

DOLOČANJE KONCENTRACIJSKIH PROFILOV IN DIFUZIJSKIH PARAMETROV V TANKOPLASTNIH STRUKTURAH S PROFILNO ANALIZO IN MODELOM MRI

Matjaž Panjan, Anton Zalar, Janez Kovač, Miha Čekada, Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Koncentracijske profile tankih plasti določamo z metodami za površinsko analizo, kot sta npr. spektroskopija Augerjevih elektronov ali rentgenska fotoelektronska spektroskopija v kombinaciji z ionskim jedkanjem vzorcev. Natančnost teh metod je vedno omejena z globinsko ločljivostjo, zato so izmerjeni koncentracijski profili le približki dejanskih profilov. Natančnejše koncentracijske profile lahko določimo z modeli, pri katerih upoštevamo prispevke, ki vplivajo na globinsko ločljivost. V članku je predstavljen Hofmannov model MRI, ki upošteva tri glavne prispevke h globinski ločljivosti: mešanje atomov zaradi ionskega jedkanja (M), hrapavost površine (R) in izstopno globino elektronov (I). Z modelom MRI lahko na osnovi izmerjenih profilov natančno rekonstruiramo dejanske koncentracijske profile, poleg tega model omogoča tudi študij difuzije v tankih plasteh nanometrskih dimenzij. Iz izmerjenih koncentracijskih profilov toplotno obdelanih struktur lahko izračunamo difuzijsko konstanto in aktivacijsko energijo. V članku so opisani postopki za rekonstrukcijo koncentracijskih profilov in izračun difuzijskih parametrov za toplotno obdelano večplastno strukturo (Cr/Fe) \times 3.

Determination of concentration profiles and diffusion parameters in thin film structures using profile analysis and MRI model

ABSTRACT

Depth profiling by one of the surface analytical techniques such as Auger Electron Spectroscopy or X-ray Photoelectron Spectroscopy in combination with ion etching of the sample is most frequently used for chemical composition studies of thin film structures. Accuracy of these methods is limited by depth resolution, therefore measured depth profiles are only an estimate of actual depth profile. More accurate depth profiles can be obtained with models which take into account different effects on depth resolution. In the paper the Hofmann MRI model is presented. Model includes three major contributions to depth resolution: mixing of atoms due to ion etching (M), roughness (R) and information depth of electrons (I). Using MRI model it is possible to reconstruct actual depth profiles and study diffusion in nanometer thick thin films. From the measured depth profiles of annealed samples it is possible to calculate diffusion constant and activation energy. The paper describes steps for reconstruction of depth profiles and calculation of diffusion parameters for annealed (Cr/Fe) \times 3 multilayer structure.

1 UVOD

Porazdelitev koncentracije elementov v odvisnosti od debeline tankih plasti določamo z metodami za profilno analizo (npr. AES, XPS, SIMS). Že izbira metode določa instrumentalne vplive na globinsko ločljivost, zaradi katerih izmerjeni koncentracijski profili niso enaki dejanskim. Med profilno analizo želimo zmanjšati te vplive in se čim bolj približati dejanskim koncentracijskim profilom. Posamezne prispevke, ki vplivajo na globinsko ločljivost, ugotav-

ljamo z modelnimi izračuni. Razvitih je bilo več modelov, s katerimi bolj ali manj uspešno rekonstruiramo izmerjene koncentracijske profile. Model MRI, ki ga je razvil Hofmann ⁽¹⁾, upošteva tri glavne prispevke h globinski ločljivosti: mešanje atomov zaradi ionskega jedkanja (M), hrapavost površine (R) in izstopno globino elektronov (I). V zadnjih letih so model izpopolnili še z upoštevanjem drugih vplivov, npr. prednostnim ionskim jedkanjem posameznih plasti ⁽²⁾ in povratnim sipanjem elektronov ^(3,4). Poleg rekonstrukcije dejanskih koncentracijskih profilov model omogoča tudi študij difuzije v večplastnih strukturah. Iz koncentracijskih profilov vzorcev, ki so bili toplotno obdelani pri različnih temperaturah, lahko z modelom izračunamo difuzijsko konstanto in aktivacijsko energijo. Z modelom MRI lahko raziskujemo tudi, kako različni parametri profilne analize vplivajo na področje mešanja atomov w , hrapavost σ in informacijsko globino λ .

