

BÍRÁLÓI VÉLEMÉNY

Battistig Gábor „Határfelületi jelenségek félvezetőkben” című

MTA doktori értekezéséről

Doktori értekezésében Battistig Gábor több mint egy évtized tudományos kutató-fejlesztő munkájának fontosabb eredményeit ismerteti. Témaköre, a határfelületi jelenségek vizsgálata a félvezetőkben, és műszaki célokra való hasznosítása, „örökzöld”. Különösen igaz ez a jelenleg iparilag legszélesebb körben használt szilícium esetében, hiszen a belőle készült eszközökben, elemekben a Si/SiO₂ illetve más Si/oxid, nitrid határfelületek meghatározó szerepet játszanak.

A tematika, amely a Si/SiO₂, SiC gyártástechnológiájában nem teljesen új, de a dolgozat szerzője eddig ismeretlen jelenségeket taglal. Tekintettel a témakör kimondottan fontos ipari alkalmazási jellegére, világszerte kiemelt figyelmet szentelnek ennek. Battistig Gábor kutatómunkájának eredményei méltó helyet foglalnak el a nevezett témakörben ismert kutatások sorában, mert nem csak az említett határfelületeken végbemenő fizikai-kémiai folyamatok elemzését, hanem félvezető technológiai eljárásokat, műszaki megoldásokat és ezeket kísérő mérés-technika fejlesztését is vezeti be, hazai és külföldi magas szintű elismeréssel.

A szerző a négyoldalas előszóban röviden, de lényegre törően és világosan ismerteti a munka kapcsolódását a jelenlegi Si és SiC félvezető technológiákhoz, és ezen túl, az anyagtudományi, nanotechnológiai kutatások élvonalához. A munka sikeréhez szerencsésen hozzájárultak az MTA EK MFA-ban működő (Magyarországon egyetlen) Si CMOS technológiai berendezése, az ugyanitt található sokoldalú anyagvizsgáló eszközök, módszerek, és a szomszédos Wigner RMI-ben üzemelő iongyorsító, valamint az aktív hazai és nemzetközi együttműködések révén elérhető tudományos eszközparkok és szellemi erőforrások.

Az irodalomból, Battistig Gábor publikációs listájából megismerhető és az értekezésében is említett előzmények elemzéséből kiderül, hogy kutatásaiban folyamatosan és sikeresen haladt az anyagtudomány és félvezető fizika-technológia jelen munkájában összefoglalt eredményei eléréséhez, kezdve a porózus szilíciummal az értekezésben vizsgált Si szeletek felületén végbemenő

oxidációs folyamatokig, a szilícium-karbid implantáció által okozott felületi roncsolással egészen az ugyanitt lehetséges SiC nanokristályos szerkezetek kialakulásáig.

Megállapítható, hogy a disszertáció felépítése könnyen áttekinthető, a résztemakörökhöz arányosan tagolt: szilícium passziválása deutériummal – 26 oldal, SiC implantációs adalékolása és a felületi roncsolódás problémái – 24 oldal, SiC nanokristályok képződése SiO_2/Si határfelületen – 33 oldal, záró megjegyzések – 2 oldal, 107 hivatkozás listája – 6 oldal. Részletes köszönetnyilvánításában a szerző kitér a munka egyes fázisainak csapatmunka jellegére, mivel nyilvánvaló, hogy az alkalmazott komplex nagyberendezések működtetése nem egy szakember feladata, viszont a vezető kutató irányítása, részvétele itt is meghatározó.

Külön kiemelem, hogy megítélésem szerint jó megoldás az egyes fejezetek, illetve az azokban feldolgozott problémák összegzésének végére helyezett, egy-egy oldalnyi területet elfoglaló, pontokra felbontott tézisek, amelyek így könnyen összevethetők a fejezetben/problémamegoldásban szereplő adatokkal.

