

Fókuszált ionsugaras nanomegmunkálás

PhD téziszfüzet

Horváth Enikő

Témavezető: Dr. Tóth Attila Lajos
Konzulens: Dr. Kocsányi László

MTA MŰSZAKI FIZIKAI ÉS ANYAGTUDOMÁNYI KUTATÓINTÉZET

Budapest

2009

A kutatások előzménye

Dolgozatom témája, a fókuszált ionsugaras (FIB) megmunkálás a mikroelektronikában terjedt el először, kezdetben rövidzárak átvágására, illetve ionsugár keltette leválasztással (IBAD) kiegészítve maszkok és a fémezés javítására használták, de az idők folyamán sok más hasznos alkalmazása is kialakult. Hatékonyságát az adja, hogy egy technológiai folyamat lépéseit, mint a mintázatkialakítást, marást, implantációt és leválasztást, az ionsugár felhasználásával el lehet végezni. Az ionsugár által pásztázott felületet az ionsugár roncsolja, ezért a leválasztással kialakítandó mintázatoknál, ahol az ionsugár okozta károsodást csökkenteni akarják, elektronsugaras leválasztással kombinálva alkalmazzák.

Az ionsugaras megmunkálás félvezetőipar számára kifejlesztett hatékony módszerei más területeken is, pl. anyagtudomány (metallurgia, kerámia, kompozitok, polimerek), geológia, biológia, gyógyszerészet, hasznosnak bizonyulnak, alkalmazásuk egyre terjed.

A fókuszált ion- és elektronsugaras megmunkálással 2003. szeptemberétől foglalkozom. Munkámat a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetben (MFA) kezdtem el az akkor frissen az intézetbe került, később bemutatandó LEO 1540 XB kétsugaras (elektron- és ionsugár) mikroszkóp és nanomegmunkáló eszköz alkalmazásával. Fő feladatomban volt az ionsugaras megmunkálás fizikai-kémiai folyamatainak tanulmányozása, a berendezés alkalmazhatósági paramétereinek felmérése, illetve a kialakítható objektumok tulajdonságainak vizsgálata. Dolgozatomban három olyan területen elért eredményeimet ismertetem, ahol a fókuszált ionsugaras megmunkálás, mint mintapreparációs módszer hozzájárult valamilyen jelenség magyarázatához, tudományos eredmény létrejöttéhez. Az alábbiakban felsorolt eredmények eltérő jellege és az, hogy a tematika a bioinspirált anyagok kutatásától a napelemgyártásig terjed, jól illusztrálja a fókuszált ionsugaras megmunkálás

egyre szélesedő alkalmazási lehetőségeit. Alkalmazhatósága a különleges tulajdonságokkal rendelkező, több dimenzióban struktúrált nanokompozitoktól (például egy- vagy több dimenziós fotonikus kristályok, illetve az egy- vagy több dimenziós fotonikus nanoarchitektúrákból „összeszerkesztett” interkalált, komplex fotonikus rendszerek), a nanoelektronikában megkerülhetetlenül szükségessé váló nanoméretű huzalozáson át, a napjainkban egyre nagyobb gyakorlati jelentőségű napelemgyártás területéig terjed.

Célkitűzések

Az első téma egy fotonikus nanoarchitektúra FIB módszerrel történő kialakítása volt, mely a bioinspirált anyagok MFA Nanoszerkezetek Osztályán folyó intenzív kutatásához kapcsolódik. Egy tajvani bogár kitinpáncélját tanulmányozva kérdésként merült fel a bogár kitinpáncéljának szerkezete és optikai tulajdonságai közötti összefüggés. Ennek megértése céljából állítottam elő a páncélhoz hasonló, egydimenziós fotonikus kristályba interkalált kétdimenziós nanoszerkezetekből felépülő nanoarchitektúrákat. A bogárpáncél kitin- és levegőrétegekből áll, amelyben elszórtan, a rétegekre merőlegesen oszlopok találhatók. Ezeket az oszlopokat modelleztük egy mesterséges multiréteg-szerkezetbe ionsugárral fúrt hengerszerű lyukakkal, majd az így kialakított szerkezetek optikai tulajdonságait vizsgálva tanulmányoztuk, hogy az oszlopok milyen optikai jelenségeket okoznak.

Másik témám egy ugyancsak a Nanoszerkezetek Osztályon folyó kutatás, a szén nanocsövek tanulmányozása kapcsán merült fel. Az egyedi nanocsövek elektromos tulajdonságainak vizsgálatához ion- és elektronsugár indukálta leválasztással kontaktusokat preparáltam. Az egyes kontaktált nanocsövek nem viselkedtek egyformán, ezért meg kellett győződnünk róla, hogy az egyes objektumok különböző viselkedése a cső vagy a kontaktus sajátosságaiból adódik-e. Ennek tisztázása érdekében vizsgáltam a kontaktáláshoz használt nanovezetékek tulajdonságait, összehasonlítva az elektron- és ionsugárral

leválasztott vezetékek elektromos jellemzőit. Kérdésként még az is felmerült, hogy a használat során várhatóan fellépő hatások, például melegedés következtében az elektromos tulajdonságok mennyire változnak.

A napelem-technológiában a napelemek cellákra való osztásának egy lehetséges módja a fókuszált ionsugárral való darabolás. Ilyen megfontolásból választottam harmadik témaként az Intézetben fejlesztett napelem-technológiában alkalmazott fémes Mo és nemfémes ZnO rétegek fókuszált ionsugárral való bemetszésének vizsgálatát, a cellákra osztáshoz alkalmas paraméterek megállapítására. Kérdésként merült fel a technológiai szempontok (méret, elkészítési idő, kihozatal) mellett, hogy ionsugaras besugárzáskor a különféle vékonyrétegek porlódási tulajdonságai hogyan változnak.

