

# Fókuszált ionsugárral leválasztott W csíkok morfológiai és elektromos vizsgálata

*Morphological and electrical characterisation of focused ion beam deposited W wires*

**E. Horváth <sup>a,b</sup>, P. L. Neumann <sup>b</sup>, A. A. Koós <sup>a</sup>, A. L. Tóth <sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Research Institute for Technical Physics and Materials Science, Budapest, H-1525 P. O. Box 49, Hungary*

<sup>b</sup> *Budapest University of Technology and Economics, Budapest, H-1521 P. O. Box. 91, Hungary*

---

## Summary

The morphological characterisation of tungsten nanowires used for nanoelectrical device contacting was performed by SEM and AFM measurements. The electrical characterisation was measured in-situ after the deposition of wires by resistance measurements. The deposition and characterisation of the amorphous W nanowires was carried out in a LEO 1540 XB system, consisting of a high resolution SEM column, an FIB column for nanomachining process, and a gas injection container for layer deposition. The SEM and AFM measurements show that the wires have non rectangular shape. The I(V) curves show an ohmic behaviour.

---

## Bevezetés

Miután a félvezető elektronika fejlődése elérte a szubmikrométeres tartományt, szükségessé vált a nanoobjektumok elektromos tulajdonságainak vizsgálata. E nanoobjektumok elektromos jellemzéséhez szükséges azok kivezetése a hagyományos litográfiával kialakított kontaktus felületekhez.

Hasznos és megbízható eljárásként, egyedi nanoobjektumok mikro-felületekhez való kikötéséhez, fókuszált elektron- vagy ion-sugárral leválasztott W vagy Pt rétegeket alkalmaznak [1]. Az irodalomban több adatot találunk a Pt-val történt kísérletekről. Tanulmányozták a Pt leválásának sebességét, a levált Pt mennyiségét elektron és ionsugár energia függvényében [2,3]. Azt találták [2], hogy 10 és 30 keV energiákon, az elektron- és ionsugárral leválasztott Pt leválasztási sebessége összemérhető, és a dózis növelésével nő [3].

A Pt és W vezetékeket elektromos szempontból is tanulmányozták [1,4]. Mindkét anyagra jellemző az ohmos viselkedés és időbeni stabilitás. Ezenkívül a volfrámot alacsony ellenállás jellemzi [4].

Az ellenállás hőmérséklet függését [5] tanulmányozva az elektronsugárral leválasztott Pt vezető ellenállása nagy volt, és drasztikus növekedést mutatott hűtéssel, míg az ionsugárral leválasztott csíkok kevésbé voltak hőmérséklet függőek. Kevesebb irodalmi adatot találunk a W ellenállásának hőfokfüggésére.

Jelen munkánk alapját a fókuszált ionsugárral (FIB) leválasztott W vezetékek morfológiai vizsgálata és ellenállásuk tanulmányozása képezi, a tech-

nológiai paraméterek (leválasztási sebesség, sugár-áram, rétegszám stb.) függvényében.

Morfológiai vizsgálatokat egy speciális törőmintán végeztünk, míg az elektromos mérésekhez egy mikrofűtőtest fésűs elektródáit használtuk. A vizsgálatokhoz használt törőminta és mikrofűtőtest [6] az MTA MFA Mikrotechnológia Főosztály fejlesztése.

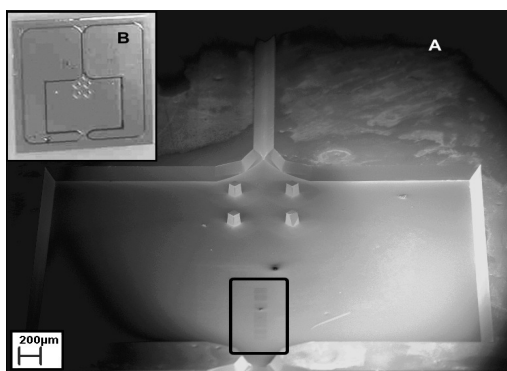
## Módszerek

A nanoméretű vezetékek leválasztása és jellemzése egy nagyfelbontású Gemini pásztázó elektronmikroszkópból, anyagmegmunkáláshoz használt Orsay Physics ionoszlopból, valamint gázbefecskendező egységből álló LEO 1540 XB keresztsugaras rendszerben történt.

