, Dücső C, Kamarás K, **Battistig G**, Bársony I,. Heavy Water in Gate Stack Processing. Materials Science Forum 573-574, (2008) 119.
- [A2] Pap AE, **Battistig G**, Ducso Cs, Barsony I, Kamaras K, Nenyei Z, Dietl W, Kirchner C,. Sacrificial Deuterium Passivation For Improved Interface Engineering In Gate Stack Processing. 15th IEEE International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors - RTP2007.
- [A3] Pap AE, Petrik P, Pécz B, **Battistig G**, Bársony I, Szekrényes Zs, Kamarás K, Schay Z and Nényei Zs,. Si surface preparation and passivation by vapor phase of heavy water. RTP2008 Las Vegas, USA (2008) 209.
- [A4] Pap AE, **Battistig G**, Dücső C, Bársony I and Kamaras K, 15th IEEE Int. Conf. on Advanced Thermal Processing of Semiconductors. Catania, Olaszország 2007.
- [A5] Pap AE, Nényei Zs, Kamarás K, **Battistig G**, Bársony I,. Silicon surface preparation and passivation by vapor phase of heavy water. 9th International Symposium on Ultra Clean Processing of Semiconductor Surfaces. Brugge, Belgium, (2008) 138.
- [B1] **Battistig G**, Khanh NQ, Petrik P, Lohner T, Dobos L, Pecz B, Lopez JG, Morilla Y,. A view of the implanted SiC damage by Rutherford backscattering spectroscopy, spectroscopic ellipsometry, and transmission electron microscopy. J. Appl. Phys, 100 (2006) 093507.
- [B2] Petrik P, Szilagyi E, Lohner T, **Battistig G**, Fried M, Dobrik G, Biro LP,. Optical models for ultra-thin oxides on Si-terminated and C-terminated faces of thermally oxidized SiC. J. of Applied Physics 106 (2009) 123506.
- [B3] **Battistig G**, Lopez JG, Morilla Y, Khanh NQ, Lohner T, Petrik P, Ramos AR,. Effect of ion current density on damage in Al ion implanted SiC. Nuclear Instruments & Methods 219 (2004) 652.

- [B4] **Battistig G**, Lopez JG, Khanh NQ, Morilla Y, Respaldiza MA, Szilágyi E,. High sensitivity ion beam analytical method for studying ion implanted SiC. Materials Science Forum 433-436 (2003) 625.
- [C1] Pongracz A, Hoshino Y, D Angelo M, Cavellin CD, Ganem J-J, Trimaille I, **Battistig G**, Josepovits KV, Vickridge I,. Isotopic tracing study of the growth of silicon carbide nanocrystals at the SiO₂/Si interface by CO annealing. J. of Applied Physics 106 (2009) 024302.
- [C2] Cavellin CD, Trimaille I, Ganem JJ, D Angelo M, Vickridge I, Pongracz A, **Battistig G**,. An ¹⁸O study of the interaction between carbon monoxide and dry thermal SiO₂ at 1100°C. J. of Applied Physics 105 (2009) 033501.
- [C3] **Battistig G**. Orientation dependent growth of SiC nanocrystals at the SiO₂/Si interface. Thin Solid Films 520 (2012) 1973.

Az értekezés tárgyköréhez szorosan kapcsolódó egyéb publikációk

1. Szilágyi E, Kótai E, Khánh NQ, Zolnai Z, **Battistig G**, Lohner T, Gyulai J, Ion Implantation Induced Damage in Silicon Carbide Studied by Non-Rutherford Elastic Backscattering, Ryssel H, Frey L, Gyulai J, Glawischnig H (szerk.), Proceedings of the 13th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT 2000). Alpbach, Ausztria, 2000.09.17-2000.09.22.
2. Vickridge I C, Ganem J J, Trimaille I, **Battistig G**, Szilágyi E, Oxydation thermique de 6H SiC (0001) et (000 1) en O₂ ultra-pur: Une étude par traçage avec isotopes stables, Vide-Science Technique et Applications 2000:(298) pp. 488-496. (2000)
3. Vickridge IC, Ganem JJ, **Battistig G**, Szilágyi E, Oxygen isotopic tracing study of the dry thermal oxidation of 6H SiC, Nuclear Instruments & Methods 161-163: pp. 462-466. (2000)
4. Von Bardeleben H J, Cantin J L, Vickridge I, **Battistig G**, Proton-implantation-induced defects in n-type 6H- and 4H-SiC: An electron paramagnetic resonance study, Physical Review B Condensed Matter 62:(15) pp. 10126-10134. (2000)

