

## Analiza uticaja strukture na mehani ka svojstva višeslojnih tankih filmova Ni /Cu za primenu u mikroelektronskim tehnologijama

JELENA S. LAMOVEC, Univerzitet u Beogradu,

IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, Beograd

VESNA B. JOVI , Univerzitet u Beogradu,

IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, Beograd

IVANA O. MLADENOVI , Univerzitet u Beogradu,

IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, Beograd

BOGDAN M. POPOVI , Univerzitet u Beogradu,

IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, Beograd

VESNA J. RADOJEVI , Univerzitet u Beogradu,

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Originalni nau ni rad

UDC:539.232:544.6

DOI:10.5937/tehnika1506915L

*Tehnikom elektrohemijske depozicije iz dva kupatila (dual-bath technique, DBT), dobijeni su višeslojni filmovi Ni i Cu, naizmeni nim deponovanjem na polikristalni, hladno-valjani bakarni supstrat. Razli ite strukture Ni/Cu višeslojnih filmova su ostvarene promenom procesnih parametara kao što su ukupna debljina filma, debljina pojedina nog sloja u filmu i odnos debljina pojedina nih slojeva Ni i Cu u filmu. Ispitana su mehani ka svojstva mikrotvrdo e po Vikersu i adhezije filma na supstratu i kontaktnim površinama slojeva u filmu. Smanjenjem debljine pojedina nog sloja do 300 nm i pove anjem odnosa debljina slojeva Ni:Cu na 1:4, došlo se do višestrukog pove anja vrednosti Vikersove mikrotvrdo e u odnosu na jednoslojne metalne filmove. Tanki slojevi Ni i Cu sa debljinom od 75 nm do 5 μm pokazuju dobru me uslojnu adheziju. Filmovi sa debljinom slojeva ve om od 5 μm, nemaju dobru medjuslojnu adheziju i uo ava se delaminacija (razdvajanje) slojeva. Sve strukture višeslojnih filmova Ni i Cu se mogu primeniti za izradu trodimenzionalnih MEMS struktura od Ni, metodom selektivnog nagrizanja slojeva Cu u kiselom rastvoru tiouree tehnikom „površinskog mikromašinstva“.*

**Ključne reči:** elektrohemijska depozicija Ni/Cu, višeslojni tanki filmovi, vikersova mikrotvrdo a, me uslojna adhezija, selektivno nagrizanje

### 1. UVOD

Deponovani tanki filmovi, razli iti po svojoj strukturi i svojstvima, predstavljaju ključnu komponentu u izradi mikroelektromehani kih (MEMS) naprava. Oni moraju zadovoljiti niz zahteva u pogledu strukturnih, mehani kih, hemijskih, elektri nih i opti kih svojstava, me u kojima su dobra adhezija, kontrolisana rezidualna naprezanja, otpornost na koroziju itd.

Višeslojni filmovi ili laminati su podklasa tankih filmova gde su naizmeni no deponovani slojevi razli itih materijala. Struktura i mehani ka svojstva svakog sloja doprinose i uti u na strukturu i mehani ka svojst-

va celokupnog laminatnog filma [1, 2].

Elektrohemijska depozicija (ED) dobija na zna ajnu kao tehnologija izbora u MEMS-u zahvaljuju i velikoj brzini procesa, visokoj preciznosti pri formiranju željenih struktura i dobroj kompatibilnosti sa ve postojećim mikroelektronskim tehnologijama.

Elektrohemijski dobijeni depoziti nalaze svoju primenu naj eše u obliku tankih filmova (do 10 μm), ali se koriste i za izradu masivnijih trodimenzionalnih struktura. Zna ajna i poboljšana mehani ka svojstva koja karakterišu elektrodeponovane filmove jesu pove ana otpornost na habanje, više vrednosti mikrotvrdo e i ja ine filmova [3, 4].

Nikl i bakar su materijali izuzetnih mehani kih, hemijskih i elektri nih svojstava. Imaju sličnu kristalnu strukturu i mali stepen nepodudaranja rešetki (oko 2.6%), što dozvoljava rast koherentnih i semikoherentnih epitaksijalnih slojeva. Relativno velika razlika

Adresa autora: Jelena Lamovec, Univerzitet u Beogradu, IHTM - Centar za mikroelektronske tehnologije, Beograd, Studentski trg 14-16

Rad primljen: 01.10.2015.