Vizsgálatokra alkalmas hibamentes helyet az elektronsugár keltette szekunderelektron képen (SEM-SEI) kell kiválasztani, majd az ionsugár keltette képen (FIB-SEI) ellenőrizni kell a kiválasztott területet. Fókuszált ionsugaras megmunkáláskor a megmunkálási folyamat alatt megfigyelhetjük az anyag ionsugár okozta felületi roncsolását. A leválasztás folyamatát azonban már nem célszerű SEM-SEI képen követni, mert a befecskendezett gázt az elektronsugár is elbontja. A leválasztott rétegek felületi vizsgálatát csak akkor lehet elkezdeni, ha a mintakamra már nyomokban sem tartalmazza a befecskendezett gázt.

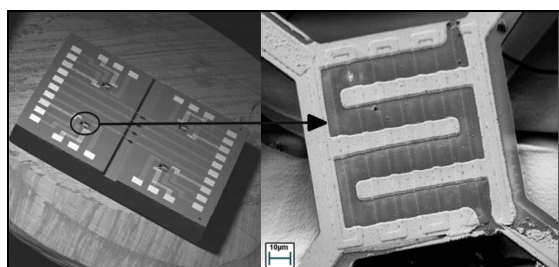
Az amorf W vezetékek geometriájának vizsgálatához egy speciálisan kialakított egykristályos Si törőmintát (1.ábra) használtunk. A törőminta előlapján szelektív marással, míg hátoldalán V marás-

sal alakították ki a törési vonalat. A törési vonalra merőlegesen volfrám hexakarbonil ( $W(CO)_6$ ) prekursor gázból FIB besugárással 60  $\mu m$  hosszú, 300 nm, 1000 nm, 2000 nm, ill. 5000 nm széles réteg-sorozatokat választottunk le. A rétegek leválasztásánál a marási és leválasztási folyamatok versenyben állnak [4], ezért a paramétereket, úgy mint az ionáramot, pásztázási sebességet, gázáramlási sebességet jól kell megválasztani. Az egyes sorozatok leválasztásának időtartama 50 s, 100 s, 150s, 200 s, 300s, 500 s, ill. 750 s volt. A leválasztás alatt az ionsugár áramát 50 pA, prekursor gáz tartályának hőmérsékletét 70 °C-on állandónak tartottuk. Leválasztás után mechanikai nyomással a törőminta a törési vonalon 50  $\mu m$  pontossággal volt törhető.



1. ábra. Pásztázó elektronmikroszkópos (A) és makrofotó (B) felvétel a W csíkok felületi és keresztmetszeti vizsgálatához használt törőminta.

A rétegek domborzatát SEM, magasságát atomerő mikroszkópos (AFM) mérésekkel vizsgáltuk, utóbbit Si tűs kopogtató üzemmódba kapcsolt VEECO NanoScope IIIa készüléken.



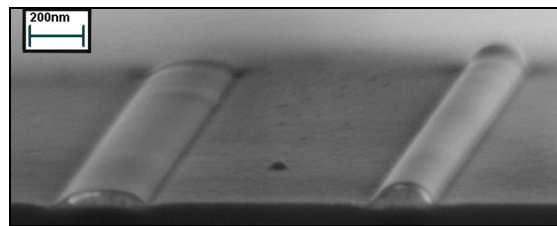
2. ábra. A rétegek elektromos méréséhez használt mikrofűtőtest pásztázó elektronmikroszkópos felvételei.

Mivel távlatilag hőfokfüggő méréseket is tervezzünk a W rétegek elektromos jellemzésére 100 x 100  $\mu m$  méretű mikrofűtőtestet (2. ábra) használtunk, mely egy egykristályos Si/SiO<sub>2</sub>-ra párologtatott Pt fűtőszálból és egy szigetelő réteggel elválasztott Au elektróda rendszerből áll. A vezető

rétegeket a 15  $\mu m$  távolságban lévő fésűs elrendezésű Au elektródák közé választottuk le. Az ellenállás mérésére egy speciális mérőkör lett kifejlesztve, elkerülve a vezetékek és minta elektrosztatikus töltődés miatt bekövetkező károsodását.