Az értekezés kivitelezése egészében gondos, jó minőségű, ahol szükséges színes képekkel, grafikonokkal kiegészített. Egyes ábrák (elektronmikroszkópos felvételek, pld. 15, 22, 29, 35, 37) kimagaslóan jók és nagymértékben hozzájárulnak a vizsgált fizikai folyamatok, anyagszerkezetek változásainak magyarázatához, megértéséhez. Különben ez az analitikai technika vívmányaira épülő, a folyamatokat atomi szinten szemléltető megközelítés világszerte jellemző a korszerű anyagtudományra, anyagvizsgálati módszerekre és mutatója a kutatások magas színvonalának. Természetesen, az elméleti modellezés és leírások is fontosak az adott témakörben, ahogy arra gyakori hivatkozásokat látunk a munkában (lásd pld. 15. referenciát, valamint saját publikációkat), és amelyeket a szerző is sikeresen alkalmaz. Itt említem meg, hogy a szerző megfelelően hivatkozik a jól válogatott hivatkozási listában szereplő irodalomra, benne található adatokra.

Elírás, gépelési hiba csak elvétve található, melyek közül a legszembeötlőbb a hozzám beérkezett értekezés borítólapján betűhiánnyal leírt szerzői név. A hőkezelésekhez használt berendezés „kályha” vagy „kemence” elnevezése egyaránt megtalálható a magyar szakirodalomban, de az ilyen folyamatokra és eszközökre az angolban használt „oven” szó fordítása „kemence”. Néhányszor előfordul a hivatkozás-sorozat [84,82,83,89] nem növekvő módon való leírása (pld. 67. oldal), ami nem is az időrendi elhelyezést

követi. Szerintem a 11. ábrán sorrendben és tartalomban nem egyeznek az a,b,c,d,e jelölések.

Áttérve az értekezésben felsorolt tudományos és műszaki, mérés-technikai eredményekre, a továbbiakban a három elkülöníthető témakört és a kapcsolódó téziseket értékelem.

Elsősorban szeretném kiemelni a negyedik, szerintem legérdekesebb, terjedelmileg is legnagyobb fejezetben leírt eredményeket, amelyek szemléltetik a SiC nanorészecskék, illetve nanorészecskékből álló rétegek kialakulását SiO₂/Si határfelületen CO gázban történő magashőmérsékletű hőkezeléssel. Ez a fejezet úgyszintén feltárja a szénmonoxid szilíciumdioxidon keresztül történő diffúziójának mechanizmusát, annak izotópzérékeny ionsugaras vizsgálati módszerének kidolgozását, és a gyakorlatilag fontos eredményt, az orientált SiC nanoszemcsék, a továbbiakban nanorétegek előállítását. Itt egy gyakorlatban ígéretes, elektronikai eszközgyártásban (pld. fehér LED) nagyon fontosnak és körszerűnek mondható eljárás alapkutatói és módszertani alapjait látjuk. Ebben a témakörben három PhD disszertáció is született az elmúlt néhány évben, az egyiknek a témavezetője maga Battistig Gábor volt, de minden bizonnyal részt vett a többi kísérletben is, mint ezt a kollégái által, de nélküle írt [84] referencia is mutatja.

Ehhez a fejezethez fűződő megjegyzéseim között megkérdezem, hogyan értelmezi a szerző az „...*O atomok lépésről lépésre történő mozgását a SiO₂ rétegen keresztül a határfelületig.*”, a diffúzió mechanizmusaihoz képest?

Továbbá: a szerintem elég alaposan elemzett oxigén izotópok diffúziójára, kicserélődésére vonatkozó leírásnak kissé ellentmond a 72. oldal vége: „...*a tényleges atomi folyamatok tisztázása, leírása még várat magára*”. Mi lehet a különbség?

Ennek a fejezetnek gyakorlatilag legígéretesebb eredményeként a Si lapka kristályorientációjának és a rajta növekvő SiC nanokristályok orientációja, szerkezete közötti összefüggés megállapítását látom, ami végső soron megalapozza az epitaxiális SiC rétegnövesztés aránylag egyszerű és olcsó technológiáját. *Ez egy nagyon hasznos műszaki eredmény lenne.* Különben is, a nanokristályos SiC, ennek lehető szenzorikai, biomedicinai alkalmazásai még fokozottabban bizonyítják a munkában elért eredmények fontosságát.

