

MTA doktori értekezés bírálata

Az értekezés szerzője: Battistig Gábor

Az értekezés címe: Határfelületi jelenségek félvezetőkben

A disszertáció lényegében három kis disszertáció egybekötve, a szerző szakmai pályafutásának egy hosszabb részét mutatják be. A három részon rokon terület, és ehhez a szerző egy jól illeszkedő címet talált. A cím olyan szempontból is szerencsés, hogy a határfelületek talán a legbonyolultabb részei a félvezetőknek, van rajtuk még most is bőven kutatnivaló, különösen az egzotikusabb félvezetők esetén, ezen kívül fontos szerepet játszanak a félvezető eszközök működésében. A szigetelt vezérlőelektródás tervezérelt tranzisztor (MOS FET, MIS FET), amely a mikroelektronikában alapvető szerepet játszik, lényegében egy felületi eszköz, és az eszközök méretcsökkentésének következtében egyre jobban az lesz. A bipoláris eszközök ugyan tömbi eszközök, mégis befolyásolja működésüket a határfelület állapota. A disszertáció témája tehát fontos és aktuális. A hármas tagolódást még jobban kiemeli az a tény, hogy a tézispontok nem egy helyen találhatók, hanem három külön csoportban, a három részre tagolt disszertáció egyes szakaszainak a végén. Ez ugyan szokatlan, de az adott esetben logikusnak tűnik. Sajnos a hármas felosztás áldozata lett a téma szakmai előzményének összefoglalása, az egyes részek elején csak igen rövid bevezetők találhatók, a szöveg többi részében viszont bőven találhatók utalások más szerzők korábbi publikációira.

Az első rész témája a szilícium felületének passziválása deutériummal, azaz a felületen megkötött hidrogén atomok helyettesítése deutérium atomokkal. A szerző kimutatta, hogy ezáltal jobb tulajdonágú határfelületi réteg kapható a hagyományos eljárással előállítottéhoz képest.

A második rész a SiC implantációs adalékolásának néhány kérdését tárgyalja. Ez nagyon fontos kérdés, mivel a SiC elvileg nagyon előnyös tulajdonságokkal rendelkezik félvezető eszközök alapanyagaként, különösen a teljesítményelektronikában és a szilárdtest fényforrások vonatkozásában, de nagyon nehéz a gyártástechnológiája és számtalan nyitott kérdés van még ezzel kapcsolatban.

A harmadik rész a szilícium-szilíciumdioxid határfelületen szénmonoxid atmoszférában növesztett SiC nanokristályok előállításával és vizsgálatával foglalkozik és utal ezen nanokristályok lehetséges alkalmazási területeire is.

Mindhárom téma szorosan kapcsolódik a félvezető technológiához. A szerző és munkatársai által előállított struktúrák vizsgálatához a szerző az anyagvizsgálati eszközök majdnem teljes nehéztüzérségét felvonultatta, mivel a szinte atomi szintű vizsgálatokhoz igen bonyolult és drága mérőberendezések szükségesek. Ezek közül több nem található meg a szerző (egyébként jól felszerelt) intézetében, sőt akár Magyarországon sem, ezért a szerző kutató munkájában több hazai és külföldi intézettel is intenzíven együttműködött.

A disszertáció kivitele gondos, szép. Sok színes ábra található benne a vizsgált struktúrákról, egészen az atomi részletességgel rendelkeznek. Ez is mutatja, hogy milyen nagy kísérleti munka van a disszertáció mögött. Viszont ezen disszertáció is megerősítette azon megfigyelésemet, amit sok disszertáció bírálata során tettem, hogy a disszertációk hasonlóan viselkednek a radioaktív elemekhez. Ezen utóbbiak esetén az idő függvényében exponenciálisan csökken a radioaktív atomok száma és definiálható a felezési idő. Disszertációk esetén is exponenciálisan csökken az elírások és egyéb kisebb formai hibák száma, de a vízszintes tengelyen ezen utóbbi esetben a beadás előtti átnézések száma található.