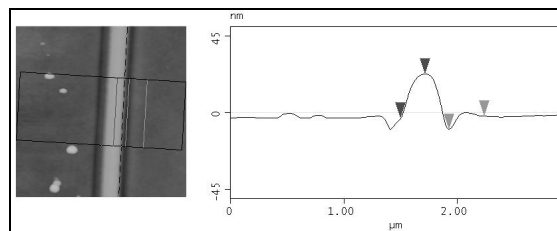
### Eredmények és értékelés

A leválasztott réteg geometriáját törés után pásztázó elektronmikroszkópos módszerrel vizsgáltuk. A 3. ábrán lévő SEM képen látható, hogy a rétegek geometriája eltér az ideális hasáb szerkezettől.



3. ábra. A leválasztott csíkok keresztmetszetének pásztázó elektronmikroszkópos képe.

Az AFM (4. ábra) mérésből ezen kívül látható, hogy a réteg átlagolt vonalprofil növekedése nem a szubsztrátum felszínétől kezdődik, hanem egy árok figyelhető meg a csík mindkét oldalán. Ennek magyarázata az [4], hogy kezdetben a marási és leválasztási folyamatok közül a marás jobban dominál. A rétegleválasztáskor az ionsugárral fellazított szubsztrátum rétegbe kis mennyiségű amorf W épül be. A következő réteg leválasztásakor az ionsugár már csak kisebb mélységű szubsztrátum réteget lazít fel, több W épül be, így folyamatosan a leválasztás kerül előtérbe. Kezdetben a vezeték még nem tartalmaz elég volfrámot ahhoz, hogy vezető tulajdonságokkal rendelkezzen, csak a többrétegű amorf W mutat vezetőre jellemző viselkedést [7].

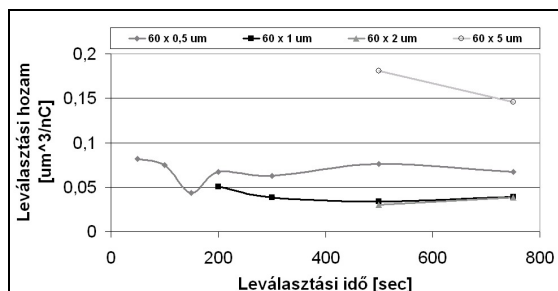


4. ábra. A leválasztott csík AFM képe és magassági profilja.

Az AFM mérésekből származó réteg magassági adatokat a leválasztási sebesség kiszámításához is felhasználtuk. Az egységnyi időre számított leválasztott térfogat állandónak mondható, értéke 0,002 - 0,004  $\mu m^3/s$ . (5. ábra), a hozam, pedig 0,038 - 0,080  $\mu m^3/nC$ .

A mikrofűtőtest fűsűs elektródái közé leválasztott volfrám rétegek ohmos karakterisztikát mutatnak (6.ábra).

Ezen adatok ismeretében az általunk leválasztott amorf vezető volfrám rétegek fajlagos ellenállását is meghatározhatjuk.

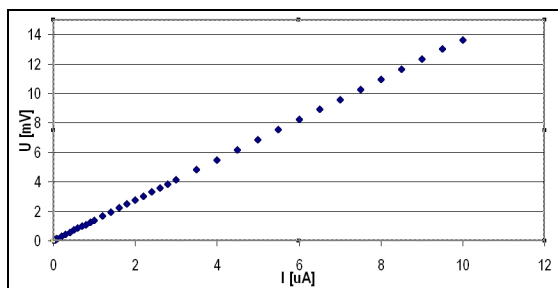


5. ábra. Az AFM magassági adatokból számított leválasztási hozam az idő függvényében.