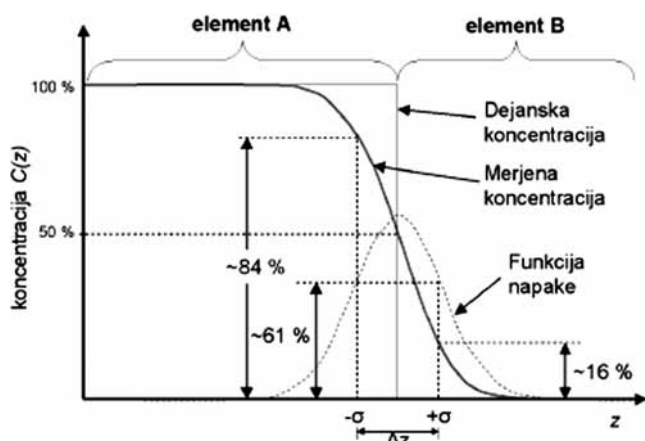
2 DOLOČANJE KONCENTRACIJSKIH PROFILOV Z MODELOM MRI

Globinska ločljivost Δz je merilo za natančnost profilne analize. Definirana je kot razdalja, na kateri se koncentracija elementa A na fazni meji A/B zmanjša od 84 % na 16 % (slika 1) ⁽⁵⁾. Globinsko ločljivost lahko zapišemo kot vsoto kvadratov različnih fizikalno-kemijskih vplivov ⁽⁶⁾:

$$\Delta z = \sqrt{\Delta z_w^2 + \Delta z_\lambda^2 + \Delta z_{\sigma_0}^2 + \Delta z_\sigma^2 + \Delta z_d^2 + \Delta z_i^2} \quad (2.1)$$

Posamezni prispevki so: Δz_w – mešanje atomov, ki ga povzroči ionsko jedkanje, Δz_λ – informacijska globina, iz katere izhajajo Augerjevi elektroni, Δz_{σ_0} – hrapavost površine, Δz_σ – hrapavost, ki jo povzroči ionsko jedkanje, Δz_d – difuzija elementov in Δz_i – drugi prispevki. Vsi ti prispevki vplivajo tako, da izmerjeni koncentracijski profil ni enak dejanskemu. V splošnem je Gaussov približek funkcije globinske ločljivosti dovolj natančen za nizko in srednjo vrednost $\Delta z > 3$ nm. Razlog za to je, da sta največja prispevka h globinski ločljivosti posledica začetne in z ioni povzročene hrapavosti, ki imata Gaussovo porazdelitev.

Za koncentracijske profile z veliko globinsko ločljivostjo, $\Delta z < 3$ nm, je oblika funkcije globinske ločljivosti asimetrična. Manjše detajle lahko razlo-



Slika 1: Definicija globinske ločljivosti Δz . Funkcija napake je enaka $dc(z)/dz$. Če koncentracijski profil aproksimiramo z Gaussovimi integralom (error function), je funkcija napake sorazmerna Gaussovi porazdelitvi s standardnim odklonom σ , globinska ločljivost pa je enaka $\Delta z = 2\sigma$.

čimo samo z razvojem ustrezne funkcije globinske ločljivosti. Tako veliko natančnost dosežemo z opisom funkcije globinske ločljivosti, ki jo omogoča model MRI. Pri tem modelu asimetrični prispevki k funkciji globinske ločljivosti izvirajo iz kaskadnega mešanja atomov in vpliva izstopne globine elektronov, ki sta upoštevana z dvema eksponentnima funkcijama. Tretji asimetrični prispevek k funkciji globinske ločljivosti je posledica vpliva prednostnega jedkanja (razmerje hitrosti ionskega jedkanja r), ki ga upoštevamo s predpostavko linearne odvisnosti hitrosti jedkanja od sestave.

Simetrični prispevek k funkciji globinske ločljivosti obsega začetno hrapavost površine vzorca in hrapavost, povzročeno z ionskim jedkanjem, ter notranjo hrapavost faznih mej. Na enak način je upoštevan tudi prispevek k funkciji globinske ločljivosti, ki ga na faznih mejah povzroči difuzija.