Bizonyára, az ismert publikációk alapján, folynak is (iparilag titkosított) hasonló kutatások, amire egy 2015-ben publikált US20150108504A1 szabadalmi bejelentés is utal, amely a SiC/Si határfelületen kialakuló hibákra épít.

Kérdésem: tett-e, van-e szabadalmi bejelentése a szerzőnek az adott témakörben?

A Si félvezető eszközök oxidációs technológiájában alkalmazott, manapság már „klasszikusnak” mondható, heteroepitaxiális rétegnövesztés tisztítási, passziválási problémáinak a megoldására irányulnak a 2. fejezetben leírt kísérletek. Ezek során a H_2O helyett D_2O használatának előnyei lettek bebizonyítva, minek eredményeként az oxidmentes Si felület lényegesen stabilabb és ez javítja a további technológiai folyamatokat.

A technológiai kísérletek során az egyik modellként a porózus szilícium nyert alkalmazást, ami effektív határfelület és a mérések szempontjából szépnek néz ki (11.,12. oldal), de minőségileg más effektusok (kapilláris erők, különböző nedvesítés, mélységprofilok) is szóba jöhetnek a sima (100) vagy (111) Si felületekhez képest. Kétségtelen, hogy a kidolgozott eljárás, annak mechanizmusa hasznos lehet szilícium-nitrid rétegek kialakítására, más ipari alkalmazásra, pld. a MOS FET struktúrák gyártásában. Mivel a kísérletek aránylag régen bebizonyították az eljárás gyakorlati alkalmazhatóságát, *kérdésem a következő: ismert-e jelenleg nyílt információ az eljárás alkalmazásáról?*

Ugyancsak érdekes és műszakilag fontos kérdés megoldásával foglalkozik a szerző az értekezés harmadik fejezetében: a SiC implantációjával, ami egy kivitelezésben egyszerű, de a jó minőség elérése szempontjából nehéz technológiai eljárás. A kettő egyeztetése: ismert implantációs módszerrel jó minőségű, roncsolási hibamentes vagy akár csökkentett hibakoncentrációval előállított, vezetési paraméterekben módosított Si_3N_4 rétegek előállításának lehetősége lett bebizonyítva. Itt a technológia és mérés technika egymáshoz illesztésében ért el fontos eredményeket a szerző, hatékonyan alkalmazva a különböző (ionvisszaszórás, ellipszometria és elektronmikroszkópia) mérés technikák által kapott eredmények összehasonlítását annak bebizonyítására, hogy a vizsgált Al-implantációs paraméterek (ionáramsűrűség, dózisos, hőkezelések hőmérséklete) optimalizálhatók.

Ebben a fejezetben elírásnak vélem azt a kifejezést, hogy a SiC-ban a töltéshordozók mozgékonyasága kétszerese a Si vagy GaAs, GaN kristályokhoz képest (35. oldal, első bekezdés és az 5. táblázat).

Mindhárom fejezet végén 3-3 alpontból álló tézis található. A tézispontok jól körülhatároltak, konkrétak, bizonyított eredményekre épülnek és kitérnek az értekezésben leírt félvezetők határfelületein végbemenő technológiák által módosítható tulajdonságok, szerkezetek és ezektől függő alkalmazási

lehetőségek, valamint mérés-technikai eljárások rendszerének összehangolt kutatására, bizonyítva ezek alaptudományos és alkalmazott műszaki fontosságát.

Ebből kiindulva az összes tézispontot új tudományos eredményként elfogadom.

Az ismertetett eredmények és a fentiekben felsorolt elemzések alapján a munkát megfelelőnek tartom a nyilvános vitára bocsátásra és sikeres védés eredményeként az MTA doktora cím odaítélésére.

Debrecen, 2016. november 25.



Kökényesi Sándor Jenő
az MTA doktora