

Válasz Dr. Mizsei János Bírálataira

Nagyon köszönöm Dr. Mizsei János Prof. Úrnak akadémiai doktori értekezésem körültekintő, gondos bírálatát, valamint a bírálatában megfogalmazott kritikus és méltató véleményét. Bírálóm értekezésemmel kapcsolatos megjegyzéseire, kérdéseire az általa megválasztott sorrendben válaszolok.

1.) Az értekezés szerkesztése eltér a szokásostól, amit a három, egymással lazán összefüggő tématerületen végzett munka ismertetése indokolhat. Ennek a szerkesztési módszernek a következménye, hogy az értekezés lényegében három kisebb értekezés, esetleg korábbi kutatási jelentés, vagy munkabeszámoló egybefűzése, melyek önállóan, a többitől függetlenül is olvashatók, értékelhetők.

Értekezésem vezérfonala a vékonyrétegek sokoldalú, számos szakterületen alkalmazható fizikai-kémiai tulajdonságainak kutatása, amit jelentős részben a vizsgálatok hatékony elvégzéséhez kifejlesztett innovatív megoldásokkal végeztem. Emiatt van a hármas tagolódás:

Az 1. fejezetben új kutatás-módszertani ill. műszaki megoldásaimat, köztük két szabadalmamat ismertetem, amelyeket sikeresen alkalmaztam jelen értekezés célkitűzéseinek megoldásában is. A 2. fejezetben a Világegyetem keletkezési elméletében feltételezett "Sötét Anyag" kimutatására kidolgozott wolfram vékonyréteg szupravezető fázisátmenet részecske-detektorok fejlesztési kérdéseivel foglalkozom, a W-vékonyrétegek előállításának és tesztelésének innovatív kísérleti technikáját és annak alkalmazását tárgyalom. A 3. fejezetben pedig a két- és háromkomponensű vékonyrétegszrendszerek összetétel-függő tulajdonságainak feltárásában, a saját-fejlesztésű, mikrokombinatorikus vizsgálati módszerrel elért eredményeket mutatom be.

2.) Az 1. sz. dolgozat (első fejezet) címe (ÚJ MÓDSZEREK ÉS MŰSZAKI MEGOLDÁSOK VÉKONYRÉTEGEK HATÉKONY ELŐÁLLÍTÁSÁRA ÉS TEM VIZSGÁLATÁRA) valamelyest félrevezető. A „vékonyrétegek hatékony előállítása” nem értelmezhető a dolgozat alapján. Így ez a fejezetcímből kihagyható lenne. A szerző valószínűleg a fejezet végén tárgyalt módszerre gondolt a címadás során, ahol a változó anyagösszetételű rétegek leválasztását tárgyalja.

Az értekezésben tárgyalt innovatív módszerekkel nemcsak a vizsgálat, de véleményem szerint az azt megelőző rétegelőállítás is hatékonyabbá válik. E két dolog ráadásul egymást feltételezi.

A TEM mintapreparálás -a mintavékonyítás- is tekinthető vékonyréteg előállításnak. Amikor a hagyományos eljárás hibáit kiküszöbölő megbízható, törésbiztos síkvékonyítási módszert alkalmazunk, vagy a FIB lamella ill. MEMS készítésekor a korábbi konstrukciónál egyszerűbb, a mintához kíméletes, mintabefogót használunk, akkor kevesebb selejttel, könnyebben, gyorsabban készíthetjük el a TEM mintát, vagyis hatékonyabbá válik a vékonyítás.

A mikrokombinatorikus technikával pedig az egyminta elv szerint készítünk vékonyréteget úgy, hogy az eltérő tulajdonságú mintarészeket egymás mellett rendezzük el a hordozón – a 3 mm-es TEM rostélyon, vagy 25 mm hosszú hordozólapkán. Ezzel egyetlen rétegnövesztési kísérletben, egyetlen hordozón számtalan - terv szerint változó tulajdonságú réteget készítünk. Az egyminta elvű kombinatorikus mintakészítés, tehát hatékonyabb az egyedinel, a gradiens minta pedig összetettségénél fogva leegyszerűsíti, hatékonyabbá teszi a kétkomponensű vékonyrétegek átfogó vizsgálatát. Fentiek miatt került a fejezetcímbe: hatékony előállítás és hatékony vizsgálat.