Iz izmerjenega koncentracijskega profila lahko določimo dejanski koncentracijski profil, če poznamo spreminjanje globinske ločljivosti z globino, kar opišemo s funkcijo globinske ločljivosti $g(z)$. Normaliziran izmerjen koncentracijski profil $I(z)/I(0)$ je namreč enak konvoluciji dejanskega koncentracijskega profila $X(z')$ in funkciji globinske ločljivosti $g(z-z')$:

$$\frac{I(z)}{I(0)} = \int_{-\infty}^{\infty} X(z')g(z-z') dz' \quad (2.2)$$

Dejanski koncentracijski profil lahko iz zgornje enačbe izračunamo z dekonvolucijo. To pomeni, da z inverzno Fourierovo transformacijo izračunamo $X(z')$, če poznamo $I(z)/I(0)$ in $g(z-z')$:

$$X(z) = F^{-1} \left(\frac{F(I(z)/I(0))}{F(g(z))} \right) \quad (2.3)$$

kjer F označuje Fourierovo transformacijo, F^{-1} pa inverzno Fourierovo transformacijo. V praksi je tak način reševanja težaven. Problema se raje lotimo drugače. Najprej ocenimo koncentracijski profil $X(z')$ ter iz enačbe izračunamo prilagojeni koncentracijski profil. Tega nato primerjamo z izmerjenim profilom $I(z)/I(0)$. Če ujemanje ni dobro, spreminjamo profil $X(z')$ toliko časa, da se izračunani in izmerjeni profil čim bolj ujemata.

Za pravilno transformacijo izmerjenega profila v dejanski koncentracijski profil je treba čim natančneje opisati prispevke, ki vplivajo na funkcijo globinske ločljivosti. Model, ki opisuje glavne prispevke, je razvil Hofmann⁽⁶⁾. Model se imenuje **MRI** in upošteva, da na globinsko ločljivost najbolj vplivajo: mešanje atomov zaradi ionskega jedkanja (ang. M – "Mixing of atoms"), hrapavost površine (ang. R – "Roughness") in izstopna globina merjenih elektronov oz. informacijska globina (ang. I – "Information depth").

Pri obstreljevanju materiala z ioni se atomi v površinskem delu vzorca premešajo do neke značilne razdalje w . Mešanje atomov zaradi ionskega jedkanja opišemo z eksponentno funkcijo:

$$g_w = \frac{1}{w} e^{-\frac{z-z'+w}{w}} \quad z' - w < z \quad (2.4)$$

kjer je w karakteristična razdalja področja mešanja atomov, z globina odjedkanega materiala, z' pa globina, na kateri se nahaja določena atomska plast, ki povzroča AES- ali XPS-signal. Z eksponentno funkcijo opišemo tudi prispevek informacijske globine analiziranih delcev (npr. Augerjevih elektronov), ki izhajajo s karakteristične razdalje λ :

$$g_\lambda = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{z-z'}{\lambda}} \quad z' > z \quad (2.5)$$

Prispevek hrapavosti površine opišemo s simetrično Gaussovo porazdelitvijo širine σ :

$$g_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(z-z')^2}{2\sigma^2}} \quad \text{za vse } z \quad (2.6)$$

