

Válasz Dr. Jakab Lászlónak a „Spektroellipszometria a mikroelektronikai rétegminősítésben” című doktori értekezésem bírálatára

Nagyon köszönöm Dr. Jakab Lászlónak, az MTA doktorának a dolgozat gondos átolvasását és értékelését. Köszönöm az eredményekkel kapcsolatos elismerő szavait. Kérdéseire és megjegyzéseire (ezeket dőlt betűvel jelöltem) az alábbiakban válaszolok.

1. 6. oldal, 3. bekezdés – A szöveg szerint a „kristályszerkezet szisztematikus és kontrollálható megváltoztatásának mindmáig egyik legprecízebb módja az ionimplantáció”. Kérem a jelöltet, hogy ezt más módszerekkel történő összehasonlítással indokolja.

Az ionimplantáció mellett a kristályszerkezet kontrollált megváltoztatásának másik általam ismert módja a lézeres kezelés [1,2]. Megfelelően megválasztott energiasűrűség használatával a minta megolvasztható, amorfizálható és kristályosítható. A módszer hátránya, hogy a fény behatolási mélysége erősen függ a hullámhossztól és a kristályszerkezettől [2], azaz például visszakristályosítás közben is változik a maximális energialeadás mélysége. Ionimplantáció esetében a processzási mélység pontosabban kézben tartható.

2. Két elírás: 9. oldal, 2. bekezdés - figyelembe, fegyelembe, 57. oldal első mondat - foglalkozok, foglalkozom.

Egyetértek az észrevételekkel, ezek az elírások sajnos benne maradtak a dolgozatban.

3. Az Irodalomjegyzék a 95. oldalon kezdődik, nem a tartalomjegyzékben megjelölt 106. oldalon.

Sajnos vakon bíztam a LaTeX tördelő program automatikus számozásában. Ami nyilvánvalóan megbízható is, így valószínűleg én futtattam le valamikor rosszul a tördelést elvégző forráskód lefordítását.

4. A 3.1 táblázat a 20. oldalon található, ráutalás egy fejezettel korábban 17. oldalon van. Hasonló esetek máshol (Isd később) is előfordulnak.

Ebben az esetben is a LaTeX tördelő program automatizmusaira bíztam magam. A bíráló által megjelölt esetekben célszerű lett volna ezeket manuálisan korrigálni. A problémát a legtöbb esetben az okozta, hogy a szöveghez képest sok volt az ábra, amelyek így a fejezetek végén feltorlódtak. Ellenkező esetben az oldalak kitöltésével lett volna probléma, amit talán az ábrák méretének hangolásával lehetett volna orvosolni.

5. Ábrák általában is, de pl. 3.10, 3.11 lehetnének nagyobbak. Nagyon sok információt tartalmaznak. Az elektronikus változatban felbontásuk elég jó ahhoz, hogy az olvasó felnagyíthassa, de a papír alapú változat ábráinak áttekintése emiatt problémás.

A bírálónak igaza van, hogy az ábrák mérete általában problémás. A dolgozat terjedelmi korlátozása miatt az ábrák méretének növelése számos ábra kihagyását jelentette volna, amit nem volt szívem megtenni, mert így is számos érdekes ábrát voltam kénytelen kihagyni a hivatkozott publikációkból. Abban bíztam, hogy a dolgozat döntően elektronikus formában kerül majd megtekintésre.

6. A 3.14 ábrán a szürkeshintek az üregarányt jelölik?

Igen. Az ábraalírásban ez sajnos csak "üregprofil"-ként szerepel. Célszerű lett volna itt ezt a mennyiséget üregarányként is megadni.

7. A 32. oldalon a második bekezdésben marószereként NaNO_2 szerepel a 4.1 ábrán HNO_3 . Miért?

Sajnos a 32. oldal második bekezdésben kimaradt a HNO_3 [3]. A mondat vége helyesen így hangozna: "50:1 és 500:1 között változó koncentrációjú $\text{HF}:\text{HNO}_3$ és kis mennyiségű (0,1-0,6 g/l) NaNO_2 alkalmazásával". (Ezért nem szerepel a 4.1 ábra aláírásában az NaNO_2).

8. A 4.3 táblázat nominális értékei honnan származnak?

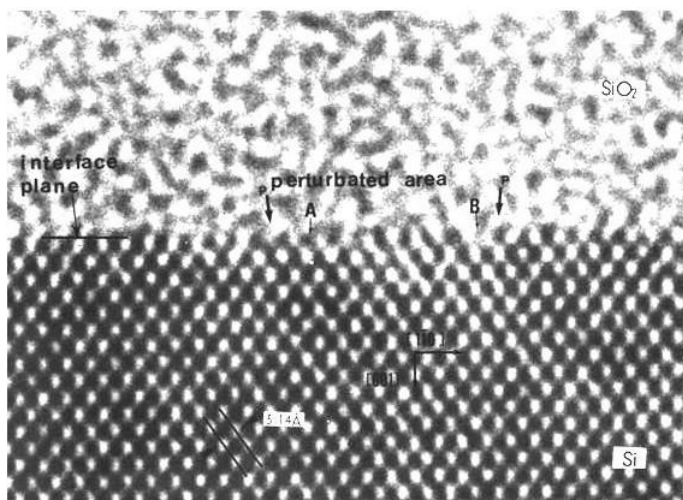
A nominális kristály méretek elektronmikroszkópos felvételekből származnak. Ezek a számok tartalmazzák az így készített porózus szilícium minták szemcseméretéről az irodalomban található (ugyancsak elektronmikroszkóppal meghatározott) adatokat is.