Rad prihva en: 19.10.2015.

u modulima elastičnosti ( $G_{Cu} = 48 \text{ GPa}$ ,  $G_{Ni} = 76 \text{ GPa}$ ), predstavlja ograničenje kretanju dislokacija u blizini granične površine i doprinosi povećanju inelastičnosti višeslojnih filmova u odnosu na jednoslojne filmove ovih metala.

Filmove Ni i Cu je lako kontrolisano elektrohemijski deponovati i izborom parametara depozicije se može uticati na mikrostrukturu, a samim tim i na svojstva filmova. Značajni su u izradi pokretnih i HARMS mikrostruktura, senzora za merenje magnetnog efekta i aktuatorskih mikrosistemskih naprava.

Višeslojne strukture Cu i Ni se mogu primeniti i za izradu složenih MEMS struktura od Ni, gde se tehnikom površinskog mikromašinstva slojevi elektrodeponovanog Cu žrtvuju [5, 6, 7].

## 2. MEHANI KA SVOJSTVA KOMPOZITNIH SISTEMA

Depozicija tankih filmova pretpostavlja postojanje supstrata na kojem se nalazi tanki film. Zato se sistem tanki film-supstrat može smatrati laminatnom kompozitnom strukturom.

Test utiskivanja pod niskim opterećenjem je poznat metod analize mehaničkih svojstava jednoslojnih filmova, ali se može koristiti i za merenje mehaničkih svojstava kompozitnih filmova. Tada se pri analizi eksperimentalnih rezultata mora uzeti u obzir i prisustvo supstrata. Kada je dubina utiskivanja veća od 10% ukupne debljine filma, izmerena tvrdoća se naziva kompozitnom tvrdoćom i ona zavisi od dubine utiskivanja tj. primenjenog opterećenja, ukupne debljine filma, tvrdoće filma i tvrdoće supstrata.

Za određivanje apsolutne tvrdoće višeslojnog filma iz eksperimentalno izmerene kompozitne tvrdoće sistema film-supstrat postoje različiti modeli. Sistem Ni/Cu film na polikristalnom Cu supstratu pripada grupi kompozitnih sistema koju nazivamo „tvrđi film na mekome supstratu“ grupom, za koju je izveden model Korsunskog (K-model) daje dobre rezultate [5, 8]. K-model, prema jednačini (1), pretpostavlja da se celokupan rad utiskivanja utrošen na deformaciju kompozita može razložiti na udele energije utrošene na deformaciju supstrata i deformaciju filma.

$$H_C = H_S + \left[ \frac{1}{1 + k' \cdot (d^2 / t)} \right] \cdot (H_F - H_S);$$

$$k' = \frac{k}{49 \cdot t} \quad (1)$$

Parametar  $k$  je bezdimenzioni parametar koji opisuje odziv kompozitnog sistema na deformaciju utiskivanjem,  $d$  je srednja vrednost dijagonale otiska,  $t$  je ukupna debljina filma,  $H_C$ ,  $H_S$  i  $H_F$  su kompozitna tvrdoća filma, tvrdoća supstrata i filma, respektivno.

Jedan od glavnih triboloških zahteva za uspešnu realizaciju MEMS strukture je dobra adhezija deponovanih filmova (odmah nakon depozicije, kao i nakon naknadnih procesa obrade). Ako se filmovi oljušte sa supstrata, dalje formiranje strukture je nemoguće, tako da slaba adhezija predstavlja potencijalni problem realizacije bilo koje strukture.

Višeslojni metalni filmovi elektrodeponovani na metalnim supstratima imaju dobru adheziju usled postojanja metalne veze. Na kontaktnim površinama Ni/Cu i Cu/Ni slojeva postoji kristalografska koherencija, ali pod određenim uslovima uočljiva je slaba adhezija i razdvajanje slojeva u višeslojnom filmu. Uzrok se nalazi u procesu kodepozicije vodonika, jer se izdvajanje vodonika dešava u vodenim rastvorima kao sporedna reakcija koja prati redukciju metalnog jona na katodi [9, 10].