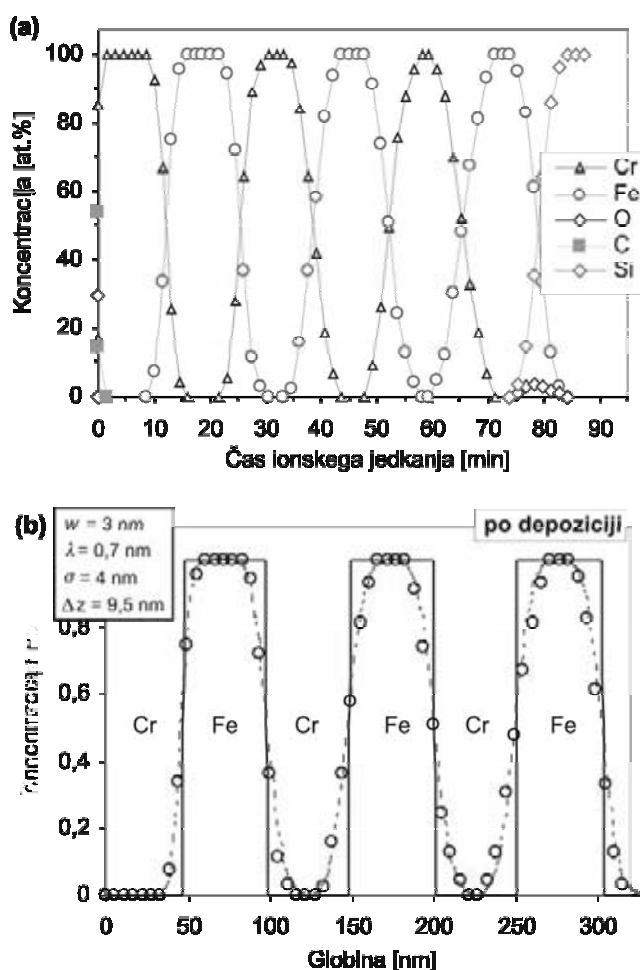
V tem členu sta upoštevani tudi hrapavost na faznih mejah in hrapavost, ki jo povzroči ionsko jedkanje. Produkt zgornjih treh prispevkov sestavlja funkcijo globinske ločljivosti $g(z-z') = g_w \cdot g_\lambda \cdot g_\sigma$. Če v definicijo globinske ločljivosti (enačba (2.1)) vstavimo zgornje prispevke (enačbe od (2.4) do (2.6)), dobimo, da je globinska ločljivost, izračunana z modelom MRI, enaka⁽⁷⁾:

$$\Delta z = \sqrt{\Delta z_w^2 + \Delta z_\lambda^2 + \Delta z_\sigma^2} = \sqrt{(1,668w)^2 + (1,668\lambda)^2 + (2\sigma)^2} \quad (2.7)$$

Parametre w , λ in σ ocenimo s teoretičnimi izračuni ali z neodvisnimi eksperimentalnimi metodami. Karak-

teristično razdaljo mešanja atomov w lahko ocenimo iz simulacije ionskega obstreljevanja materiala – SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter), ki temelji na enačbah Biersacka ⁽⁸⁾. Parameter λ za informacijsko globino dobimo po enačbi, ki jo je predložil Tanuama s sodelavci ⁽⁹⁾ in jo uporablja računalniški program NIST (Electron Inelastic-Mean-Free-Path). Program izračuna pot, ki jo elektron prepotuje v določeni snovi, preden se neelastično sipa. Hrapavost površine lahko določimo z mikroskopom na atomsko silo (AFM) ali s profilometrom.

Poglejmo primer rekonstrukcije koncentracijskega profila na večplastni strukturi (Cr/Fe) \times 3. Slika 2a prikazuje koncentracijski profil, izmerjen s profilno analizo AES. Struktura je periodična s približno enako debelino plasti, vendar se z globino jedkanja globinska ločljivost slabša. Iz izmerjenega koncentracijskega profila lahko z modelom MRI rekonstruiramo dejanski koncentracijski profil strukture. Za rekonstrukcijo lahko uporabimo koncentracijski profil kroma ali železa. V našem primeru smo izbrali železov kon-



Slika 2: (a) Koncentracijski AES-profil večplastne strukture (Cr/Fe) \times 3 na siliciju, izmerjen po deposiciji. (b) Primerjava med izmerjenim (krožci) koncentracijskim profilom in tistim, ki smo ga izračunali z modelom MRI (črtkana črta). Rekonstruiran dejanski koncentracijski profil železa označuje polna črta.

centracijski profil, ker je bila površina kromove plasti kontaminirana z ogljikom in oksidirana. Parametra mešanja atomov w in informacijske globine λ smo ocenili s programoma SRIM in NIST. Za obe vrsti materiala (krom in železo) sta bila parametra približno enaka: $w = 3$ nm, $\lambda = 0,7$ nm. Parameter hrapavosti σ smo ocenili iz hrapavosti, ki smo jo izmerili s profilometrom, $\sigma = 4$ nm. Iz znane funkcije globinske ločljivosti in predpostavljenega koncentracijskega profila smo z enačbo izračunali koncentracijski profil in ga primerjali z izmerjenim. Izračunani in izmerjeni profil sta se dobro ujemala, vendar smo z minimalnim premikom nekaterih faznih mej ujemanje še izboljšali. Rekonstruiran dejanski koncentracijski profil železa je na sliki 2b označen z neprekinjeno črto.

