

Válasz Hopp Béla

“A spektroszkópai ellipszometria és az ionsugaras analitika

néhány alkalmazása az anyagtudományban”

című doktori értekezésem bírálatára

Köszönöm Hopp Bélának, az MTA doktorának értekezésem alapos átolvasását és hasznos észrevételeit.

A bírálatban feltett kérdéseire, megjegyzéseire (amelyekre itt dőlt betűkkel utalok) a következőket válaszolom:

-1. Az 1.3. fejezet végén (8. oldal) számomra elhagyhatónak tűnik az ellipszometriai nemzetközi konferenciák felsorolása.

Egyetértek a megállapítással, felesleges volt ezt az információt közölni.

-2. A 3.1.1. fejezet ábrája nincs számozva, feliratozva (10. old.), s az egyenletek sorszámozása is meglehetősen érthetetlen: (2.1)-(2.5).

Egyetértek a megállapítással, sajnálom a számozás és a feliratozás elmaradását, az egyenletek érthetetlen sorszámozását, elnézést kérek ezekért.

-3. Általában igaz, hogy az ábraszámozás rendszere meglehetősen nehézkes, példa erre mindjárt az első ábra, melynek száma 3.1.2.1. (12. old.) vagy a 83. oldalon lévő 4.2.2.2.2., s így tovább.

Az ábraszámozásban és a táblázatok számozásában a fejezetszámozást tekintetem kiindulási pontnak, így kapta a 3.1.2.1. ábraszámot a 3.1.2. fejezet első ábrája, ennek következtében lett a 4.2.2.2. fejezet második táblázatának száma 4.2.2.2.2. Egyetértek az opponenssel, ez meglehetősen nehézkes számozási rendszer, elnézést kérek érte.

-4. A 3.1.3. fejezetben egy újfajta egyenletszámozást találtam (14. old.).

Elnézést kérek az újfajta egyenletszámozásért.

-5. A 3.1.4. (16. old.) és a 3.3 (27. old.) fejezetben a változatosság kedvéért nem lettek megszámozva az egyenletek.

Elnézést kérek az egyenletek számozásának elmaradásáért.

-6. A 3.1.5. fejezetben az ábrák és a táblázatok száma: 3.1.5.1-től kezdődik (21. old.).

A 3.1.5. fejezetben az ábrák számozása sajnos 3.1.4.1-től kezdődik, eltévesztettem az ábrák számozását, elnézést kérek érte.

-7. A 3.1.6. fejezetben az ábrák és a táblázatok száma: 3.1.5.1.-től kezdődik (21. old.)

Sajnos eltévesztettem az ábrák és táblázatok számozását, elnézést kérek érte.

-8. A 3.2. Ionimplantáció c. fejezet első bekezdésében hasznos lett volna megemlíteni, mi hozza össze a dolgozatban az ellipszometriát és az ionimplantációt (25. oldal).

Az értekezés 6. oldalán írtam: „Az Ionimplantációs Célprogram laboratóriumaiban dolgozva mindennapi tapasztalatom volt az, hogy az ionimplantált szilícium színe különbözik a nem implantált egykristályos szilícium színétől. Azaz optikai kontraszt van az egykristályos és az ionimplantációval amorffá alakított szilícium között.”

Egyetértek az opponenssel, az Ionimplantáció című fejezetben hasznos lett volna megemlíteni, hogy a kristályos céltárgyban rácshibákat létrehozó, illetve amorfizációt okozó ionimplantáció megváltoztatja a céltárgy optikai tulajdonságait, ezek a változások ellipszometriával vizsgálhatók.