## 3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Eksperimentalna ispitivanja su izvršena na kompozitnim sistemima formiranim naizmenično elektrohemijom depozicijom filmova Ni i Cu na pokristalnom hladnom valjani Cu supstrat (dual-bath technique). Supstrat je pre procesa elektrodepozicije odmašen i hemijski ispoliran u rastvoru  $\text{HNO}_3:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{CH}_3\text{COOH}$  u odnosu 4:11:5 vol %.

Elektrohemijska depozicija je izvođena u dc-galvanostatskom modu sa odabranom gustinom struje od  $10 \text{ mA/cm}^2$ . Vreme depozicije je definisano površinom supstrata za depoziciju i projektovanom debljinom filmova.

Slojevi Cu su deponovani iz sulfatnog kupatila sledećeg sastava:  $240 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1} \text{ CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $60 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ . Temperatura i pH su održavani na vrednostima od  $25^\circ\text{C}$  i 0,4, respektivno. Nikl je deponovan iz sulfatnog kupatila, sastava:  $300 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1} \text{ Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $30 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1} \text{ NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $30 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1} \text{ H}_3\text{BO}_3$ ,  $1 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$  saharina, na temperaturi  $t = 50^\circ\text{C}$  i održavanoj vrednosti  $\text{pH} = 4.2$ .

Merenje mikrotvrdoće Cu supstrata i Ni/Cu kompozitnih sistema je izvršeno Vikersovim utiskivačem na uređaju "Leitz, Kleinhartepreifer DURIMET I", sa opterećenjima u opsegu od 0.049 N do 1.96 N. Merenja su obavljena na sobnoj temperaturi.

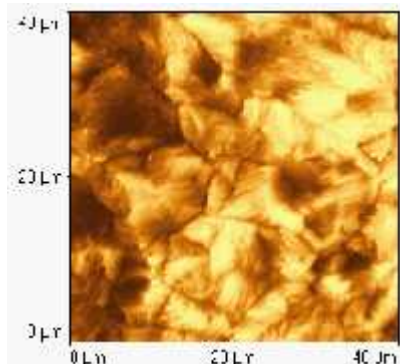
Uzorci za ispitivanje adhezije slojeva i analizu poprečnog preseka Ni/Cu filmova na Cu supstratu pripremljeni su zatapanjem uzoraka u autopolimerizujućem akrilat (Simgal®R, Galenika) a zatim su iseceni i mehanički i hemijski polirani.

Selektivno nagrizanje slojeva Cu u filmu izvršeno je u kiselom rastvoru tiouree ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ), koncentracije  $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ , na temperaturi od  $40^\circ\text{C}$  i vrednosti  $\text{pH}=1$  (postignuto i održavano sa HCl).

Merenja veli ine otisaka na Cu supstratu i Ni/Cu filmovima i analiza popre nog preseka Ni/Cu filmova su izvršeni metalografskom mikroskopijom (Carl Zeiss mikroskop "Epival Interphako"), AFM (TM Microscopes - Veeco) mikroskopijom u beskontaktnom modu i SEM mikroskopijom (Scanning Electron Microscope, JEOL JSM-T20).

#### 4. REZULTATI I DISKUSIJA

Formirane kompozitne sisteme karakteriše niža vrednost tvrdo e supstrata u odnosu na tvrdo u elektrodeponovanih filmova. Kao supstrat je koriš ena polikristalna Cu folija debljine 125  $\mu\text{m}$ , dimenzija 1x4 cm, ija je mikrostruktura prikazana na slici 1. Supstrat pripada klasi mikrokristalnih mekih materijala.



Slika 1 - Hladno valjani mikrokristalni Cu supstrat, nagrižen radi otkrivanja granica zrna

##### 4.1. Mikrotvrdo a višeslojnih tankih Ni/Cu filmova

Za odre ivanje mikrotvrdo e supstrata koja je nezavisna od optere enja (apsolutne mikrotvrdo e), koriš en je metod proporcionalnog otpora uzorka (PSR model) i izra unata vrednost iznosi  $H_S = 0.37 \text{ GPa}$  [5].

Razli ite strukture višeslojnih Ni/Cu filmova se mogu ostvariti promenom parametara kao što su debljina pojedina nog sloja Ni ili Cu u filmu tj. broj slojeva u filmu, ili promenom odnosa debljina pojedina nih slojeva u filmu.