3 DOLOČANJE DIFUZIJSKIH PARAMETROV Z MODELOM MRI

Predn opišemo postopek določanja difuzijskih parametrov z modelom MRI, zapišimo osnovne enačbe difuzije. Difuzija označuje transport atomov z enega mesta na drugo, ki poteka, dokler se ne vzpostavi ravnotežno stanje. Gonilna sila za difuzijo je gradient kemijskega potenciala, ki je posledica kompleksnih medatomske sil. Gradient kemijskega potenciala najpogosteje nastane zaradi gradienta koncentracije. Glede na vrsto difundirajočih atomov razlikujemo *heterodifuzijo*, kadar difundirajo primesni atomi, in *samodifuzijo*, kadar difundirajo atomi osnove. Glede na to, kako so atomi vezani v kristalni strukturi, difuzijo razdelimo na substitucijsko in intersticijsko. Substitucijska difuzija poteka v substitucijskih trdnih raztopinah in pri samodifuziji (npr. difuziji atomov v čisti kovini), intersticijski pa v intersticijskih trdnih raztopinah. Difuzija v substitucijskih zlitinah poteka počasneje kot v intersticijskih zlitinah. Razlog je v tem, da je gibanje atomov v substitucijskih zlitinah oteženo, saj lahko preskočijo le na prosta mesta v kristalni strukturi, intersticijski atomi pa zaradi manjše velikosti in majhne koncentracije lažje preskakujejo na sosednja mesta. Difuzijo v trdnih snoveh opisujeta prvi in drugi Fickov zakon.

Stacionarno difuzijo, ki poteka med dvema krajevoma z različnima koncentracijama, opisuje *prvi Fickov zakon*. Številski gostota delcev J (substitucijskih oz. intersticijskih atomov) je sorazmerna gradientu koncentracije $\partial c/\partial x$ in difuzijskemu koeficientu D ⁽¹⁰⁾:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.8)$$

Difuzijski koeficient D je pomemben parameter, saj nam pove, s kakšno frekvenco preskakuje atom na sosednja mesta pri določeni temperaturi. Odvisen je od tega, ali poteka substitucijska ali intersticijska

difuzija. Pri intersticijski difuziji večinoma difundirajo samo intersticije, medtem ko pri substitucijski difuziji difundirajo različni elementi hkrati, zato je difuzijski koeficient kombinacija difuzijskih koeficientov vseh komponent. Na primer, v binarni zlitini je difuzijski koeficient enak $D = X_B D_A + X_A D_B$, pri čemer sta X_A in X_B molska deleža komponent A in B. Vrednosti difuzijskega koeficienta v substitucijskih zlitinah so tipično nižje od difuzijskih koeficientov v intersticijskih zlitinah.

Prvi Fickov zakon velja le za primer, če je koncentracijski gradient neodvisen od časa. V večini praktičnih primerov to ne drži, saj se koncentracija na določenem kraju spreminja s časom. Časovno in krajevno spreminjanje koncentracije opisuje drugi Fickov zakon (10):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

Diferencialno enačbo lahko rešimo, če poznamo začetne in robne pogoje.

Atomi zaradi termične energije nihajo okrog svojih ravnotežnih leg, preskok na sosednje mesto se zgodi samo, če atom za to prejme dovolj energije. Energiji, ki je potrebna za preskok atoma na sosednje mesto, pravimo *aktivacijska energija* (E_a). Difuzijski koefi-

cient je eksponentno odvisen od temperature in aktivacijske energije ⁽¹⁰⁾:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.10)$$

D_0 je *difuzijska konstanta*, ki je neodvisna od temperature. V primeru intersticijske difuzije je aktivacijska energija odvisna samo od energijske pregrade, pri substitucijski difuziji pa je vsota energije za premagovanje pregrade in tvorbene energije za nastanek praznine, zato so vrednosti aktivacijske energije za preskoke intersticij manjše od tistih za preskoke substitucij.