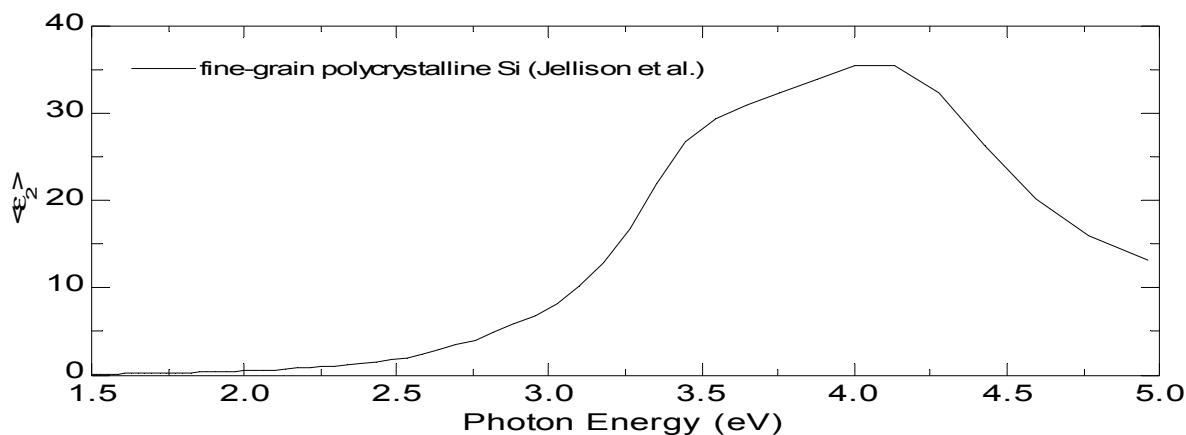
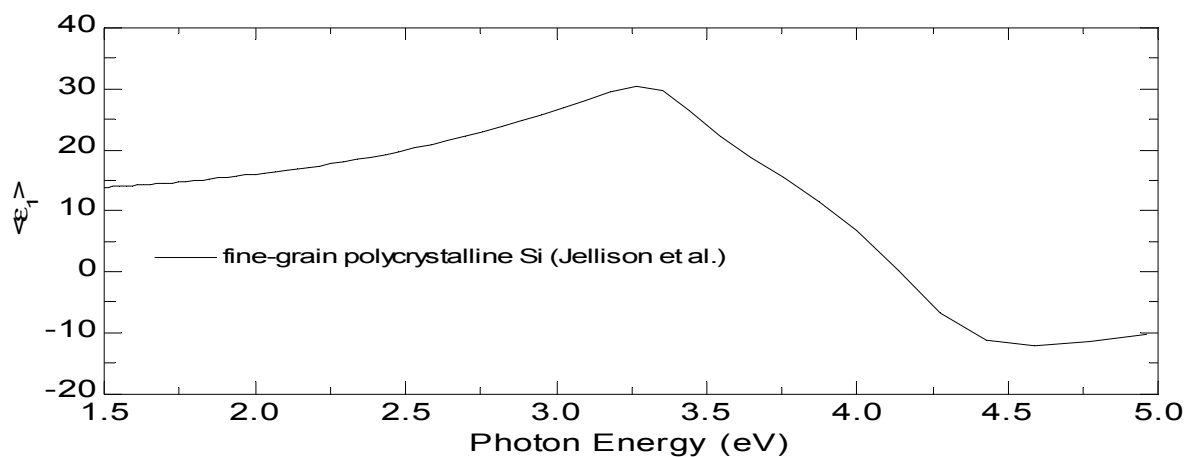
-9. Ugyanezen fejezet végén szintén megjelenik egy lista a módszerrel kapcsolatos konferenciákról és a résztvevők számáról, mely a dolgozat szempontjából semmilyen releváns információt nem tartalmaz.

Egyetértek a megállapítással, felesleges volt ezt az információt közölni.

