

## BATTISTIG GÁBOR

### „Határfelületi jelenségek félvezetőkben”

című doktori munkájának bírálata

Battistig Gábor doktori értekezésének témája több nagyenergiájú félvezető eszköz gyártástechnológiájában fontos technológiai részfeladat megoldásához kapcsolódó mikro/nanoelektronikai kutatás. A témaválasztás időszerű, az egyes résztemák (deutériummal dúsított Si felület a spontán oxidáció lassítására; SiC-ban ionimplantáció és az azt követő hőkezelések során fellépő folyamatok vizsgálata, illetve 5-10 nm-es SiC nanoszemcsék előállítására és keletkezési mechanizmusának vizsgálata) a jelenlegi félvezető technológiák fontos problémáit érintik.

Az értekezés lényegében három fő fejezetet tartalmaz, ezek szerkesztése hasonló: mindegyik tartalmazza az előzményeket, a motivációt és a célkitűzéseket, valamint a vizsgálatok és eredmények részletes bemutatását és a három fő téziscsoport részállításait is. A célkitűzések, a motiváció és az előzmények bemutatása mindegyik esetben meggyőző, külön kiemelendő a szerző azon törekvése, hogy bemutassa a félvezetők gyártástechnológiájába beépíthető megoldások lehetőségeit is. A bíráló egyetért a szerző azon megállapításával (lásd 8. Záró megjegyzések) hogy ilyen jellegű kutatások, a nagyon koncentrált, eléggé zárt ipari, feltételek között folynak (kevés világ cég képes technológiai fejlesztéseket saját erőből finanszírozni). Ennek következtében nem könnyű ma hazai környezetben valóban releváns félvezető gyártástechnológiákhoz kapcsolódó eredményes kutatásokat folytatni. Ennek sikeres megvalósítását, az erre irányuló törekvést, külön elismerésre méltónak tartom, és külön kiemelendőnek tekintem azt a fontos hozadékát is, hogy a hazai műszaki-technológiai háttértudás világszínvonalon tartásában ennek milyen fontos szerepe van.

A 2. fejezet a Si MOS tranzisztorok nanotechnológiájának egy fontos kihívását érintő kutatásokhoz kapcsolódik: a kapuelektroda alatti vékony, nagy dielektromos együtthatójú 1.5-2 nm-es szigetelő (pl.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) rétegek előállítása, amelyek szivárgási árama kicsi (azaz nagy homogenitású és kevés hibát tartalmaz). Ilyen tulajdonságú  $\text{Si}_3\text{N}_4$  réteg előállításához a Si szeleteket tisztítani kell, melynek során a felület hidrogénnel borítottá válik. Levegőn a H lecserélődik O vagy OH ionokra, és a natív oxid réteg zavaró a sztöichiometrikus, vékony  $\text{Si}_3\text{N}_3$  réteg előállításakor. A szerző megmutatta, hogy ha felület tisztításához ion cserélt víz helyett nehézvizet használ, akkor deutérium passzíválta felület stabilabb, és csak (4-szer) hosszabb tárolás után válik jelentőssé a natív oxid képződése. A kidolgozott eljárás az ipari körülmények között alkalmazott technológiához illeszkedik. Az eredményeket meggyőzőnek tartom, elfogadhatónak tartom az A tézis mindhárom részállítását is. Ehhez a fejezethez a következő megjegyzéseim, kérdéseim vannak:

- Mi az RCA lépéssorozat?



- A 25 oldalon ez szerepel: „ Si-D kötések erőssége lényegesen nagyobb, mint a Si-H kötéseké”. Ugyanakkora 9. oldalon a  $2.5 \pm 0.2$  eV, illetve a  $2.67 \pm 0.1$  eV adatokat adja meg a Si-H illetve Si-D kötése erősségére. Indokolt-e a „lényegesen” jelző?
- A tézisekhez kapcsolódó közleményekben [24, 28-31] AE Papp az első szerző: kérem, pontosan adja meg saját szerepét ezeknek az eredményeknek az elérésében.