9. Mi a szerepe a 42. üres oldalnak? 56. és a 82. oldal is üres.

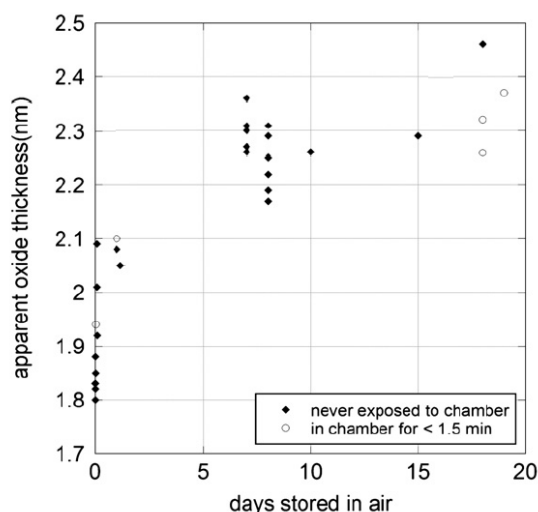
Ezek az oldalak azért üresek, mert véleményem (és az alkalmazott LaTeX sablon alkotói) szerint az értekezés strukturáltabbnak hat, ha a fejezetek mindig páratlan oldalakon kezdődnek. Ez az oldalszám korlátozás és az ábraméret problémák fényében valószínűleg pazarlásnak hat, és rámutat, hogy ezt a luxust nem feltétlenül lett volna szabad megengednem magamnak.

10. Hogyan képzeljük el az 5.1 ábrán szimulált 0,011 nm vastag SiO_2 réteget? Az 5.1 fejezet első bekezdésében említett néhány tízed nm-es oxid réteg pl. hány atomsor?

Ilyen anyag természetesen nincs, mert már a tízed nanométer is az atomok közötti távolságok tartománya. Az egykristályos szilícium rácsállandója 0,35, az amorf SiO_2 kötéstávolságai pedig 0,2 nm közeliek. A 0,011 nm egy elméleti vastagság érzékenysége, ami a műszer által mért ellipszometria szögek reprodukálhatóságából származtatható. Mivel azonban az ellipszométer makroszkopikus (milliméter) méretű folton mér, és a vékonyrétegek felülete és határfelülete általában nem atomi simaságú (1. ábra), a határfelület statisztikai, átlagos megváltozása esetében (pl. fehérjele választás, hőkezelés *in situ* mérése, felületi szennyeződés (2. ábra), vagy UHV-ben hasítással előállított egykristály felületére adszorbeálódó gázatomok, gázmolekulák esetében) van értelme ilyen kis effektív vastagságokról beszélni.



1. ábra: A Si és SiO₂ határfelülete nem atomi símaságú – laterálisan eltérő helyeken kisebb „lépcsők” találhatók benne, ami egy nagyobb folton mérve statisztikusan a határréteg vastagságának kis változásaként jelentkezik. [5]



2. ábra: Felületi szennyeződés időfüggése oxidált szilíciumon, szobalevegőn. [4] A tízedes nanométernél kisebb effektív vastagság változás a fedettségéről szolgáltat információt.

Fig. 7. This storage data come from 37 samples that were cleaned with the excimer lamp prior to being stored in air. Five samples were exposed to the organic contamination in the XPS chamber for less than 1.5 min; thus they started storage with an apparent oxide of about 1.9 ± 0.5 nm. 32 samples were never exposed to the antechamber; the apparent oxide was initially 1.83 ± 0.03 nm thick. Storage time varied from ten minutes to nineteen days. Of the 37 samples, all but six had an apparent oxide thickness ≤ 1.84 nm at the time the storage study started.

11. Az 5.2 táblázatban a $0,7 \pm 1,8$ nm rétegvastagság értékét hogyan kell érteni?

A $+1,8$ nanométer az illesztő algoritmusból származó matematikai érzékenység. Természetesen a negatív vastagságok fizikailag értelmetlenek, ezért talán célszerűbb lett volna itt a bizonytalanságot $0,7(+1,8,-0,7)$ nm formában megadni.

12. Az 5.4 és 5.5 ábra is néhány oldalt és egy fejezetet hátra csúszott.

Ez is a fent említett „ábra-torlódás”, és a LaTeX tördelő program kezelésében meglévő hiányosságaimra vezethető vissza.