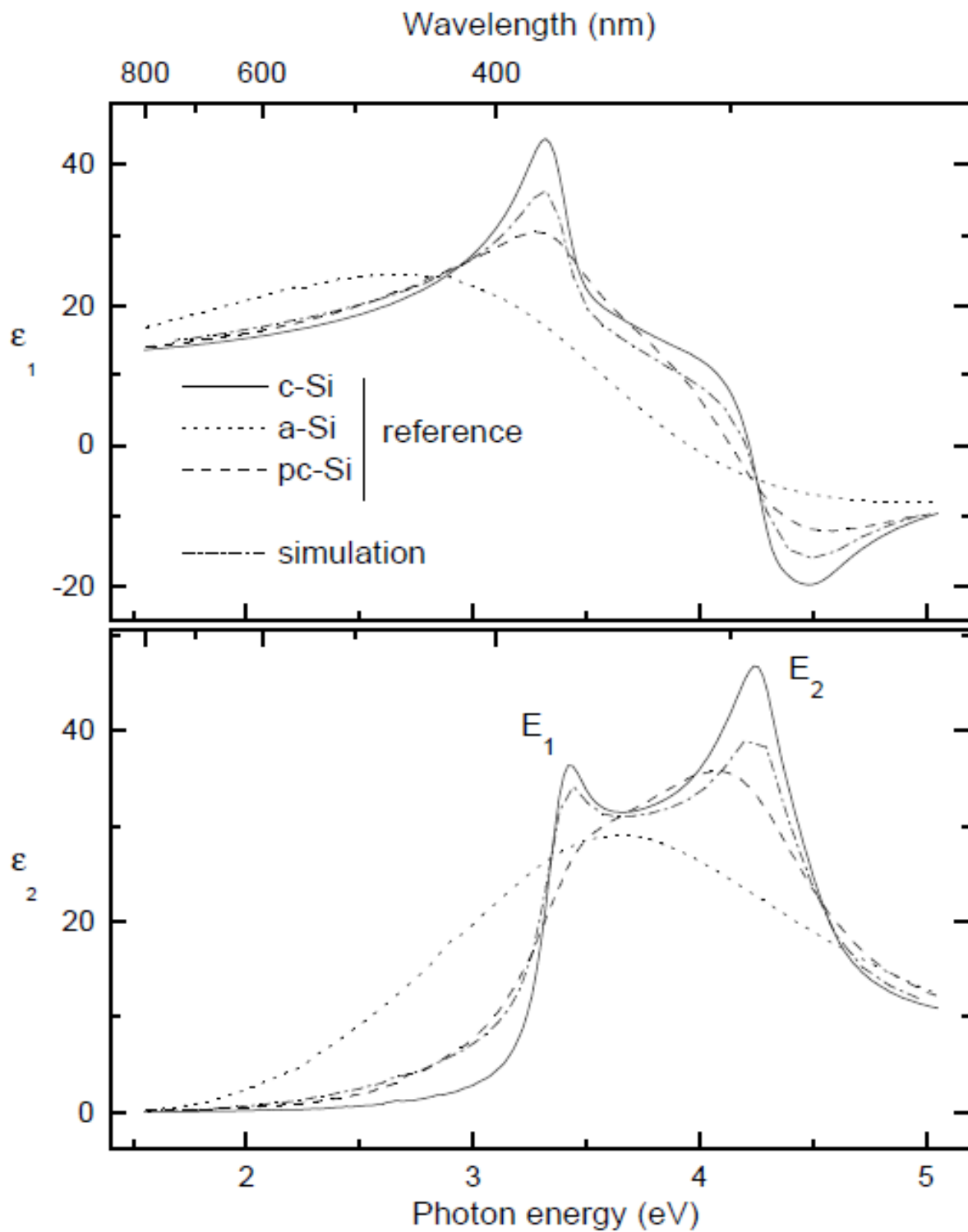
-10. A 31. oldalon található, az MTA Rutherford-empléknápra vonatkozó bekezdés sem hordoz a dolgozat szempontjából hasznos információt.

Egyetértek a megállapítással, felesleges volt ezt az információt közölni.

-11. Egy kicsit részletesebben is be lehetett volna mutatni a hivatkozott Jellison és munkatársai által alkalmazott függvényt, hiszen a szerző is sokszor felhasználta munkája során.