3.) Ez a kétségkívül jól kidolgozott módszer azonban nem új, hasonló módszereket két évtizede használtak pld. a vezérlőelektróda kilépési munka megfelelő értékre való beállításához a CMOS rendszerek megvalósítása során.

Tisztelt Bíráló saját szakterületéről említ egy érdekes és tanulságos példát. Remélem, hogy az irodalomban végzett keresés során ugyanarra a technológiai lépésre gondolunk ahol egyedi CMOS struktúrákban különböző mértékű nitrogén implantálással módosították, a Mo-gate elektród kilépési munkáját [1]. A leginkább ideillő közleményekben pedig Jörgen [2] különböző diszkrét parciális nyomású, valamint Sjöblom [3] változó parciális nyomású N₂/Ar beeresztés mellett reaktív porlasztással állított elő különböző kilépési munkájú TiN_x vezérlő gate elektródát CMOS szerkezetű mintákban. Ezekben, véleményem szerint nincsenek az értekezésemben tárgyalt módszerek újdonságát megkérdőjelező elemek. Munkámban az újdonság nem önmagában a változó összetételű porlasztógáz alkalmazásában rejlik hanem, hogy a vizsgálni kívánt változó összetételű Hf-ON rétegrendszer előállításához szükséges igen kismennyiségű -1 sccm alatti- gázbeeresztést és annak szabályozását sikerült megvalósítani, egy innovatív - perisztaltikus szivattyúból és véges térfogatú tartályból álló- rendszerrel. A CMOS gate manipulációjáról szóló fenti publikációkban a gate elektródok tulajdonságait, 6-20 sccm tartományban, gyári eszközzel szabályozott nitrogén beeresztéssel módosították. Az új megoldásra azért volt szükségünk, mert a mintaelőállításához az oxigénbeeresztést 0-1 sccm között kellett szabályozni, ami kívül esik az általunk használt standard gázbeeresztők szabályozási tartományán. Emiatt a Hf-oxinitridnek az oxidtól a nitridig terjedő széles összetétel-tartományát reprezentáló mintát nem lehetett volna hagyományos gázbeeresztőkkel előállítani. Véleményem szerint, a 3.4 tézispontba foglalt innovatív gázbeeresztési megoldás, ami egyáltalán lehetővé tette a változó O-N tartalmú kombinatorikus Hf-O-N minta előállítását és ezzel új tudományos eredmény elérését, már önmagában is tézisértékűnek tekinthető. A 3.4 tézispont további része: a reaktív porlasztógáz összetétel-változása-, a Hf-O-N réteg összetétel-változása- és az optikai tulajdonságok közti összefüggések feltárása és elsőkénti publikálása pedig kétséget kizáróan tézisértékű, új tudományos eredmény.

4.) Az első téziscsoport lényegében a szerző feltalálói tevékenységét foglalja össze, ennek megfelelően a tézisek megfogalmazása kevésbé tézisszerű, inkább a szabadalmi leírás stílusa érződik a szövegekből. A második téziscsoport a műszerfejlesztés során nyert tudományos eredményeket foglalja össze. A harmadik téziscsoportban vegyesen található tézis-szerűen bemutatott tudományos eredmények és a korábban fejlesztett módszerek rutinszerű alkalmazásával nyert értékes, de új tudományos eredménynek nem tekinthető adatok.

A Tisztelt Bíráló 3. téziscsoportról szóló utolsó mondatának első részével egyetérték, de vitába szállok a mondat végén megfogalmazottakkal.

A „tézisszerűen bemutatott tudományos eredmények” megfogalmazás teljesen elfogadható számomra, a „korábban fejlesztett módszerek rutinszerű alkalmazásával nyert értékes ...adatok” minősítést dicséretként - az egyminta elvű kombinatorikus vizsgálati módszer elismeréseként könyvelhető el: Ha valamilyen tudományos vizsgálati módszer értékes adatokat szolgáltat és rutinszerűen alkalmazható, akkor az a módszer jó. Ezzel nem vitatkozom. Amivel azonban igen, hogy a SiGe:H- valamint a Hf-O-N rendszerre vonatkozó tézisekben foglaltak csupán értékes adatok lennének, amelyek nem tekinthetők új tudományos eredménynek!