A teljes ellenállást az (1) képlettel fejezhetjük ki:

$$R_t = R_w + 2 \cdot R_e + 2 \cdot R_k \quad (1)$$

ahol, az  $R_t$  a teljes ellenállás, az  $R_w$  a W réteg ellenállása,  $R_e$  az elektróda ellenállása,  $R_k$  a W és elektróda közötti kontaktus ellenállása. A kontaktellenállást meghatározhatjuk, ha a sorosan kapcsolt W rétegek ellenállását a hosszúság függvényében ábrázoljuk, és 0 hosszúságra extrapoláljuk. Az elektróda ellenállását elhanyagolhatjuk ( $R_e = 1,2 \Omega$ ) a kontaktellenálláshoz ( $R_k = 250 \Omega$ ) képest.



6. ábra. Egy 300 nm széles W vezeték I(V) görbéje.

A fajlagos ellenállás értékét ezután az  $R_w$  ismeretében a (2) képlet alapján kiszámíthatjuk:

$$\rho_w = \frac{R_w \cdot A}{l} \quad (2)$$

ahol,  $R_w$  a W réteg ellenállása,  $A$  a W réteg keresztmetszete,  $l$  pedig a réteg hossza. A mért geometriai és ellenállás mérési adatokból a volfrám réteg fajlagos ellenállása  $\rho_w = 218 \mu\Omega\text{cm}$ .

Ez természetesen eltér a tömbi W fajlagos ellenállásától ( $5,6 \mu\Omega\text{cm}$ ), viszont jó egyezést mutat az

irodalomban [4,8,9] a leválasztott amorf W-C-O-Ga rétegekre kapott adatokkal ( $20 - 400 \mu\Omega\text{cm}$ ).

## Összefoglalás

A kísérletek során  $60 \mu\text{m}$  hosszú és  $300-5000 \text{ nm}$  széles W rétegeket választottunk le. A morfológiai vizsgálatokat valamint a törekszerkezet vizsgálatát SEM és AFM mérésekkel végeztük. A leválasztott rétegek keresztmetszeti vizsgálata alapján a rétegek nem-tökéletes négyszög alakúak. A magassági vizsgálatokból megállapítható, hogy a leválasztási sebesség állandó. Rétegleválasztás után in-situ elektromos méréseket végeztünk. Az I(V) görbe alapján a rétegek ohmos viselkedést mutattak. A teljes ellenállás értékének ismeretében, a kontaktus és az Au elektróda ellenállásának meghatározása után a leválasztott réteg fajlagos ellenállást is kiszámoltuk. A kapott eredmények további kutatási munkák alapját képezik (pl.: nanoobjektumok kikötése, többrétegű szerkezet vizsgálata, stb.).

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Vázsonyi Évának, Nagy Attilának a minták előállításában nyújtott segítségért. A munka nem jöhetett volna létre az OTKA T 049131 támogatása nélkül.

## Irodalomjegyzék

- [1] A. Vila, F. Hernandez-Ramirez, J. Rodriguez, O. Casals, A. Romano-Rodriguez, J.R. Morante, M. Abid, Materials Science and Engineering C 26 (2006) 1063 – 1066.
- [2] S. Lipp, L. Frez, C. Lehrer, E. Demm, S. Pauthner, H. Rissel, Microelectron. Reliab 36 11/12 (1996) 1779-1782.
- [3] Y.K. Park, T. Nagai, M. Takai, C. Lehrer, L. Frey, H. Ryssel, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 148 (1999) 25-31.
- [4] Prestigiacomo M, Roussel L, Houel A, Sudraud P, Bedu F, Tonneau D, Safarov V, Dallaporta H, Microel. Eng. 76 1-4 (2004) 175-181.
- [5] Y. Tsukatani, N. Yamasaki, K. Murakami, F. Wakaya, M. Takai, Jap. J. Appl. Phys. 44 7B (2005) 5683-5686.
- [6] Fürjes P., Hőátvitel szilícium mikrogépészeti szerkezetekben, PhD dissertation, Budapest (2003).
- [7] Langfische H., Basnar B., Hutter H, Bertagnolli E. J. Vac. Sci. Technol. A 20 4 (2002) 1408-1415.
- [8] Kenji Gamo, Susumi Namba, J. Vac. Sci. Technol. B 8 6, 1927 (1990).
- [9] Prestigiacomo M, Bedu F, Jandard F, Tonneau D, Dallaporta H, Roussel L, Sudraud P, Appl. Phys. Lett. 86 19: Art. No. 192112 (2005).