A finomszemcsés polikristályos szilícium dielektromos függvényének valós (ϵ_1) és képzetes (ϵ_2) része a fotonenergia függvényében (G.E. Jellison Jr, M.F. Chisholm, S.M. Gorbalkin: Optical functions of chemical vapor deposited thin-film silicon determined by spectroscopic ellipsometry. Applied Physics Letters 62 (1993) 3348.)



A finomszemcsés polikristályos szilícium Jellison-féle dielektromos függvényének összehasonlítása az egykristályos és az amorf szilícium dielektromos függvényével.

Jellison és munkatársai magas hőmérsékleten oxidált egykristályos szilícium felületére kémiai gőzfázisú leválasztással készített finomszemcsés polikristályos szilíciumréteget vizsgáltak spektroszkópai ellipszometriával, a rétegvastagságot keresztmetszeti transzmissziós elektronmikroszkópiával és ionvisszaszórással ellenőrizték (G.E. Jellison Jr, M.F. Chisholm, S.M. Gorbatkin: Optical functions of chemical vapor deposited thin-film silicon determined by spectroscopic ellipsometry. Applied Physics Letters 62 (1993) 3348-3350). Az ábrán a szaggatott vonallal rajzolt görbék (pc-Si) mutatják a Jellison és munkatársai által meghatározott függvényeket, azaz a finomszemcsés polikristályos szilícium dielektromos függvényének valós (ϵ_1) és képzetes (ϵ_2) részét a fénycsúcs, illetve a fotonenergia függvényében. A folytonos vonallal rajzolt görbék (c-Si) az egykristályos szilícium dielektromos függvényének valós és képzetes részét mutatják, a dielektromos függvény képzetes részében két jellegzetes csúcsot (E_1 , E_2) figyelhetünk meg. Az amorf szilícium (a-Si) dielektromos függvényének képzetes része egy széles csúcsot mutat, a maximum kb 3,65 eV-nál van. A „simulation”-nal jelölt görbe egy olyan szimuláció eredményét mutatja, amelyben a finomszemcsés polikristályos szilíciumot egykristályos szilícium és amorf szilícium keverékének tételeztük fel.

-12. A 4.2.1.2. fejezetben lévő 4.2.1.2.1. ábra számomra kicsit áttekinthetetlen, nem tudtam megállapítani, mikor is éri el a rendezetlenségi csúcs a random szintet. Számomra nem volt olyan egyértelmű, mint ahogyan a szerző leírja. (63. old.).

A $12,5 \times 10^{14}$ ion/cm² fluenciával implantált minta orientált visszaszórási spektruma körülbelül a 185-ös csatornaszámnál éri el a random szintet, a felső vízszintes tengelyre konstruált mélységskála szerint a 600 nm-es jelnél. A $37,5 \times 10^{14}$ ion/cm² fluenciával implantált minta orientált visszaszórási spektruma pedig körülbelül a 200-as csatornaszámnál éri el a random szintet, a felső vízszintes tengelyre konstruált mélységskála szerint a körülbelül a 460 – 470 nm-es mélységnél.

-13. A 4.2.1.2.2. ábra szövege azt állítja, hogy az O betű és a belőle kiinduló nyíl a minta felületén lévő oxigén atomoktól származó csúcsra mutat. Nekem inkább úgy tűnik a grafikon alapján, hogy ez a csúcs 100 nm-es mélységben található (64. old.).