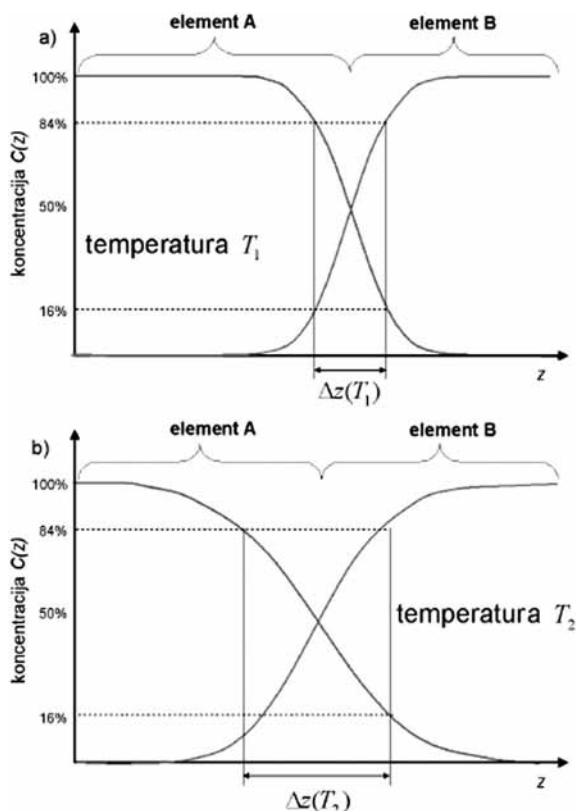
V toplotno obdelanih strukturah lahko z modelom MRI izračunamo difuzijske koeficiente, iz tistih, dobljenih pri različnih temperaturah, pa lahko določimo difuzijsko konstanto in aktivacijsko energijo. Difuzija povzroči razširitev fazne meje (slika 3), zato jo lahko obravnavamo kot enega od prispevkov h globinski ločljivosti. Difuzija je pri sobni temperaturi zanemarljiva, pri povišanih temperaturah pa difuzijski člen Δz_d (enačba (2.1)) prevlada v funkciji globinske ločljivosti. Pri modelu MRI upoštevamo difuzijo na podoben način kot prispevek hrapavosti. Funkciji globinske ločljivosti dodamo člen g_d , ki ima obliko Gaussove funkcije:

$$g_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} e^{-\frac{(z-z')^2}{2\sigma_d^2}} \quad \text{za vse } z \quad (2.11)$$

kjer je σ_d parameter difuzije. Difuzijske parametre določimo po naslednjem postopku. Najprej za nepregrto strukturo ugotovimo dejanski koncentracijski profil. Tega nato uporabimo za analizo toplotno obdelanih struktur. Predpostavimo, da po toplotni obdelavi ostanejo vsi parametri w , λ in σ enaki, spremeni pa se le parameter difuzije σ_d . Parameter difuzije spreminjamo toliko časa, dokler ne dobimo najboljšega ujemanja med izmerjenim koncentracijskim profilom toplotno obdelane strukture in koncentracijskim profilom, ki ga izračunamo z modelom MRI. Funkcija globinske ločljivosti je potemtakem $g(z-z') = g_w \cdot g_\lambda \cdot g_\sigma \cdot g_d$. Širina fazne meje toplotno obdelane strukture se poveča samo zaradi difuzije, zato lahko zapišemo, da je razširitev fazne meje po toplotni obdelavi enaka povprečni difuzijski poti atomov ⁽¹¹⁾

$$\sigma_d = \sqrt{2Dt} \quad (2.12)$$

Iz te enačbe lahko pri določeni temperaturi in po določenem času toplotne obdelave t izračunamo difuzijski koeficient D . Iz znanih difuzijskih koeficientov pa lahko iz enačbe določimo difuzijsko konstanto D_0 in aktivacijsko energijo E_a .