Az amorf Si-Ge:H rendszert számos szerző vizsgálta, eltérő kísérleti körülmények között készült diszkrét összetételű, egyedi mintákban. Jelen kutatás eredményeként, azonban az irodalomban először készült azonos, ellenőrzött kísérleti kondíciók mellett előállított mintákból az anyagtulajdonságokat a teljes összetétel-tartományban, igen jó koncentráció felbontással leíró munka, és adatbázis is. És ez nem csak adathalmaz, hiszen a vizsgálat ill. publikáció feltárja és összefoglalja a rétegek előállítási paraméterei, összetétele, szerkezete és optikai tulajdonságai közötti összefüggéseket, a szerkezeti, kémiai-fizikai tulajdonságokat

meghatározó mechanizmusokat. Emellett a tudományos kutatásban és a technológiában egyaránt hasznos információkkal szolgál az a-Si-Ge:H vékonyréteg rendszer alkalmazhatósági tartományairól és a kívánt rétegtulajdonságokhoz hozzárendelhető előállítási paramétereiről. Ugyancsak tudományos eredménynek könyvelhető el, hogy az a-SiGe:H rendszer átfogó vizsgálatai alapján meg lehetett mutatni, hogy az ezeket az amorf félvezető rétegeket stabilizáló, a nanopórusaikban lévő lógó kötéseket (dangling bonds) passzíváló hidrogén beépült mennyisége egyenesen arányos a réteg Si-koncentrációjával. Továbbá, a mikrokombinatorikus technikának köszönhetően az egy hordozón, egy szintézisben létrehozott gradiens minta vizsgálatával a különböző összetételekről konzisztens mérési eredményeket kapunk, amelyek reprodukálhatósága kiemelkedő, szemben a különböző forrásokból, nem összehasonlítható körülmények között kapott eredményekkel.

A 3.3.1 tézisben az irodalomban először került megállapításra, hogy az a-Si_{1-x}Ge_x rétegben a legközelebbi atomszomszédok távolsága a teljes Si-Ge összetétel-tartományban a Vegard-szabályt követi, és az attól való eltérés a Si szelektív oxidációjából fakad. Mindez új tudományos eredmény, technológiai vonatkozásokkal; felhívja a figyelmet, hogy a felületi oxidáció Si kiürülést okoz és ezzel a SiGe réteg tulajdonságainak megváltozását.

A Hf-oxinitrid rétegrendszer vizsgálata (3.4 tézis) -ahogy a fenti 3. pontban már említettem- is jócskán hozott új tudományos eredményt. A Hf-oxinitridről -a mikroelektronikai eszközök új, ígéretes dielektrikumáról- még csak elvétve találunk közleményeket. Jelen munka meghatározta a rétegösszetétel változását a reaktív porlasztógáz oxigén- és nitrogén tartalma függvényében, és ezzel összefüggésben -először az irodalomban- feltérképezésre került az optikai törésmutató változása a sztöchiometrikus Hf- oxidtól a Hf-nitridig terjedő teljes összetétel-tartományban, ami új tudományos eredmény, fontos technológiai vonatkozásokkal.

Kérem a Tisztelt Bírálót, hogy szíveskedjék, fenti érvelést figyelembe véve megfontolni a 3.3.1 ill. a 3.4 tézispontok új tudományos eredményként való elfogadását!

Bíráló további, oldalszámokkal azonosított megjegyzései:

12. o. címsorban: „műszaki”

21. o. tunnelezés: alagutazás

22. o. az egyenletben szereplő mennyiségek nincsenek megadva

23, 25. o. misfit: illesztetlenség, illeszkedési hiba

27. o. natív oxiddal: természetes oxidréteggel

37. o. XTEM rövidítés nincs feloldva:

47. o. eltérő betűszínek: „reprodukálhatóságot és”

54. o. a lap fejléce (dc_1840_20) összecsúszott az ábrahivatkozással

A 12.old. címsorában szereplő „szolgálati találmány” megnevezés itt jogi értelemben használt kifejezés: a kutatóintézeté a szabadalom tulajdonjoga.