Néhány, egyébként szép és értékes ábra esetén egyes feliratok olyan aprók voltak, hogy az otthon található legerősebb nagyítóval sem tudtam elolvasni. (Pl. a 36. és 45. ábrák alsó részén található adatok.) Az is előfordult, hogy egy ábra vízszintes tengelyén hiányzott a mértékegység és ez az ábraaláírásból is lemaradt (pl. 34. ábra). A disszertáció első átnézésekor feltűnt, hogy nem látok benne képleteket. A disszertáció részletesebb átnézésekor aztán rábukkantam egy kicsi, közismert képletre a 69. oldalon, mely a szilíciumdioxid vastagságát írja le az oxidációs idő függvényében. Amikor aztán alaposabban átolvastam a disszertációt, az a gyanúm támadt, hogy talán a hiba bennem van, kissé konzervatív a szemléletem. A szerző vagy az interneten vagy egyéb lehetőségeket kihasználva megkereste azon programokat, szoftvereket, amelyek segítségével szimulálta a vizsgált struktúrákat és a szimulációs eredményeket összevetette a mérési eredményekkel. Bizonyos illesztési paramétereket ügyesen megválasztva jó egyezést kapott. Ennek segítségével a vizsgált struktúra felépítésére vonatkozóan értékes információkhoz jutott.

Az általános megjegyzések után néhány konkrét észrevételt vagy kérdést tennék fel:

A nagyobb felület és így a mérhetőség elérése érdekében pórusos szilíciumon végezték a deutériumos felületkezelési kísérleteket. Azt viszont megkérdezném, hogy normál egykristályos szilícium szubsztráton miért nem készült MOS struktúra deutériumos kezeléssel és anélkül, így hagyományos módon is demonstrálható lett volna C-V méréssel a deutériumos előnye?

A pórusos szilícium előállítása anódikus oxidációval és az oxid marásával, HF-el történt vizes illetve nehézvizes oldatban. Az oxid HF-el történő marásakor víz keletkezik. Ez a víz nem hígította fel a nehézvizet? Ezért nem sikerült csak deuteriummal borított felületet létrehozni?

Van-e különbség a H és D borított felület kontaktszöge között?

Az 5. és 6. ábrán a 600/cm és 900/cm hullámszámokon jelentkező maximumok milyen kötésekre utalnak?

A 35. oldal tetején az a megállapítás olvasható, hogy SiC-ban a töltéshordozók mozgékonyasága kb. kétszerese a fontosabb (pl. Si) félvezetőkben tapasztalhatóknak. A szöveg alatt lévő táblázatból pont az ellenkezője derül ki. A szövegben lévő állítás a termikus határsebességre igaz, valószínűleg elírás történt

36.o. Az alacsony ionizációs energia miért eredményez alacsony töltéshordozó koncentrációt? Nem fordítva? Valószínűleg elírás.

45.-46. o. A 20. ábrán nagyon jó egyezés látható a mért és szimulált értékek között. Melyek voltak a szimuláció illesztését elősegítő paraméterek? Mi a magyarázata annak, hogy az ábrán az implantált, de nem hőkezelt minták görbéi a nem implantált görbéje felett találhatók, míg az implantált és hőkezelt minták görbéi a nem implantált minta görbéje alatt. Azt gondolhatnánk, hogy a kristálykárosodások mértéke hőkezelt minták esetén a hőkezeletlen és a nem implantált mintáké közé esik.

48. o, "A legkisebb dózisú implantáció esetében a felső 40 nm vastagságban hibamentes 4H kristályszerkezet alakult ki a hőkezelés alatt. A rétegben kiterjedt hibák találhatóak."?

Jelentős ötletnek tartom a csatornázás jelenségének a kihasználását a mélységbeli anyagösszetétel vizsgálatára.