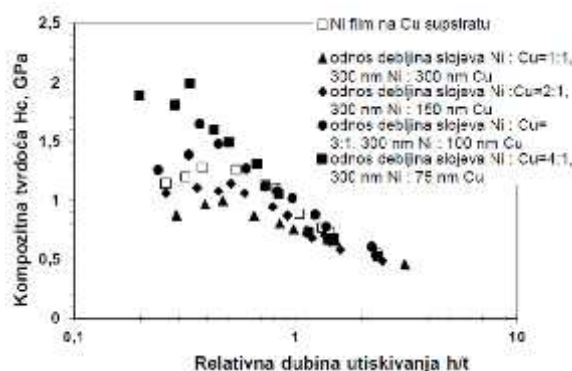


Slika 2 - Varijacija kompozitne tvrdo e  $H_c$ , sa relativnom dubinom utiskivanja,  $h/t$ , za Ni/Cu filmove debljine 5  $\mu\text{m}$  na Cu supstratu. Debelom linijom ozna ena je apsolutna vrednost tvrdo e Cu supstrata  $H_S = 0.37 \text{ Pa}$

Promena kompozitne mikrotvrdo e  $H_c$  filma Ni/Cu na Cu supstratu sa relativnom dubinom utiskivanja,  $h/t$ , prikazana je na slici 2. Filmovi, ukupne debljine 5  $\mu\text{m}$ , sa razli itim debljinama pojedina nog sloja Ni i Cu (od 30 nm do 1  $\mu\text{m}$ ), deponovani su gustinom struje 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

Smanjenje debljine pojedina nog sloja od 1  $\mu\text{m}$  do 30 nm, dovodi do rasta kompozitne mikrotvrdo e sistema (pove ava se broj kontaktnih površina slojeva). Za male dubine utiskivanja ( $h/t = 0.1$ ), dominantan je uticaj filma, pa se može smatrati da odziv sistema odgovara odzivu filma. Oblast relativne dubine utiskivanja  $0.1 < h/t < 1$  karakteriše odziv celog kompozitnog sistema, dok se sa pove anjem relativne dubine utiskivanja kompozitna tvrdo a smanjuje do dostizanja apsolutne tvrdo e supstrata, koja je prikazana na slici 2 neprekidnom linijom.

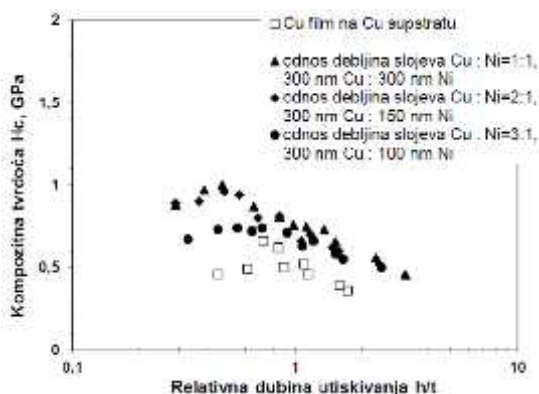
Uticaj promene debljine pojedina nog sloja Ni ili Cu u filmu na kompozitnu tvrdo u sistema, prikazan je na slikama 3 i 4.



Slika 3 - Zavisnost kompozitne tvrdo e Sistema Ni/Cu na Cu supstratu za razli ite odnose debljina slojeva Ni:Cu u filmu. Ukupna debljina filma je 5  $\mu\text{m}$ . Koriš ena gustina struje depozicije je iznosila 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$

Na slici 3, debljina sloja ED Ni je održavana konstantnom (300 nm), dok je debljina sloja ED Cu smanjivana do 75 nm. Slika 4 pokazuje zavisnost kompozitne tvrdo e od relativne dubine utiskivanja za konstantnu vrednost debljine sloja ED Cu (300 nm) sa postepenim smanjivanjem udela ED Ni do debljine sloja od 100 nm.

