

Válasz Prof. Pécz Béla opponensi véleményére

Először is nagyon köszönöm Prof. Pécz Béla részletes opponensi munkáját, a hasznos megjegyzéseit és kérdéseit. A felmerült megjegyzésekre és kérdésekre a válaszaim a következőkben olvashatók.

Kérdés 1:

19. oldal: miért veszi a hordozó kezdeti hőmérsékletét 40 C-nak?

Válasz: Ahogy azt az értekezésemben is megjegyeztem, „a kemencének némi előfűtő hatása van a hordozóra”, ami részletesen kifejtve a következőt jelenti: a hordozót a bemelegítés előtt már a kemence ablakánál lévő bemelegítési helyhez kell pozícionálni (2.3 ábra), ahol a hűtőkör ellenére a közeg hőmérséklete jóval a szobahőmérséklet felett van, ami hatással van a hordozó kezdeti hőmérsékletére. A 40°C egyébként egy specifikus paraméter a BME-ETT VPS kemencéjére nézve. Ez az érték nagyban függ az adott kemence kialakításától és attól, hogy mennyi idő telik el a pozícionálás és a bemelegítés között.

Kérdés 2:

A szerző számolja és méri a bemelegítés utáni hőmérséklet értékeket. Ennek kapcsán kérdezem: Bár el tudom fogadni a 2.5 ábrán látható számított és mért hőmérséklet értékekre vonatkozó magyarázatot, sőt meg kell jegyezni, hogy két görbén még lehetne ez szisztematikus mérési hiba, de az 50 mm-es magasság esetében ez a tendencia már nem áll fenn. A görbéknek két töréspontja van, melyikre gondol a szerző, amikor a szimuláció és a mérések közti nagyobb eltérésre utal?

Válasz: A 200-200s-nál elhelyezkedő töréspont utáni eltérésekre utalok. Az 50mm-es magasság esetén valóban némileg más a mért és számított értékek közötti eltérés, mint a 100 és 150mm-es magasságokban. Az 50mm-es magasságban, amely magasság által meghatározott térrészben egyébként a forrasztási folyamat történik, a számított és mért értékek sokkal jobban követik egymást, mint a kemence felsőbb részeiben, mivel ahogy haladunk a kemence ajtaja felé, a csekély mértékű hővesztés hatása láthatóvá válik (2.5a ábrán) a számított és mért értékek különbségében.

Kérdés 3:

2.10 ábra. A gőztérben jelenlevő teljes gőz mennyiség nagyobb a gyorsabb bemelegítés esetén. A bíráló jól gondolta-e, hogy ez előnyös?

Válasz: Igen, így van, mivel ezáltal a forrasztás „ütem-ideje” csökken, azaz kevesebbet kell várni egy forrasztás befejeztével a következő forrasztás megkezdésére, mivel a kemence munkatere hamarabb kerül ismételt telítődési állapotba.

Megjegyzés 1:

A 2.4 fejezet első mondata zavaróan hibás.

Válasz: Ezzel a mondattal csak arra szerettem volna célozni, hogy a modell még pontosabbá tehető a dinamikus kondenzátum réteg alkalmazásával, amit a 2.4 fejezetben tárgyalok.

Kérdés 4:

30. oldal: A hiba a dinamikus kondenzátum réteg alkalmazásával csökken 5%-ról 1-re. Szép eredmény, de nem 1,71% volt a hiba a statikus kondenzátum modellben?

Válasz: A 2.3 fejezetben az 1,71%-os relatív hibát adtam meg, míg a 2.4 fejezetben az 5%-os abszolút hibát. Azzal, hogy a relatív hibaszámítást abszolútra cseréltem, nem volt céлом az olvasó összezavarása, vagy az eredmények „szépítése” (amire semmi szükség nem lett volna a kicsiny eltérések miatt), egyszerűen csak az egyes kapcsolódó publikációimban megjelent adatokat adtam meg változatlan formában.

Megjegyzés 2:

2.14 ábra környékén írja a rétegvastagság csökkenése meg inkább felgyorsul. Talán elegánsabb lenne a felgyorsul helyett fokozódik.

Válasz: Egyetértek.

Kérdés 5:

A 2.15-ös ábra három dimenziós és szép, de az értelmezést könnyebbé tehetné volna egy, vagy két metszet közlése, azaz kétdimenziós ábra. Ha jól értem a sarkokban a legvastagabb a mintadarab alsó felén a kondenzátum, azaz a folyékony forrasztóanyag. 4s alatt eléri a 0,7 mm-t. Ez rendben van, de a réteg közepén egy nagy gödröt vélek látni. Ez hogyan magyarázható kvalitatív képpel?