Új tudományos eredmények

1.a) Egy Tajvanon élő, háromféle színváltozatban előforduló bogár (*Trigonophorus rotschildi varians*) fedőszárnyának SEM vizsgálatakor olyan multiréteg-szerkezetet tártam fel, amelyet nem-tükörszerű visszaverődés jellemez a szerkezetben jelenlevő véletlenszerűen elrendezett oszlopok miatt. SEM képek alapján megalkottam a szerkezet modelljét, amely egy egydimenziós (multiréteg) és egy véletlenszerű kétdimenziós szerkezet (oszlopok) összetételeként értelmezhető. [A2]

1.b) Egy SiO_x /Si(Ge) multirétegszerkezetbe merőlegesen, ionsugárral pontszerűen belefúrt furatokkal kialakítottam a fenti bogárszárny-szerkezet mesterséges megfelelőjét. A furatok felelnek meg a természetes szerkezet oszlopainak. Spektroszkópiai mérések alapján megállapítottam, hogy sikerült olyan struktúrát létrehozni, amelynek optikai tulajdonságai a fentebb említett biológiai modelléhez hasonlóak. [A2]

1.c) A furatok elrendezésének és a köztük levő távolságnak a változtatásával kimutattam, hogy a szabályos négyzetrács szerint létrehozott furat-szerkezet

esetén a visszavert fény hullámhossza összefüggésben van a létrehozott furatok egymáshoz viszonyított távolságával, de nem függ a furatok átmérőjétől, illetve a furatok véletlenszerű elhelyezkedése esetén elhanyagolható mértékű függés figyelhető meg a furatok közötti átlagos távolságtól. Összességében megmutattam, hogy a fenti eljárással szabályozható optikai tulajdonságokkal rendelkező bioinspirált fotonikus nanoarchitektúra hozható létre. [A2]

2.a) Ionsugárral leválasztott volfrám nanovezetékek szerkezeti és elektromos tulajdonságaira vonatkozóan megállapítottam, hogy a leválasztott volfrám rétegek nem tökéletes hasáb alakúak. A rétegleválasztás hozama állandó, azaz az időegységre eső leválasztott térfogat állandó. Az elektródák közé leválasztott W rétegek ohmos vezetést mutattak, fajlagos ellenállásuk értéke benne van az irodalomban közölt értéktartományban. A W rétegek hőkezelési körülményei befolyással vannak a vezeték ellenállására, a vákuumban hőkezelt minta irreverzibilis ellenállásváltozást mutatott. [A3, A4, A5]

2.b) Elektronsugárral leválasztott volfrám nanovezetékek szerkezeti és elektromos tulajdonságaira vonatkozóan megállapítottam, hogy a leválasztott W rétegek morfológiája eltér az ionsugarasétól. A leválasztott réteg magassága növekszik a döntési szög növelésével, ami a nagyobb szekunderelektron hozammal magyarázható. Alacsonyabb energiákon a leválasztott réteg magassága nagyobb, ami szintén a szekunderelektronok nagyobb számával magyarázható. Az elektronsugarasan leválasztott rétegek elektromos ellenállása jóval nagyobb, mint az ionsugárral leválasztott rétegeké, emellett nagy szórást mutat nemcsak az ellenállás értéke, de az IV görbék jellege is, kvázi-lineáris és nemlineáris karakterisztikát egyaránt tapasztaltunk. [C28]

3.) A napelemtechnológiában használt molibdén és cinkoxid vékonyrétegek porlódási tulajdonságait vizsgálva meghatároztam az adott körülmények mellett előállított minták 30 keV-os, merőleges beesésű Ga^+ ionsugár esetén érvényes technikai porlódási hozam értékét. Megállapítottam, hogy a marási mélység függ az iondózistól. Molibdén marására vonatkozóan megállapítottam, hogy az

előállítási módszertől függetlenül a rétegek szigetesen maródnak, ami erőteljesebb, a porlódással összemérhető hatású visszaporlódási folyamattal magyarázható. A ZnO réteg marására vonatkozóan megállapítottam, hogy a réteg marásával sima felület marad vissza, itt a porlódáshoz képest a visszaporlódás valószínűleg nem jelentős. [A1]

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

1. **Horváth E**, Németh A, Koós AA, Bein MC, Tóth AL, Horváth ZE, Biró LP, Gyulai J, Focused ion beam based sputtering yield measurements on ZnO and Mo thin films, *Superlattices and Microstructures* 42 (2007) 392–397.
2. Biró LP, Kertész K, **Horváth E**, Márk GI, Molnár G, Vértesy Z, Tsai J-F, Kun A, Bálint Zs, Vigneron JP, Bioinspired artificial photonic nanoarchitecture using in the elytron of the beetle *Trigonophorus rothschildi* varians as “blueprint”, (beküldés alatt: *J. Roy. Soc. Interface*)
3. **Horváth E**, Neumann PL, Tóth AL, Koós AA, Horváth ZE, Biró LP: Morphological and Electrical Study of FIB Deposited W Wires, *Microelectr. Eng.* 84 (2007) 837-840.
4. **Horváth E**, Neumann PL, Tóth AL, Vázsonyi É, Biró LP, Fürjes P, Dücső C, Electrical characterization of tungsten nanowires deposited by focused ion beam (FIB), *Nanopages* 1 (2) (2006) 253-260.
5. **Horváth E**, Neumann PL, Koós AA, Tóth AL, Fókuszált ionsugárral leválasztott W csíkok morfológiai és elektromos vizsgálata, MKN Konferencia Kiadvány (2007) 243-246.