Sa pove anjem odnosa debljine slojeva Ni:Cu (300 nm debljina sloja Ni i 300 nm, 150 nm, 100 nm i 75 nm debljina sloja Cu), tvrdo a kompozitnog sistema  $H_c$  raste. Za odnose debljina slojeva Ni:Cu = 3:1 i 4:1 tvrdo a postaje ve a od tvrdo e sistema jednoslojnog filma Ni na Cu supstratu, pri istim uslovima (5  $\mu\text{m}$ , 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) [5]. Pove anju tvrdo e doprinosi pove anje broja granica slojeva tj. kontaktnih površina koje služe kao barijera kretanju dislokacija koje nastaju kao posledica plasti ne deformacije pri utiskivanju.



Slika 4 - Promena kompozitne tvrdo e sistema Ni/Cu na Cu supstratu za razli ite odnose debljina slojeva ED Cu : ED Ni u filmu. Film je ukupne debljine  $5\mu\text{m}$ . Gustina struje depozicije Ni i Cu je ista i iznosi  $10\text{ mA/cm}^2$

Suprotno prethodnom slu aju, sa pove anjem odnosa debljina sloja sa konstantnom debljinom Cu sloja, (300 nm debljina sloja Cu i 300 nm, 150 nm, 100 nm debljine slojeva Ni), kompozitna tvrdo a se smanjuje, ali je u svim slu ajevima ve a od tvrdo e jednoslojnog filma Cu na Cu supstratu. Pri istim odnosima debljina slojeva Ni i Cu, broj kontaktnih površina Ni/Cu je isti, što dovodi do zaklju ka da razlika u mikrostrukturi slojeva Ni i Cu, pri emu je ED Ni finije sitnozrne mikrostrukture [5] tako e doprinosi smanjenom kretanju dislokacija i doprinosi pove anoj ukupnoj tvrdo i sistema.

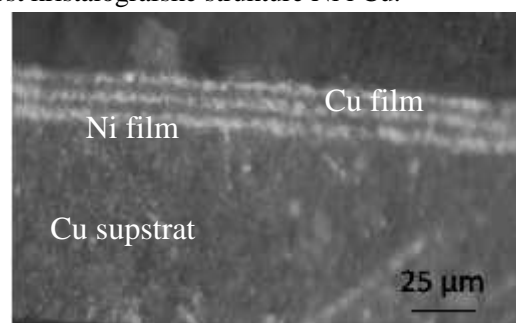
Tabela 1. Rezultati fitovanja prema modelu Korsunskog za odabrane Ni/Cu filmove ukupne debljine  $5\mu\text{m}$ . Prikazani su filmovi sa razli itom debljinom slojeva i razli itim odnosom Ni i Cu slojeva

| K model  |        | Standardna greška merenja |
|--|--------|---------------------------|
| ED Ni/Cu film ( $5\mu\text{m}$ , $10\text{ mA/cm}^2$ )<br>Debljina sloja 300 nm                          |        |                           |
| $H_F$ (GPa)  | 0.97   | $\pm 0.03$ (3%)           |
| $k'$   | 0.0018 | $\pm 0.00004$ (21.2%)     |
| ED Ni/Cu film ( $5\mu\text{m}$ , $10\text{ mA/cm}^2$ )<br>Debljina sloja 30 nm                           |        |                           |
| $H_F$ (GPa)  | 1.39   | $\pm 0.068$ (4.9%)        |
| $k'$   | 0.002  | $\pm 0.0006$ (31.1%)      |
| ED Ni/Cu film ( $5\mu\text{m}$ , $10\text{ mA/cm}^2$ )<br>Odnos debljina slojeva = 300 nm Ni : 100 nm Cu |        |                           |
| $H_F$ (GPa)  | 1.61   | $\pm 0.071$ (4.4%)        |
| $k'$   | 0.0042 | $\pm 0.0008$ (20.8%)      |
| ED Ni/Cu film ( $5\mu\text{m}$ , $10\text{ mA/cm}^2$ )<br>Odnos debljina slojeva = 300 nm Ni : 75 nm Cu  |        |                           |
| $H_F$ (GPa)  | 2.12   | $\pm 0.008$ (3.75%)       |
| $k'$   | 0.0089 | $\pm 0.001$ (14.8%)       |

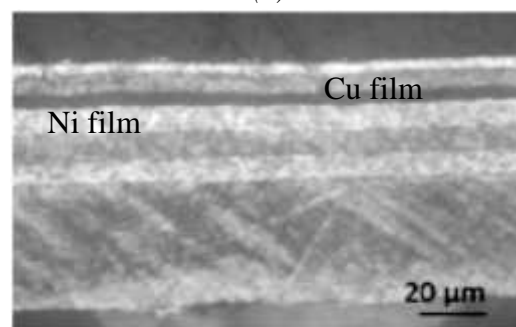
Prema modelu Korsunskog, za ove kompozitne sisteme su izra unate vrednosti tvrdo e višeslojnih filmova  $H_F$  i rezultati prikazani u tabeli 1.