21, 23, 25. old.: Köszönöm Opponensemnek, hogy felhívta a figyelmemet a felsorolt nyelvi hibákra és hiányosságokra! Az MTA doktori értekezésben természetes elvárás a magyar nyelv használata, a jellemzően angolul használatos szakkifejezéseknél is.

A javasolt magyar szóhasználatot mindegyik esetben elfogadom, lásd: tunnelezés-**alagutazás**, misfit -**illeszkedési hiba**, natív oxid- **természetes oxidréteg**.

22. oldalon a hiányzó paraméterek megadása:

A SQUID -en átfolyó áramsűrűség

$j = \hbar \kappa / m |A||B| \sin(\delta_B - \delta_A)$ ahol:

\hbar : redukált Planck állandó (Dirac állandó): $h/2\pi = 6,582\ 119\ 570 \times 10^{-16}$ eV s

κ : hullámszám

m : elektron tömege

$|A||B|$: az előremenő ill. visszavert hullámamplitúdó abszolút értéke

$\delta_B - \delta_A$: kvantummechanikai fáziskülönbség

37.o.: XTEM kifejtése: keresztmetszeti TEM

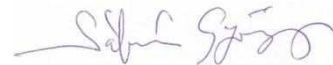
5.) A szerző egyesszám első személy és többes szám első személyben fogalmaz, ez esetenként egy oldalon belül is változik. Ha ezt következetesnek tekintjük, akkor jelezheti a saját és a közös munka arányát. Megfelelő nyilatkozatokkal azonban a saját munka aránya jobban becsülhető lenne.

Tagadhatatlan, hogy ma az anyagtudományi kutatás nem a világtól elvonult magányos tudósok elhivatott, ám kevésbé hatékony munkáján, hanem munkamegosztáson, a különböző tudományterületek művelőinek együttműködésén alapszik. Ennek megfelelően számos szakterület kiváló kutatójával együttműködve végeztem a kutatásaimat, és velük közösen publikáltam az eredményeket. Az értekezés eredményeinek létrehozásában részt vett, közreműködő kollégákat és feladataikat a „Köszönetnyilvánítás” fejezetben nevezem meg. Részvételük kifejezésre jut továbbá a vonatkozó tudományos közlemények szerzői listájában is. A kutatómunka során a feladatom -szakterületemnek megfelelően- a vékonyréteg minták előállítása, transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) - és kapcsolódó analitikai vizsgálata – STEM, SAED, EDS, EELS, ill. az elektromos mérések elvégzése volt. A további analitikai vizsgálatokat -RBS, ERDA, SEM, SEM-EDS, spektrális ellipszometria, nanoindentáció stb.- az adott területeken szakértő kollégák végezték. Az eredmények értékelése, a következtetések levonása a kutatási feladatban résztvevő, hozzáértő kollégák bevonásával történt.

Válaszomat a következő megjegyzéssel zárom: természetesen tisztában vagyok azzal, hogy az értekezés – tárgykörénél, témájánál fogva – nem tarthat igényt teljességre; ha van számos tudományterületet átfogó, kimeríthetetlen problémakör, akkor az az anyagtudomány, és azon belül a vékonyrétegek kutatás.

Még egyszer köszönöm Opponensemnek a bírálatot és tisztelettel kérem válaszom elfogadását.

Budapest 2022 április 12.



Sáfrán György

[1] Ronald Lin, Qiang Lu, Pushkar Ranade, Tsu-Jae King, and Chenming Hu: An Adjustable Work Function Technology Using Mo Gate for CMOS Devices

[2] J. Westlinder, G. Sjöblom, J. Olsson: Variable work function in MOS capacitors utilizing nitrogen-controlled TiN_x gate electrodes, Microelectronic Engineering 75 (2004) 389–396

[3] Gustav Sjöblom, Thesis, Metal Gate Technology for Advanced CMOS Devices
Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations, Faculty of Sci. & Technology 213