A 4.2.1.2.2. ábra felső vízszintes tengelyére konstruált mélységskála a szilícium szubsztrátbeli mélységet jelenti, a visszaszórási spektroszkópiában a különböző tömegű céltárgyatomok számára külön – külön kell mélységskálát konstruálni. Az említett ábrán csak a szilícium szubsztrátbeli mélységskála van feltüntetve. A szilícium atommagnál jóval kisebb tömegű oxigén atommagról jóval kisebb energiával szóródik vissza az analizáló hélium atommag mint a szilícium atommagról, körülbelül a 210-es csatornaszámnak megfelelő energiával. Azt, hogy felszíni atomokról van szó, a minta „tilt”-elésével, a dőlési szög megváltoztatásával (általában növelésével) lehet ellenőrizni. Ha a csúcs helye nem változik, akkor felszíni atomokról van szó, ha a csúcs kisebb csatornaszámok irányába mozdul, akkor mélyebben van, amit szimulációval ki is lehet számolni.

-14. A 4.2.1.2.1 táblázat kapcsán írja a szerző, hogy az ionsugaras és spektroellipszometriai módszerrel meghatározott vastagságok jó egyezést mutatnak. Az én meglátásom szerint ez leginkább csak az Ar^{2+} -os esetre igaz, már csak azért is, mert a többi ion esetén nem nagyon van adat (66. old.). Mivel magyarázza a szerző azt, hogy az oxidréteg esetén már távolról sem ilyen jó az egyezés, a későbbiekben eléggé számottevő eltéréseket figyeltem meg mind a Xe^{2+} , mind a Ne^{2+} esetén is?

Az oxidrétegekkel kapcsolatosan több körülményt kell tekintetbe venni. Az egyik az, hogy az ionimplantált minta legfelső, igen vékony rétegét modelleztem a termikus szilíciumdioxid dielektromos függvényével. A szilícium felületén natív oxid biztosan kialakul, az ionbombázás hatására felületi érdesség is kialakulhat és az implanterkamrából (azaz a vákuumkamrából) való kivételt követően pedig szénhidrogénmolekulák is adszorbeálódhatnak a natív oxid felületén, Strein és Allred szerint két óra alatt 0,1 – 0,2 nm vastagságú, egy hét alatt még pótlólagosan 0,2 –

0,5 nm nm vastag szénhidrogén-réteg rakódik le az oxidált szilícium felületére (E. Strein, D. Allred, Eliminating carbon contamination on oxidized Si surfaces using a VUV excimer lamp, Thin Solid Films 517 (2008) 1011). Ez a szénhidrogén-réteg nem különböztethető meg az ellipszometriai kiértékelés során a natív oxid rétegtől, tehát vastagságnövekedést okoz. Az ionbombázás hatására kialakuló felületi érdesség-réteg szilícium és levegő keverékének tekinthető, ez sem kezelhető külön a natív oxidrétegtől. A fentiekben említett hatások okozhatják azt hogy az ionsugaras módszer által detektált oxigén atommagok felületi sűrűségéből számított szilíciumdioxid-rétegvastagság számottevően eltér annak a felületi rétegnek a vastagságától, amelyben a natív oxid, a felületi érdesség és lerakódott szénhidrogén-réteg együtt van jelen. Az az ionsugaras módszer nem érzékeli a felületi durvaságot, a levegő ugyanis nem okoz fékeződést.

-15. A 4.2.2.2. fejezetben azt írja a szerző, hogy az 5 perces plazmaimmerziós implantáció (PIII) után sokkal kevesebb foszfor és oxigén atom található a felületi rétegben, mint a 15 másodperces PIII után (85. old.). Kis túlzásnak gondolom „sokkalt” írni egy kétszerest el nem érő változási arányról.

Egyetértek az opponenssel, túlzás a „sokkal” szó használata az említett esetben. A „szignifikáns” vagy a magyar „számottevő” talán megfelelőbb lett volna.

-16. A 4.2.2.3. fejezet végén található tézispontban a szerző azt állítja AFM-es mérésekre hivatkozva, hogy az 5 percig tartó PIII hatására a felületi érdesség réteg vastagsága jelentősen megnő (92. old.). Sajnos nem sikerült kiderítenem, hogy mihez képest.