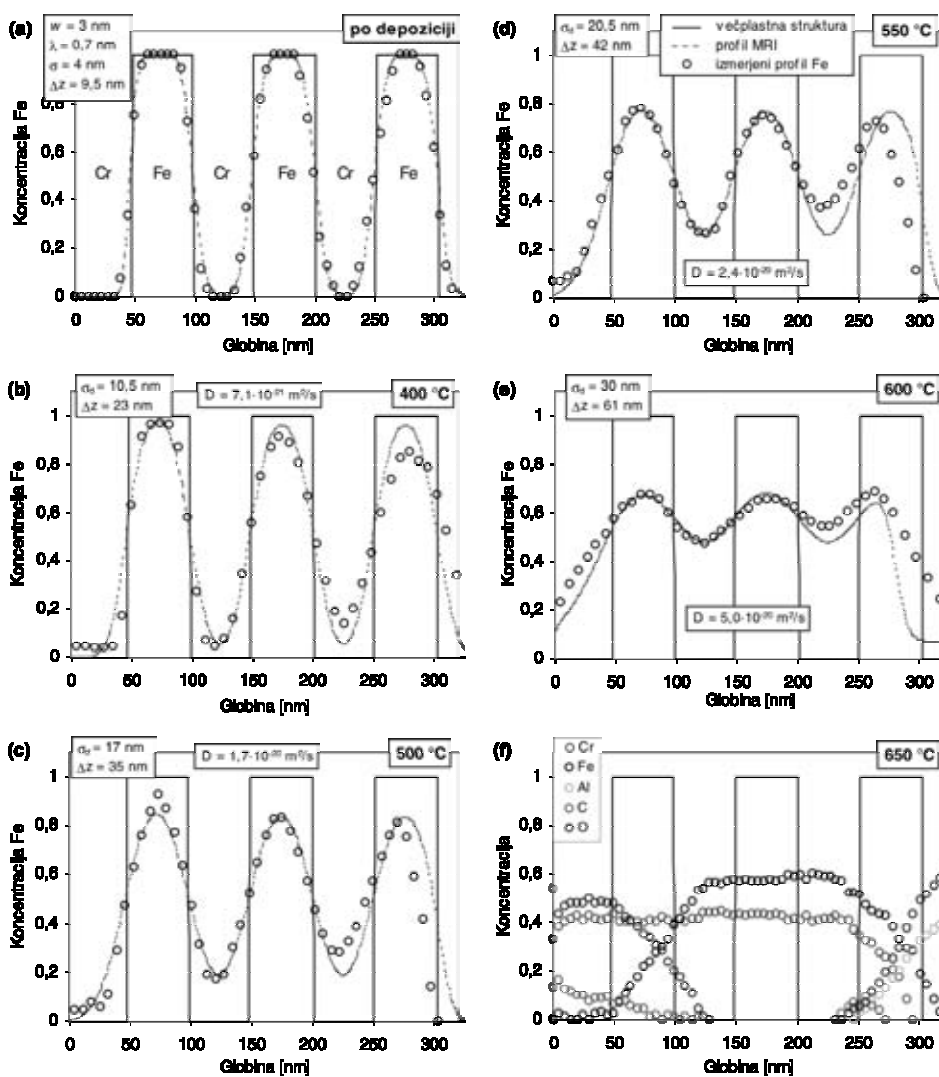


Slika 3: Difuzija povzroči širjenje fazne meje v globinskem profilu. (a) Koncentracijski profil dvoplastne strukture A/B pri temperaturi T_1 . (b) Koncentracijski profil iste strukture, izpostavljene povišani temperaturi T_2 .

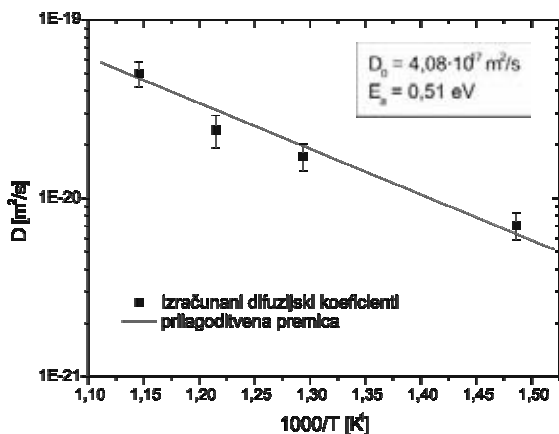
Poglejmo si primer določanja difuzijskih parametrov pri večplastni strukturi (Cr/Fe) \times 3, ki je bila toplotno obdelana 2 h pri temperaturah 400, 500, 550, 600 in 650 °C (slike 4b–f). Izmerjeni profili jasno kažejo difuzijo atomov v sosednje plasti. Difuzija je pri višjih temperaturah intenzivnejša, pri 650 °C pa pride do popolnega premešanja plasti (slika 4f). Iz izmerjenih profilov toplotno obdelanih struktur in z modelom MRI lahko relativno preprosto izračunamo hitrost difuzije oz. difuzijske parametre. Najprej z modelom MRI izračunamo koncentracijske profile, pri čemer uporabimo dejanski koncentracijski profil in parametre, ki smo jih določili za nepregreto strukturo (slika 4a). Profile prilagajamo le s spreminjanjem parametra difuzije, drugih parametrov ne spreminjamo. Koncentracijski profili po toplotni obdelavi so simetrični, iz česar sklepamo, da so kromovi atomi enako hitro difundirali v železove plasti kot železovi v