#### 4.2. Me uslojna adhezija u Ni/Cu višeslojnom filmu

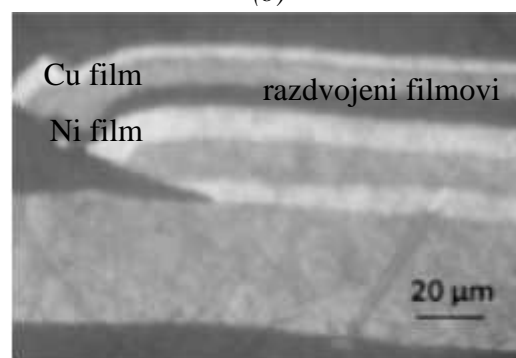
Na slici 5 su prikazane fotografije sa opti kog mikroskopa popre nih preseka razli itih Ni/Cu filmova na Cu supstratu nakon testiranja adhezije filma na supstratu i me uslojne Ni/Cu adhezije. Jaka adhezija filma na supstratu je potvr ena za sve formirane kompozitne strukture, što je o ekivano s obzirom na sli- nost kristalografske strukture Ni i Cu.



(a)



(b)



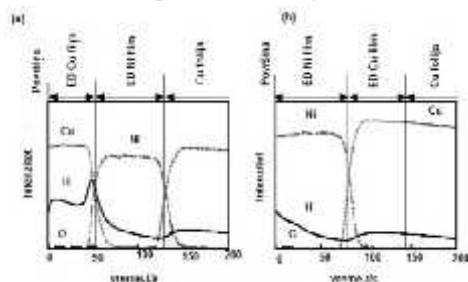
(c)

Slika 5 - Popre ni preseki uzoraka: a) debljina pojedina nog sloja u filmu je  $5\mu\text{m}$ , ukupna debljina filma je  $25\mu\text{m}$ ; b) debljina pojedina nog sloja je  $20\mu\text{m}$  (sem poslednjeg sloja od  $5\mu\text{m}$ ), ukupna debljina filma je  $85\mu\text{m}$ ; c) delaminacija slojeva na kontaktu ED Ni/ ED Cu

Za filmove sa debljinom pojedina nog sloja do 5  $\mu\text{m}$ , adhezija na kontaktnim površinama Ni/Cu i Cu/Ni je dobra (slika 5a). Sa pove anjem debljine pojedina nog sloja Ni i Cu do 20  $\mu\text{m}$ , adhezija na kontaktnoj površini slojeva Ni i Cu je slaba i dolazi do razdvajanja slojeva (slike 5b i 5c).

Pojava razdvajanja slojeva u filmu se objašnjava formiranjem ve eg broja šupljina na kontaktnoj površini Ni-Cu, veli ine 30-500 nm. Uzrok njihovog nastanka leži u sporednoj reakciji koja prati proces elektrodepozicije, a to je izdvajanje vodonika na katodi. Usled razlike u koeficijentima difuzije vodonika kroz slojeve Ni i Cu ( $D_{\text{Cu}} = 11.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{\text{Ni}} = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , za temperaturni opseg 723-1200 K), dolazi do njegovog nagomilavanja i formiranja šupljina na kontaktnoj površini. Ova pojava nije prime ena na kontaktnoj površini Cu-Ni.

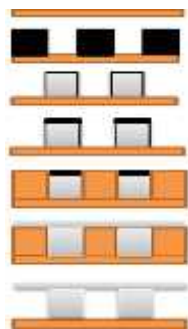
Na slici 6 je prikazan rezultat GD-OES (grow-discharge-optical-emission spectroscopy) analize izvršene na kontaktnim površinama slojeva Ni-Cu i Cu-Ni, po dubini elektrodeponovanih slojeva Ni i Cu [9].