Válasz: Ezzel az ábrával a céloom inkább csak az alsóoldali folyamatok szemléltetése volt és nem mély elemzések elvégzése (arra sokkal inkább a 2.16-os ábra szolgál). Az alsóoldali kondenzátum réteg a fentről lefolyó kondenzátum miatt és később a csepegés következtében „sztochasztikus módon” viselkedik a felsőoldali kondenzátum réteghez képest, amit a 2.16-os ábra ténylegesen kvantitatív eredményei is mutatnak. Valóban igaz, hogy amíg a fentről lefolyó kondenzátum mennyisége nagy (különösen a folyamat első felében), addig a széleken vastagabb a kondenzátum réteg, mint a hordozó közepén.

A gödröt én a digitális verzióban nem látom, elképzelhető hogy csak nyomtatási hiba, a védésen megvizsgálhatjuk nagyfelbontású ábrán!

Kérés 6:

38. oldal: Hogyan kell érteni azt, hogy a megemelt sarkokban a kondenzátum felfelé folyik?

Válasz: Ez egy érdekes jelenség, kis szögű megdöntések esetén a hordozó megemelt szélénél a hidrosztatikai nyomáskülönbségből származó gyorsulás egy ideig nagyobb, mint a gravitációs gyorsulás adott (x, y) komponense (2.35-ös egyenlet bal oldalának első két tagja). Ez azt eredményezi, hogy a megemelt szélén is lefolyik némi kondenzátum, mielőtt az áramlás teljesen a süllyesztett szél irányába fordulna.

Kérdés 7:

A hordozó globális hőmérséklet különbségén dT -n a két felület hőmérsékletének különbségét kell-e érteni?

Válasz: Definíció szerint a „ dT ” a forrasztott hordozóban kialakuló maximális hőmérséklet különbség értéke a forrasztási folyamat során. Jelen esetben a szimuláció sajátosságai miatt (a megdöntött hordozónál már csak a felsőoldali kondenzátum réteget vizsgáltam a hordozó felső részével együtt), csak a hordozó felső részében kialakuló maximális hőmérséklet-különbségre utal.

Kérdés 8:

Mivel magyarázza, hogy az egyes anyagok hővezetési tényezője csekély hatással van a lokális hőátadás tényezőre? Hogyan alakulna ez mondjuk grafénnel borított hordozó esetén?

Válasz: Természetesen a fenti kijelentés nagyban függ az adott hordozó anyag hővezetésének nagyságrendjétől. Vizsgálataim során - praktikus okokból - az iparban használatos hordozó anyagokra koncentráltam, amelyek hővezetési tényezője az alacsonyabb értékek közé tartozik (max. 18W/m.K az Alumina 94% esetén), így nem igazán befolyásolta a hőátadási tényezőt. Mindezek alapján a grafén esetében, valószínűleg ez egy merőben más kérdés lenne, viszont ilyen alkalmazás egyelőre nincs.

Kérdés 9:

A 2.5 fejezetben a gőz viselkedését összenyomható folyadékként írja le. Miért használja ezt a kifejezést az összenyomható gázokkal szemben?

Válasz: Fordítási hiba, ezt a szót az angol terminológiából vettem át, ott a „fluid” szó lehet bármi (folyadék, gáz, plazma), ami nem szilárd. Helytelenül fordítottam magyarra, természetesen itt gázzal van szó.

Kérdés 10:

Az első igazi forrasztásnál, 2.5.2 fejezet a GALDEN LS230-at használta, míg korábbi vizsgálatai főleg a Galden 170-esre szorútkoztak. Mi ennek az oka?

Válasz: A kemencemodell megalkotásakor – az elektronikai technológiában relatíve alacsony forráspontúnak számító – HT170 használatát az indokolta, hogy lerövidítsem a mérésekhez szükséges időt, mivel ebben az esetben a felfűtési és lehűtési ciklusok jóval rövidebbek voltak, mint az elterjedten alkalmazott, de magasabb (230–240°C-os) forráspontú folyadékoknál. A vákuumos VPS technológia vizsgálatánál már nem kellett elvégezni a kemence felfűtésének elemzését (mivel azt korábban megtettem), hanem csak az alacsony nyomáson történő zárványeltávolítás vizsgálatát, így itt már alkalmazhattam bármilyen forráspontú Galden folyadékot.

Kérdés 11:

A 2.30 ábra tárgyalásakor zárványok eltávolításáról beszél. Olvasatomban a gőztér leszívására az üregek kialakulásának megakadályozása miatt van szükség. Ha jól értem üregekbe bezárt gázokat hív zárványnak, ami nem a legjobb kifejezés.