54.o. 24. ábra jobb oldalával kapcsolatban az a szövegben található magyarázat, hogy az ott látható csúcs betolódik a minta mélyebb rétegeibe, így végigpásztázható a szén mennyisége a mélység függvényében. A szén mennyisége nem állandó a SiC-ben? Alaposabban megnézve az ábrát az látható, hogy a vizsgáló feszültség növelésével a csúcs kettéválk. A jobboldali csúcs egyre gyengébb, de helyzete nem változik, a skála jobb oldali szélétől kb. 16 mm-re van, ami megfelel a 250-es csatornaszámnak. Az egyre növekvő baloldali csúcs a skála szélétől kb. 19-20 mm távol van, ami kb. a 190-200-as csatornának felel meg, és ennek a helyzete sem változik. Más vizsgálatok és a szimuláció is azt mutatták, hogy az implantáció a felületen kisebb károsodást okozott és befelé haladva a kristályban nőtt a károsodás mértéke, majd egy maximum elérése után csökkent. Nem lehet az a magyarázat, hogy a jobboldali, egyre csökkenő csúcs a rácspontban maradó, a baloldali egyre növekvő csúcs pedig az abból kimozdított szénatomok számára jellemző? Ha így van, akkor a csúcs alatti területből megbecsülhető a helyben maradt és a kimozdult szénatomok aránya a mélység függvényében.

56.o. 26 ábrával kapcsolatban is felmerül egy probléma. Az ábra a rácskárosodás mértékének mélységbeli eloszlását mutatja különböző implantációs dózisok és áramsűrűségek mellett. Az implantált Al ionok gyorsítófeszültsége valamennyi esetben azonos, 150keV volt. Ennek megfelelően a maximális roncsolódás is azonos mélységben keletkezett. Az alsó zöld és a fekete vonal összevetéséből az látható, hogy azonos dózis esetén jelentősen nő a roncsolódás, ha nő az áramsűrűség. A dózis növekedése meg egyértelműen növeli a roncsolódást. Ennek fényében hogyan magyarázható, hogy a felső két görbe (a kék és a piros) esetén szinte azonos a maximális roncsolódás mértéke, miközben a piros görbe esetén ötször nagyobb a dózis és kétszer nagyobb az áramsűrűség? Esetleg az a magyarázat, hogy a nagy dózis és nagy áramsűrűség hatására erősen

felmelegszik a kristály és fokozott öngyógyítás jön létre?

62.o. Ha a CO molekulák a szelet teljes felületén egyenletesen diffundálnak a szilíciumdioxid rétegen keresztül az oxid-szilícium határfelülethez, miért nem egyenletes vastagságú SiC réteg alakul ki? Esetleg az oxid nem homogén, vagy a felületen vannak kristályosodási gócok és a szénatomok oda vándorolnak?

65.o. 29. ábra. A baloldali felvételen látható három SiC kristály, mindhárom kúp alakú és szorosan egymás mellett vannak. A két szélső kúp fejjel lefelé állónak tűnik. Ezt az érdekességet nem említi a szerző. A szemcsék magassága több mint fele az alapjuknak, ahogy az egyszerű távolságméréssel meghatározható. Az oldallapok az alappal kb. 60 fokos szöget zárnak be, de a kúp teteje nem tudott kiépülni. A 64. oldalon az olvasható, hogy a nanoszemcsék magassága kb. egy harmada az alapnak. Szintén a magyarázattól eltérően a határfelületi illeszkedés nem tekinthető tökéletesnek, sok kötés hiányzik. A szimuláció szerint a határfelületen 8 atomból álló gyűrűk alakulnak ki, az ebben található atomoknak három-három szomszédjuk van csak. Tehát nyilván előfordulnak ebben a gyűrűben kettős kötések is. Lehet, hogy előfordul Si-C kettős kötés is?

A 32. ábrán a feliratban a "Kicserélődés..." felirathoz folytonos fekete vonal van hozzárendelve, az ábrán magán ez valószínűleg a pontozott fekete vonal. Ugyan ez a probléma a 33. ábrával is.