5. Szilagyi E, Khanh NQ, Horvath Z E, Lohner T, **Battistig G**, Zolnai Z, Kotai E, Gyulai J, Ion bombardment induced damage in silicon carbide studied by ion beam analytical methods. *Materials Science Forum* 353-3: pp. 271-274. (2001)
6. Vickridge IC, Tromson D, Trimaille I, Ganem JJ, Szilagyi E, **Battistig G**, Oxygen isotopic exchange occurring during dry thermal oxidation of 6H SiC. *Nuclear Instruments & Methods* 190: pp. 574-578. (2002)
7. **Battistig G**, Labar JL, Gurban S, Sulyok A, Menyhard M, Vickridge IC, Szilagyi E, Malherbe J, Odendaal Q, Polarity dependent carbon enrichment on 6H-SiC {0001} due to low energy ion bombardment. *Surface Science* 526:(1-2) pp. L133-L136. (2003)
8. Trimaille I, Ganem JJ, Vickridge IC, Rigo S, **Battistig G**, Szilagyi E, Baumvol IJ, Radtke C, Stedile FC, Thermal oxidation of 6H-SiC studied by oxygen isotopic tracing and narrow nuclear resonance profiling, *Nuclear Instruments & Methods* 219-220: pp. 914-918. (2004)
9. Morilla Y, García López J, **Battistig G**, Cantin JL, Cheang-Wong JC, von Bardeleben HJ, Respaldiza MA, RBS-Channeling and EPR Studies of Damage in 2 MeV Al₂⁺-implanted 6H-SiC Substrates. *Materials Science Forum* 483-485: p. 291. (2005)
10. Zolnai Z, Ster A, Khanh NQ, Kotai E, Posselt MH, **Battistig G**, Lohner T, Gyulai J, Ion beam analysis and computer simulation of damage accumulation in nitrogen implanted 6H-SiC: Effects of channeling. *Materials Science Forum* 483: pp. 637-640. (2005)
11. Pongracz A, **Battistig G**, Toth A L, Makkai Z, Ducso C, Josepovits K V, Barsony I, Nucleation of SiC nanocrystals at the Si/SiO₂ interface: Effect of the interface properties. *Journal de Physique IV* 132: pp. 133-136. (2006)
12. Zolnai Z, Ster A, Khanh NQ, **Battistig G**, Lohner T, Gyulai J, Kotai E, Posselt M, Damage Accumulation in Nitrogen Implanted 6h-sic: Dependence on The Direction of Ion Incidence And on The Ion Fluence. *J. of Applied Physics* 101:(2) 023502. (2007)
13. Lopez JG, Morilla Y, Cheang-Wong JC, **Battistig G**, Zolnai Z, Cantin JL, Dynamic annealing study of SiC epilayers implanted with Ni ions at different temperatures. *Nuclear Instruments & Methods* 267:(7) pp. 1097-1100. (2009)
14. Petrik P, Szilagyi E, Lohner T, **Battistig G**, Fried M, Dobrik G, Biró LP, Optical models for ultrathin oxides on Si- and C-terminated faces of thermally oxidized SiC. *J. of Applied Physics* 106:(12) 123506. (2009)

15. Pongrácz A, **Battistig G**, Dücső Cs, Josepovits K V, Deák P, Structural and electronic properties of Si/SiO₂ MOS structures with aligned 3C-SiC nanocrystals in the oxide. *Materials Science & Engineering C-Biomimetic and Supramolecular Systems* 27:(5-8 SPEC. ISS.) pp. 1444-1447. (2007)
 16. Szilagyi E, Petrik P, Lohner T, Koos A, Fried M, **Battistig G**, Oxidation of SiC investigated by ellipsometry and Rutherford backscattering spectrometry. *J. of Applied Physics* 104:(1) p. 014903. (2008)
 17. Lohner T, Zolnai Z, Petrik P, **Battistig G**, Garcia Lopez J, Morilla Y, Koós A, Osváth Z, Fried M, Complex dielectric function of ion implantation amorphized SiC determined by spectroscopic ellipsometry. *Physica Status Solidi C* 5:(5) pp. 1374-1377. (2008)
 18. Pécz B, Stoemenos J, Voelskow M, Skorupa W, Dobos L, Pongrácz A, **Battistig G**, Epitaxial 3C-SiC nanocrystal formation at the SiO₂/Si interface by combined carbon implantation and annealing in CO atmosphere. *J. of Applied Physics* 105:(1) Paper 083508. (2009)
 19. Attolini G, Bosi M, Rossi F, Watts B E, Salviati G, **Battistig G**, Dobos L, Pécz B, SiC epitaxial growth on Si(100) substrates using carbon tetrabromide. *Materials Science Forum* 645-648: pp. 139-142. (2010)
 20. Pécz B, Stoemenos J, Voelskow M, Skorupa W, Dobos L, Pongrcz A, **Battistig G**, Ion implantation enhanced formation of 3C-SiC grains at the SiO₂/Si interface after annealing in CO gas. *Journal of Physics* 209 12045. (2010)
 21. Watts BE, Bosi M, Attolini G, **Battistig G**, Dobos L, Pecz B, CBr₄ as precursor for VPE growth of cubic silicon carbide., *Crystal Research and Technology* 45:(6) pp. 583-588. (2010)
 22. Mizsei J, Pap AE, Gillemot K, **Battistig G**, Effect of deuterium on passivation of Si surfaces. *Applied Surface Science* 256: pp. 5765-5770. (2010)
-