A 3. fejezet (B téziscsoport) a SiC implantációs adagolásával, a közben keletkező rács hibák javításával, valamint az adalékok aktiválásával foglalkozik. A kapott eredmények az Al adalékolása során keletkezett rácskárosodásra és az azt megszüntetni szándékozó hőkezelések eredményeire vonatkoznak, ezeknek a dózistól, valamint az Al ion áramsűrűségétől való függését tárgyalják. A B/1 altézist elfogadom, a B/2 és B/3 altézispontokat összevonhatónak tartom (A B/3-ban a kísérleti technikák által szolgáltatott különféle információkra vonatkozó érvelést nem érzem tézis értékűnek és elhagyhatónak vélem). Ehhez a fejezethez a következő kérdéseim vannak:

- 1) Az 53. oldalon (a 3.5.5. alfejezet utolsó három mondatában) azt írja le a szerző, hogy az implantáció közben a fékeződő ionok lokálisan melegítik az anyagot. Létezik-e arra vonatkozóan kvantitatív becslés, hogy mekkora lehet ez a lokális hőmérséklet emelkedés és mennyi lehet ennek a hővezetés okozta lecsengési ideje?
- 2) A 40. oldalon a 27. ábra feletti utolsó mondat: „a nagysebességű (még kevés energiát veszített) ionokra az elektromos fékeződés (kölsönhatás az elektronfelhők között), míg a lelassult ionok megfékeződéssel (rugalmas ütközés) adják le energiájukat.” hiányos és hibás. Kérem, korrigálja ezt.

A 4. fejezet (C téziscsoport) A SiC nanorészecskék CO-ban hőkezeléssel történő előállításával foglalkozik egykristályos Si szeleteken képzett termikus SiO<sub>2</sub>/Si határfelületeken. A bevezetőben és a leírásban számomra kissé zavaró volt, hogy gyakran Si (vagy SiC) oxidációs mechanizmusát is tárgyalja, bár az nem volt része a téziseinek. Elfogadom ugyan, hogy ezek az eredmények – mint előzmények – fontosak voltak a szerző számára, mégis jobb lett volna ezekre csak a legszükségesebb helyeken utalni. Ugyanakkor a fejezetben vizsgált jelenségek nagyon érdekesek, ezek leírását és értelmezésükre tett próbálkozást nagyra értékelem, ezeket a dolgozat legfontosabb téziseinek tartom. Kérdéseim/megjegyzéseim ehhez a fejezethez:

- 1) A 69. oldalon a  $k_L, k_P, k_e$  és  $D$  mennyiségeket helyesebb együtthatóknak, mint állandóknak nevezni (függhetnek pl. a hőmérséklettől). Továbbá az itt adott (Deal-Grove—féle) képletek alapján elvileg a  $k_e$  reakció sebességi együttható is becsülhető (pl. az  $x_c^2 = Ax_c$  feltételből kapható kritikus vastagságból, ha  $D$  ismert, vagy a kinetikák részletes elemzéséből). Történt-e ilyen becslés?
- 2) A 76. oldalon a „...a kialakuló SiC nanoszemcsék nukleációs sűrűsége,  $\approx 10^9 - 10^{10}/\text{cm}^2$ , hasonló nagyságrendben van, mint a határfelületi állapotok száma.” mondatban mit jelent a „határfelületi állapotok száma”?

A dolgozat kivitelezése szép, néhány elírás, pontatlan fogalmazás fordul csak elő (pl. 45. oldal 9. sor; 48. oldal 2. sor; 66. oldal a 31. ábra alatti sor). A leírás nem mindenhol

elég feszes, bizonyos ismétlések előfordulnak (pl. 44. oldal utolsó bekezdés, illetve a következő eleje; 44. és 49. ábrákon a bal/jobbs elrendezés helyett a fent/lent a helyes).

Általában a leírás kvalitatív, képletet, konkrét összefüggéseket ritkán használ a szerző. Ez sok esetben lehet előny, hiszen a legfontosabb folyamatok lényegét így is meg lehet ragadni. Ugyanakkor esetenként nem könnyű „mögé látni” a levezetett paraméterek számítási eljárásainak. Például: hogyan számolták a CO molekula diffúziós együtthatóját (73. oldal)?

Összefoglalva: értékes eredményeket tartalmazó, modern vizsgálati technikákat felvonultató, alapos munkát tükröző doktori munka, melyet nyilvános vitára alkalmasnak tartok.

Debrecen. 2017-02-14



Beke Dezső

a fizikai tudomány doktora (az MTA doktora)