13. A 6.3 ábrán a különböző szerzőktől származó kristályos és amorf SiC törésmutató eredmények különbségeinek a technológián túl lehet-e mérési módszer oka is?

A nyers mérési adatok (ellipszometriai szögek) jó reprodukálhatósággal meghatározhatók. Általában a szisztematikus mérési hibák (pl. beesési szög offset) is elhanyagolhatók. A hibát legtöbbször a mért spektrumok modellezése okozza. Én általában szkeptikus vagyok az irodalmi törésmutató referenciákkal, mert még ha tökéletesen reprodukálható szerkezetű tömbi mintákon készült is a referencia mérés, a felület hatásának (érdesség, natív oxid) megfelelő figyelembe vétele akkor is jelentősen befolyásolja a meghatározott értékeket. Ez a hatás azonban jelentősen kisebb (néhány százalék alatti), mint a 6.3. ábrán látható effektus.

14. 6.1 táblázat egy fejezettel hátrébb csúszott.

Ennek is a nagyszámú torlódó ábra és táblázat az oka, amivel a LaTeX tördelő nem tudott megbirkózni. A LaTeX tördelésénél tudtommal az első számú preferencia az, hogy a hivatkozott ábra semmiképpen ne kerüljön a hivatkozás helyénél korábbi oldalra. Ez esetben legalább ez teljesült, de az olvashatóság szempontjából mindenképpen kényelmetlen, hogy másik oldalra került az ábra.

15. A 6.4 ábrán az illesztett, folytonos vonalak szimulációból vagy csak görbeillesztésből származnak?

A 6.4 ábra folytonos vonalai szimulációból, vagyis optikai modellekből számolt spektrumok. Az ábra aláírásában szereplő „illesztés” megjelölés ezt valóban nem fejezi ki elég egyértelműen.

16. Milyen kémiai vegyületekből kerültek leválasztásra a 7.1 fejezetben a bárium stroncium titanát (BST) rétegek? Indokolhatja-e a 85-ös minta eltérő tulajdonságait az alacsonyabb leválasztási hőmérséklet?

Sajnos a projektben szereplő ipari partner, az AIXTRON nevű, fémorganikus leválasztó kemencéket gyártó cég nem bocsájtotta rendelkezésünkre a leválasztáshoz használt prekursor anyagokat. Tudtommal abban az időben ezek az anyagok a ferroelektromos memóriák, pl. pendrive-ok fontos anyagai voltak, ezért a gyártók igyekeztek a pontos recepteket lehetőleg kihagyni a publikációkból. Ez a körülmény az ebből született cikk kémiai folyamatok megértésére vonatkozó tudományos értékét feltétlenül csökkentette, azonban az optikai tulajdonságoknak az ionsugaras analitikával meghatározott összetétellel fennálló korrelációja így is hasznos eredményt szolgáltatott. A bírálóval egyetértésben én is úgy gondolom, hogy a 85-ös minta eltérő tulajdonságait elsődlegesen az alacsonyabb leválasztási hőmérséklet okozza.

17. Vizsgálták-e a 7.3 fejezetben vizsgált szén nitrid rétegek mechanikai tulajdonságait?

A szén-nitrid rétegek keménységének általunk mért értékekkel történő korrelációja feltétlenül érdekes és hasznos lett volna, de nekünk ezt akkor nem volt alkalmunk és lehetőségünk szisztematikusan elvégezni.

Mégegyszer nagyon köszönöm Dr. Jakab Lászlónak, az MTA doktorának a dolgozat bírálatát.

Hivatkozások

- [1] M. Füle, A Gárdián, J. Budai, Z. Toth, “Comparative Study of the Surface Nanostructure Formation on Different Surfaces Generated by Low Number of fs Laser Pulses”, J. Laser Micro/Nanoengineering. 10 (2015) 74–80. doi:10.2961/jlmn.2015.01.0014.
- [2] Z. Toth, I. Hanyecz, A. Gárdián, J. Budai, J. Csontos, Z. Pápa, M. Füle, “Ellipsometric analysis of silicon surfaces textured by ns and sub-ps KrF laser pulses”, Thin Solid Films. 571 (2014) 631–636. doi:10.1016/j.tsf.2013.10.102.
- [3] E. Vazsonyi, E. Szilagyi, P. Petrik, Z.E. Horvath, T. Lohner, M. Fried, G. Jaslovszky, “Porous silicon formation by stain etching”, Thin Solid Films. 388 (2001) 295–302.
- [4] E. Strein, D. Allred, “Eliminating carbon contamination on oxidized Si surfaces using a VUV excimer lamp”, Thin Solid Films. 517 (2008) 1011.
- [5] <http://aime.vareille.pagesperso-orange.fr/pages/ellipsometrie/faq-ellipso.html>

Budapest, 2015.10.05

Petrik Péter