A 72. oldalon az a fontos megállapítás található, hogy a hagyományos oxidációval ellentétben a CO molekulák oxidon történő átdiffundálása közben a CO reakcióba léphet a szilíciumdioxiddal. Ezt a megállapítást nem találtam a tézisek között.

A 73.o. 34. ábrán az látható, hogy hogyan csökken a 18-as oxigénizotópok aránya az összes oxigénatomhoz képest a szilíciumdioxid-szilícium határfelületen különböző oxidvastagságok és CO gáznyomások esetén, továbbá a szimuláció eredménye is. Ezen ábra is bizonyítja az oxigénatomok kicserélődését a CO és a szilíciumdioxid között a CO szilíciumdioxidon keresztül történő diffundálása folyamán. Az ábra vízszintes tengelyéről, mely az oxidréteg vastagságát mutatja, lemaradt a mértékegység. Esetleg nm? A középső mérési eredmény összhangban van a fizikai képpel. Nagyobb nyomás esetén a CO molekulák gyorsabban átdiffundálnak a szilíciumdioxid rétegen, a rövidebb idő kisebb mértékű oxigénatom-kicserélődést eredményez. Ettől azonban eltérés tapasztalható a két szélső mérési eredmény esetén.

75.o. 37. ábra. A szövegben található magyarázat szerint az (110) alapon növekvő nanokristályok kisebbek, mint az (100) alapon növekvők. Az ábra szerint azonban meglehetősen azonos nagyságúnak tűnnek, amennyiben a két ábrán a lépték azonos. Ezt azonban nem tudtam megállapítani, mivel a felső ábrák alján látható feliratokat nagyítóval sem tudtam elolvasni.

A SiC képződéshez Si atomokra van szükség. Mivel a SiC-on keresztül igen kicsi a szilíciumatomok diffúziója, ez a szilícium csak a nanokristály körüli szilícium felületről származhat. Valószínűleg ez magyarázza az árkok kialakulását a szilícium nanorészecske határvonalánál. Ha kialakul a felületen az összefüggő SiC réteg, hogyan jutnak el a szilícium atomok a SiC-szilíciumdioxid határfelülethez? Valószínűleg ezért lehet a kb. 20 nm vastag

SiC réteg kialakulása után csak epitaxiális úton tovább növesztetni a SiC réteget.

A dolgozat a nanorészecskék lehetséges alkalmazásai közt említi a szilíciumdioxidba ágyazott nanorészecskék töltéstárolóként való felhasználását EPROM vagy EEPROM memóriákban. Ezzel kapcsolatban két probléma is felmerül. Jelen dolgozat azt írja le, hogy hogyan képződnek a SiC nanorészecskék a szilícium-szilíciumdioxid határfelületen. Szilíciumdioxid belsejében, az előbbi határfelületről definiált távolságra hogyan hozhatók létre nanorészecskék? A másik probléma az, hogy a jelenlegi MOS FET technológia már a 10 nm-es csatornahossznál tart és ez a közeljövőben még minden bizonnyal tovább fog csökkenni. Az alkalmazott nanorészecskék méretének ennél lényegesen kisebbnek kellene lenni. Lehetséges ilyen rendkívül kisméretű nanorészecskéket létrehozni? Ha igen, akkor az már a pikoelektronika kezdetét jelentené.

A dolgozatban összesen három helyen felsorolt tézispontokat elfogadom, csupán a c/3 tézis utolsó mondatának második felével vitatkoznék, amely a SiC/Si határfelület állapotát idealizálja megítélésem szerint.

A dolgozatot a nyilvános vitára alkalmasnak tartom és sikeres védés esetén javaslom a jelöltnek az MTA doktora cím megítélését.

Budapest, 2017. február 4.

Dr. Zólmay Imre
a műszaki tudomány doktora