Slika 6 – GD-OES analiza po dubini filmova na supstratu: a) ED Cu film na ED Ni kao supstratu; b) ED Ni film na ED Cu kao supstratu [9]

#### 4.3. Mogu nost primene višeslojnih Ni/Cu filmova

Višeslojni Ni/Cu filmovi imaju poboljšana mehani ka, hemijska i elektri na svojstva u odnosu na jednoslojne metalne filmove i nalaze sve ve u primenu u MEMS tehnologijama.



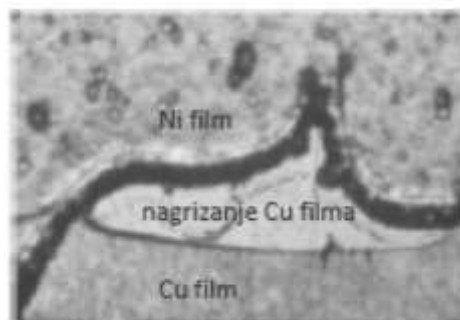
Slika 7 - Šematski prikaz izrade strukture od Ni koriš enjem ED Ni/Cu filma kao po etnog materijala i metode selektivnog nagrizanja Cu filma (sloj rezista ozna en crnom bojom, Cu supstrat i ED Cu film crvenom, i srebrnom sloj EDNi)

Jedna od mogu ih primena ovih filmova je izrada trodimenzionalnih Ni struktura metodom tzv. „površinskog mikromašinstva“. Završna faza izrade strukture je selektivno nagrizanje Cu u kiselom rastvoru tiouree. Šematski prikaz postupka izrade jedne strukture je prikazan na slici 7.

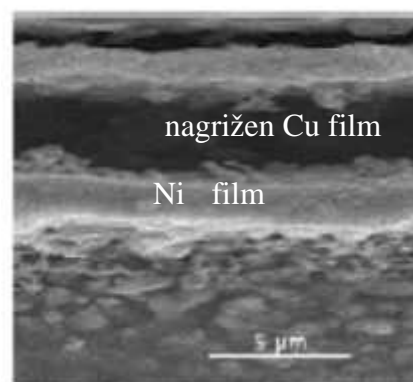
Na slikama 8a i 8b su prikazane fotografije sa metalografskog mikroskopa višeslojne Ni/Cu Ni strukture (2  $\mu\text{m}$  ED Ni /5  $\mu\text{m}$  ED Cu /2  $\mu\text{m}$  ED Ni) na Cu supstratu i po etak selektivnog nagrizanja Cu filma u rastvoru tiouree. Slika 8c je SEM fotografija iste strukture u kojoj su slojevi ED Ni oslobo eni središnjeg ED Cu sloja.



a)



(b)



(c)

Slika 8 - Slika popre nog preseka kompozitnog sistema Ni/Cu/Ni (2 $\mu\text{m}$ /5 $\mu\text{m}$ /2 $\mu\text{m}$ ) na Cu supstratu sa opti kog mikroskopa (a), po etak selektivnog nagrizanja sloja ED Cu u kiselom rastvoru tiouree na 40°C (b) i SEM prikaz dela popre nog preseka istog sistema (c)

## 5. ZAKLJU AK

U radu su analizirana mehani ka svojstva kompozitnih sistema formiranih naizmenično elektrohemijskom depozicijom filmova Ni i Cu na polikristalni Cu supstrat. Mehani ka svojstva višeslojnih Ni/Cu filmova zavise od mikrostrukture pojedina nih slojeva u filmu, ukupne debljine filma, debljine pojedina nog sloja kao i odnosa debljina slojeva u Ni/Cu filmu.

Za analizu mikrotvrdo e po Vickersu, izabrani su parametra: debljina pojedina nog sloja u filmu i odnos debljina Ni:Cu slojeva u filmu.

Smanjenjem debljine pojedina nog sloja u filmu, od 1 $\mu$ m do 30 nm, uvodimo ve i broj granica koje su barijera napredovanju deformacije i vredost mikrotvrdo e raste. Pove anje odnosa debljine slojeva Ni:Cu na 1:4 (300 nm Ni:75 nm Cu), dovodi do pove anja tvrdo e filma, gde pored uvo enja ve eg broja granica, ulogu ima i sitnozrna mikrostruktura Ni filma [5].