Válasz: Az angol terminológiában „gas void”-nak nevezett jelenséget a magyar terminológia „gáz zárványként” ismeri, ezért én is így használtam. Az üregek (zárványok) sajnos már a gőztér leszívását megelőzőleg kialakulnak a forrasztott kötésekben, amiatt, hogy a folyasztószer gázok nem tudnak teljes mértékben eltávozni a kötésből. Ez minden más újraömllesztési forrasztási technológiára igaz, viszont a VPS esetén fokozottan (ennek okait az értekezésben tárgyalom). Az alacsony nyomás előállítása így nem a zárványképződést akadályozza, hanem a már kialakult zárványok eltávolításában segít, a még megömlött állapotban lévő forraszból.

Kérdés 12:

59 oldal a JEM 9320 FIB, illetve az ion mikroszkópként említett JEM 9320 SIM gondolom u.a. készülék lehet, amely Ga ionokkal pásztázza a felületet és készít képet a legjobb esetben (30 keV) 6 nm felbontással. Ha nem így van kérem javítson ki.

Válasz: Igen, a kettő egy és ugyanaz.

Kérdés 13:

A 3.1 táblázat adatai felvetik azt a (nem irreális) jelenséget, hogy az intermetallikus fázisok, már a rétegek leválasztása alatt kialakulnak egy vékony réteg formájában. Ezt a 3.1 ábra tárgyalásakor a szerző is megjegyzi. Mekkora ezek tipikus vastagsága?

Válasz: Cu_6Sn_5 esetében 200-400nm, míg a Ni_xSn_y esetében 100-200nm.

Megjegyzés 3:

A 3.7 ábrával kapcsolatban megjegyezném, hogy a vékony Ni_3Sn réteg apró szemcsékből áll és az a) ábrán polikristályos diffrakciót ad, melyhez egy nagyméretű nikkell szemcse diffrakciója adódik. Ezek után számomra ugyanezen fázis reflexióinak intenzitása a b) ábrán meglepő, feltételezve persze, hogy a diffrakciókat ugyanakkora területről, ugyanakkora térhatároló blendével készítették. A c) ábra természetes, hogy egykristály jellegű Ni_2Sn_4 diffrakciót mutat, hiszen a nagyméretű szemcse a felvételen is látszik.

Válasz: Sajnos apró hiba csúszott a diffrakciós ábrák kiértékelésébe. A 3.7b ábrán szereplő Ni_3Sn -nek tulajdonított diffrakciók valójában a Ni_3Sn_4 -hez tartoznak, mivel annak is vannak reflexiói ezen a helyen, ahogy az a 3.7c ábrán is látszik. Mindezek alapján a 3.7b ábrán a Ni_3Sn (200) valójában Ni_3Sn_4 (111), a Ni_3Sn (202) pedig Ni_3Sn_4 (42-1).

Kérdés 14:

A 3.8.a felvételen a Ni (200)-nak nem kellene közelebb lennie a direkt nyálákhöz/középponthoz, mint a Ni(220)-nak?

Válasz: Természetesen igen, az ábrafeliratozásba csúszott sajnos hiba.

Kérdés 15:

Whisker tesztek és eredmények. Nagyon jó ha a képződött whiskerek száma alacsony, mondjuk 1, azaz egy a vizsgált 5x5 mm² területen, de egyetlen whisker is tönkretelheti-e az elektromos eszközünket?

Válasz: Természetesen igen, akár egy hosszabb whisker által okozott rövid idejű rövidzárlat (a whisker a rövidzárlat során általában elég) is tönkre teheti az érzékenyebb szilícium alapú chipeket.

Kérdés 16:

A 3.11 c illetve d ábrákon nem látom a központi nyaláb helyét. Hogyan lehetséges ez? Mivel megadja a zónák (a kifele mutató irány) indexeit ezért ezeknek ki kell jönniük a diffrakciós kép bármelyik két reflexiójának Miller indexeit vektor szorzatként összeszorozva. Ez teljesül is a d) ábrára, de az a) ábrára nem. A kérdésnek jelentősége van, hiszen kifejti, hogy a whisker orientációja mindig különbözik a környezetében levő szemcsékétől, így kérem ennek tisztázását.

Válasz: A minták kicsit vastagabbak voltak a kelletténél így a felvételek kontrasztja gyenge lett, ezért csak nehezen kivehető rajtuk a központi nyaláb helye. A tisztelt Opponens a c) ábrát vitatja és nem az a)-t, mivel az a) nem diffrakciós ábra, de igaza van. A c) ábrán a zóna index helyesen [0 -2 1] és nem [0 1 -2], sajnálatos elírás.