A 7,5 másodpercig tartó PIII kezelés után csak minimális vastagságú felületi érdesség réteget mutatott az atomerő mikroszkópos mérés (0,12 nm), az 5 percig tartó PIII kezelés után pedig 1,5 nm-re, azaz nagyjából tízszeresére növekedett az érdesség réteg vastagsága.

-17. A 4.4.2. fejezetben azt olvasni, hogy a szerző a réteget 50% üregből és 50% alul lévő anyagból állónak tette fel (113. old.). Ezt hogyan kell elképzelni?

A spektroszkópai ellipszometriai mérések adatainak kiértékelése céljából konstruált optikai modellek többségében a legfelső, a levegővel érintkező alréteg az érdesség-réteg, amelyet talán egy nano-„dombság”-ként lehetne elképzelni. A szemléletes kép alapján is arra gondolunk, hogy ez az érdesség-réteg a levegő és az alatta levő tömör réteg anyagának a keveréke. A kiértékelő programokban megvalósítottak egy olyan alprogramot, amely az effektív közeg közelítés szabályait figyelembe véve keverékként kezeli ezt az érdesség-réteget, mégpedig 50 térfogatszázalék levegő és 50 térfogatszázalék olyan anyag keverékeként, amilyen anyagból az érdesség-réteg alatti tartomány áll. Így egyrészt megkönnyítik a mérés kiértékelést végzők dolgát, mert az ilyen módon konstruált érdesség-réteg egyszerűen „ráhelyezhető” a multiréteg-modell tetejére az optikai modell megalkotása során, másrészt csak egyetlen illesztendő paraméter kell a leírásához, a vastagság. Az ellipszometriai mérés kiértékelő programok leírásaiban újabban óva intik a felhasználókat attól, hogy szabad paraméterként definiálják az érdesség-rétegekben a levegő térfogatszázalékát, mert kis rétegvastagságok esetén nagymértékű paraméter-korrelációk nehezíthetik a felhasználók munkáját...

-18. A 4.6. Modellstruktúra-javaslat egy nemzetközi szerződés teljesítéséhez fejezettel nem igazán tudtam mit kezdeni. A többi fejezethez képest nem tartalmazott jelentősebb tudományos eredményeket, s az alapján írt tézispont sem felel meg szerintem az elvártaknak.

Egyetértek a megállapítással, a 6. tézispontot visszavonom.

-19. A 4.7.1. fejezetben feleslegesnek tartom a Christo Angelovról szóló, nem túl releváns, inkább személyes jellegű információk említését. (139. old.).

Egyetértek a megállapítással, felesleges volt ezeket az információkat közölni.

-20. A 4.7.2. fejezetben a szerző azt írja, hogy a beimplantált Bi^{+} ionok koncentrációjának maximuma 41 nm mélységben van, mely jó egyezésben van a SRIM számolásból származó 44,9 nm-es értékkel (142. old.) Erről a hivatkozott számolásról lehetne tudni néhány részletet, mert nem találtam említést róla a fejezetben?

Az ion-szilárdtest kölcsönhatás egyes jelenségeinek szimulációjára kiválóan alkalmas SRIM számítógépprogramot Ziegler és munkatársai időről-időre fejlesztik/aktualizálják [J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler: SRIM, The Stopping and Range of Ions in Matter, <http://www.srim.org>].

A választható anyagú, de amorfnak feltételezett céltárgyba megadott energiával implantált ion pályáját követi nyomon a számítógépprogram az ion és a céltárgyatomok között lezajló ütközések részleteinek figyelembevételével. Sok ion pályájának nyomon követésével és a megfelelő átlagolások alkalmazásával előállítható a beimplantált ionok mélységeloszlása (a koncentráció mélységfüggése), az ionok által a céltárgyból kilökött (leporlódott) rácsatomok száma, a keltett ponthibák mélységeloszlása, stb.

Még egyszer köszönöm Hopp Bélának, az MTA doktorának értekezésem alapos átolvasását és hasznos észrevételeit.

Budapest, 2013.05.15.

Lohner Tivadar