Usled paralelne reakcije izdvajanja vodonika na katodi i brže difuzije kroz sloj Cu, dolazi do njegovog nagomilavanja na kontaktnoj površini Ni-Cu, loše adhezije i razdvajanja slojeva koji su deblji od 5  $\mu$ m. Na kontaktnoj površini Cu-Ni, pojava nije zapažena.

Višeslojni Ni/Cu filmovi se mogu koristiti kao tanki zaštitni filmovi pove ane mikrotvrdo e u odnosu na jednoslojne filmove Ni i Cu, ali i za izradu tro-dimenzionalnih MEMS Ni struktura, metodom selektivnog nagrizanja Cu u kiselom rastvoru tiouree. U ovom slu aju se mogu koristiti višeslojni Ni/Cu filmovi sa ve om debljinom pojedina nog sloja Ni ili Cu u filmu.

## 6. ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike

Srbije u okviru projekta TR 32008, "Mikro, nano-sistemi i senzori za primenu u elektroprivredi, procesnoj industriji i zaštiti životne sredine".

## LITERATURA

- [1] Serre C, Yaakoubi N., Perez-Rodriguez A., Morante J.R., Esteve J, Montserra J., Sensors and Actuators A, vol. 123-124, p. 633-639, 2005.
- [2] Lamovec J, Jovi V, Mladenovi I, Sarajli M., Radojevi V, Zbornik 57. konferencije ETRAN, str. MO3.3.1-3, Zlatibor 2013.
- [3] Martinez S, Yaakoubi N, Perez-Rodriguez A, Serre C., Gorostiza P, Morante J. R, Esteve J, Sensors and Actuators A, vol.99, p. 41-44, 2002.
- [4] Datta M, Landolt D., Electrochemical Acta, vol.45, p. 2535-2558, 2000.
- [5] Lamovec J, „Mikromehani ka i strukturna svojstva laminatnih kompozitnih materijala sa primenom u mikroelektromehani kim tehnologijama“, Doktorska disertacija, TMF, Univerzitet u Beogradu, 2010.
- [6] Arai S, Hasegava T, Kaneko N, Electrochimica Acta, vol. 49, p. 945-950, 2003.
- [7] Maciossek A, Lochel B, Quenzer H. J, Wagner B, Noetzel J, Microelectronic Engineering, vol. 27, p. 503-508, 1995.
- [8] Korsunsky A. M, McGurk R, Bull S. J, Page T. F, Surf. Coat. Technol., vol.99, p.171-183, 1998.
- [9] Okamoto N, Wang F, Watanabe T, Materials Transactions, vol. 45, no.12, p. 3330-3333, 2004.
- [10] Khanna V. K, Journal of Physics D, Appl. Phys., vol. 44, p. 19, december, 2010.

## SUMMARY

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF STRUCTURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF MULTILAYER NI/CU THIN FILMS FOR USE IN MICROELECTRONIC TECHNOLOGIES

*Multilayer Ni/Cu thin films were produced by dual-bath electrodeposition technique (DBT) on polycrystalline cold-rolled Cu substrate. Different Ni/Cu multilayer structures were realized by changing of process parameters such as total film thickness, sublayer thickness and Ni/Cu sublayer thickness ratio. The mechanical properties of Vickers microhardness and interfacial adhesion in the films were investigated. Decreasing of sublayer thickness down to 300 nm and increasing of Ni:Cu sublayer thickness ratio to 1:4, lead to higher values of Vickers microhardness compared to monolayer metal films. Thin films with sublayer thicknesses from 75 nm to 5  $\mu$ m show strong interfacial adhesion. A weak adhesion and sublayer exfoliation for the films with sublayer thickness greater than 5 $\mu$ m were found. Three-dimensional Ni microstructures can be fabricated using multilayer Ni/Cu film by selective etching of Cu layers in an acidic thiourea solution („surface micromachining“ technique).*

**klju ne re i:** Ni/Cu electrochemical deposition; Multilayer thin films; Vickers microhardness; Interfacial adhesion; Selective etching