Kérdés 17:

72. oldal: Vákuumpárologtatás. Miért a teljesítményt adja meg? Mekkora volt a hordozó hőmérséklete a párologtatás közben? Reális-e a rétegvastagságnál jóval nagyobb szemcseméret?

Válasz: A párologtatással kapcsolatban a következő adatokat adtam meg: „Az alkalmazott katód-fűtő áram 100mA volt 7kV gyorsító feszültség mellett.”

A hordozó szobahőmérsékleten került a párologtató berendezésbe, ami csapvizese hűtésű. A hordozó hőmérsékletét nem mértük a párologtatás során, ami nyáron történt. Így a hűtővíz hőmérséklete 15-18°C lehetett. Ennek alapján véleményem szerint sikerült a jó hővezető réz hordozó hőmérsékletét szobahőmérséklet körül tartani.

Ahogy a 3.15a és 3.16a ábrákon is látszik, a réteget sok esetben nagy és lapos szemcsék alkották, azonban részletesebben megvizsgálva a kutatásról készült összes SEM, FIB és TEM felvételen a szemcsék méretét, az 1–1.5µm-es szemcseméretet némileg túlbecsültem, az inkább csak 0.4–1µm közé esik.

Kérdés 18:

3.15 ábra: Ha az M2-es pont a whisker alatt van, akkor hol van a whisker az ábrán?

Sajnos a 3.15c ábrán érthetetlen, hogy az Sn-nak hogyan szerepelhet (egy szemcséből) két reflexió ugyanazzal az index-el, (220). Ha két reflexió távolsága ugyanakkora, akkor egyik lehetne pl. 2, -2, 0, mert tetragonális rendszerben ezek ugyanakkorák, a 0, -2, 2 (ez kellene a feltüntetett összeghez, valószínűleg tiltott) viszont különbözik. Ez a probléma végigvonul a d) és e) ábrákon is. Az e) ábrán a Cu₆Sn₅ két reflexiója is (112)-ként szerepel, de ott nyilvánvalóan

az egyiket -1,-1,-2- ként kell jelölni. Ebben az esetben a Cu_3Sn azonosítása sincs kellően alátámasztva, mert a diffrakcióban, ha jól értem, (különösebben nem fejt ki), egyetlen polikristályos reflexiót tulajdonít ennek a fázisnak, ami egybeesik a Cu_6Sn_5 egyik reflexiójával. Elhiszem, hogy az összeszínezett EDS térképen különböző összetételű lehet ez a tartomány, de ilyenkor az elemtérképeket valahogy külön egymás mellé téve is be kellene mutatni. A kutatóban annak a kérdésnek is fel kell merülnie, hogy ha egy fázisról elektrondiffrakciós felvételt készít, akkor annak miért csak ez egyik reflexióját látja.

Válasz: Az M1 szemcse van a whisker alatt, az M2 már maga a whisker, nem volt megfelelő a mondat megfogalmazása, csak arra szerettem volna utalni, hogy mind az M1, M2 és M3 szemcse egykristály.

Indexelés problémával egyetértek, a tisztelt Opponensnek igaza van, nem voltam elég precíz ezen a téren. (Általánosságban a „whisker szakma” sokszor pongyola a diffrakciós jelölésekkel, ezt sajnos én is eltanultam az évek során.)

A 3.15e ábrán a Cu_3Sn esetében csak meg szerettem volna jegyezni, hogy az adott helyen annak a fázisnak is van reflexiója, mivel ha kicsit bentebb mértem volna a rétegben, akkor valószínűleg már inkább a Cu_3Sn látszott volna (ahogy az Cu/Sn intermetallikus réteg klasszikus felépítse alapján várható).

Kérdés 19:

Az indexelési problémák a 3.16-os ábrán tovább folytatódnak. A d) felvételen a központi nyaláb (000) kijelölése is kétséges, mivel itt nincs kitakarás (mint pl. a következő felvételen) a legerősebb foltnak kell lennie a központi nyalábnak. A másik két felvételen ez biztosan helyesen van jelölve. Visszatérve a d) felvételre, az (110) és az (111) összege nem (112). Ugyanez a probléma az e) felvételen is felfedezhető. Kicsit előre ugorva megjegyzem, hogy a A 3.23 ábra SAED felvételein az indexelések helyesek.

Válasz: A központi nyalábbal kapcsolatban igazat adok a tisztelt opponensnek, a 3.16d) ábrán található jelölések együttesen elcsúsztak lefelé egy lépést az ábrán.

A 3.16d) ábra újbóli vizsgálata során megállapítottam, hogy a Cu_6Sn_5 (112)-ként jelölt reflexió tévesen lett azonosítva, valójában (221). Szerencsére, ez a közölt eredményeket más tekintetben nem befolyásolta.

Kérdés 20:

Az interfészfolyás jelenségét különösnek találom. Mindenki tudja, hogy a szemcsehatárok menti diffúzió nagyon gyors, sokszorosa a tömbi diffúciónak. Ezzel nem magyarázható-e a whiskerekbe beépült réz mennyisége?

Válasz: Az interfész folyás elméletét nem is igazán a whiskerek belsejében található réz mennyiség miatt látom indokoltnak, hanem a whiskerek olyan gyors növekedése miatt, amit a szemcsehatár diffúzió sem képes létrehozni, ahogy azt az értekezésemben kifejtettem:

„Mindössze 15 nappal a rétegfelvitel után a leghosszabb detektált whisker 180 μm -es volt, amely alapján lényegesen nagy, 0,5 $\mu\text{m}/\text{h}$ -s átlagos növekedési sebességet lehet feltételezni (a szaturációs jellegű növekedés miatt a maximális sebesség valószínűsíthetően ennél is nagyobb volt). A klasszikus whisker növekedési modellek, amelyek a jelenséget szemcsehatár diffúzióval [3.93], szemcsehatár elcsúszással vagy migrációval [3.94] magyarázzák, nem tudnak magyarázatot adni ilyen gyors növekedési sebességre. A klasszikus modellek alapján számított maximális növekedési sebesség 0,03 $\mu\text{m}/\text{h}$ [3.95], míg kísérletileg ennél némileg

nagyobb $0.04 \mu\text{m/h}$ értéket tapasztaltak [3.96]. Ennek magyarázatára vezette be Tu és Li az ún. „szemcsehatár folyás” elméletét [3.96], amit Cheng et al. [3.50] és Howard et al. [3.93] továbbfejlesztettek az ún. „interfészfolyás” elméletévé. Céljuk annak magyarázata volt, hogy hogyan képesek az ónatomok a klasszikus modellekkel megmagyarázhatatlanul nagy tömegáramra, a bázis és az ónréteg határán. Cheng et al. az interfészfolyás jelenségét szilíciumra vákuumpárolgatott, króm köztesréteggel ellátott ónrétegeken bizonyították. A képződött whiskerek olyan nagy mennyiségben tartalmaztak krómot, ami szimpla diffúzió útján nem lenne lehetséges.”

Egyébként az ón vékonyrétegből történő whisker növekedési kísérleteim jelenleg is zajlanak, elképzelhető, hogy a védésen további érdekes eredményekkel is alá tudom támasztani a fenti hipotézisemet.

Kérdés 21:

Nem értem, hogy a 3.20 ábra alatt (SAC forrasanyag) miért írja, hogy „A jelen tesztnél mind a detektált whiskerek átlagos sűrűsége, mind az átlagos hossza elmaradt a 85°C/85RH% tesztnél tapasztaltaktól.” Ennek a kijelentésnek (ami nem is logikus) ellentmond a 3.4 Táblázat. Fel tudja oldani ezt az ellentmondást?

Válasz: A 3.19 és 3.20-as ábrán az átlagok (hossz és sűrűség) összehasonlítása történik meg. Ahogy az az ábrákról leolvasható, a 85°C/85RH% teszt (3.19 ábra) esetében mind a keletkezett whiskerek átlagos száma ($\sim 35\text{db}/0.04\text{mm}^2$), mind az átlagos hosszuk ($25\mu\text{m}$) jóval nagyobb volt, mint a 105°C/100RH% teszt (3.20 ábra) esetén (rendre $10\text{db}/0.04\text{mm}^2$ és $3\mu\text{m}$). A 3.4-es táblázat viszont a két teszt során globálisan detektált leghosszabb whiskerek hosszát tartalmazza. Az lehet zavaró, hogy igazából kár volt a táblázatba szerepeltetnem a 105°C/100RH% tesztet, mivel a leghosszabb whiskerek minden esetben a 85°C/85RH% teszt során képződtek.

Kérdés 22:

Ha egy whisker nodule/spirál alakú, akkor mit ért a hossza alatt és hogyan méri?

Válasz: A whiskerek hosszát minden esetben a kezdő és végpontjuk közé illeszthető egyenes hosszával határozzuk meg, mivel ez az érték mutatja számunkra, hogy rövidzár képződés szempontjából mennyire veszélyesek.



.....
dr. Illés Balázs György

Budapest 2018.12.19