kromove. Iz najboljšega ujemanja med izračunanim in izmerjenim koncentracijskim profilom dobimo naslednje vrednosti parametrov difuzije σ_d : 10,5 nm (400 °C), 17 nm (500 °C), 20,5 nm (550 °C) in 30 nm (600 °C). Povprečna difuzijska pot nam pove, kolikšno razdaljo v povprečju prepotujejo atomi v določenem času in pri določeni temperaturi. Pri temperaturi 400 °C atomi v dveh urah v povprečju prepotujejo razdaljo približno 10,5 nm.

Profile smo prilagajali tako, da sta se naklon in amplituda izračunanih profilov najboljše ujemala z izmerjenimi profili v prvi in drugi plasti železa. Tretja fazna meja je bila Fe/Al₂O₃, zato je na njih difuzija potekala drugače kot na mejah Cr/Fe in Fe/Cr. Iz znanih povprečnih difuzijskih poti smo izračunali difuzijske koeficiente (enačba (2.12)) D : $7,1 \cdot 10^{-21}$ m²/s, $1,7 \cdot 10^{-20}$ m²/s, $2,4 \cdot 10^{-20}$ m²/s in $5,0 \cdot 10^{-20}$ m²/s. Iz difuzijskih koeficientov pri različnih temperaturah



Slika 4: Koncentracijski profili AES za večplastno strukturo (Cr/Fe) \times 3 po deposiciji in po toplotni obdelavi pri različnih temperaturah. Krožci pomenijo eksperimentalne podatke, črtkana črta profil, izračunan po modelu MRI, neprekinjena črta pa rekonstruiran profil. (a) Koncentracijski profil za (Cr/Fe) \times 3 / Si po deposiciji, (b–f) koncentracijski profili za toplotno obdelane strukture, 2 h pri temperaturah 400, 500, 550, 600 in 650 °C (podlaga Al₂O₃). Struktura pri 650 °C se je popolnoma premešala, približno tretjina plasti pa je oksidirala.



Slika 5: Odvisnost difuzijskega koeficienta D od temperature toplotne obdelave. Iz ekstrapolacije premice določimo difuzijsko konstanto D_0 , iz naklona premice pa aktivacijsko energijo E_a .

(Arrheniusov diagram) pa smo nato izračunali difuzijsko konstanto $D_0 = 4,08 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ in aktivacijsko energijo $E_a = 0,51 \text{ eV}$ (slika 5).

V strukturi (Cr/Fe) \times 3 poteka le substitucijska difuzija, saj so železovi in kromovi atomi približno enake velikosti. Aktivacijske energije za substitucijsko difuzijo so velikostnega reda $\approx 2 \text{ eV}$, kar je precej več kot v našem primeru. Razlog za nizko aktivacijsko energijo je najverjetneje povezan z mikrostrukturo večplastne strukture. Plasti so bile narejene s PVD-postopkom. Za plasti, narejene po teh postopkih, je značilno, da imajo plasti veliko število točkovnih napak, dislokacij, kristalnih mej in stebričasto mikrostrukturo. Zaradi tega atomi hitreje difundirajo skozi strukturo. Praznine in napake znižajo aktivacijsko energijo, saj ima atom pri preskoku na voljo večje število prostih mest. Nižje vrednosti aktivacijskih energij in difuzijskih konstant v večplastnih tankih plasteh so opazili tudi drugi avtorji^(11–13).

4 SKLEP

Sedaj je v uporabi več različnih metod za profilno analizo (npr. AES, XPS, SIMS), s katerimi določamo koncentracijske profile tankih plasti. Kvaliteta teh analiz je odvisna od natančnosti metod. Kljub tehničnim izboljšavam bodo metode za profilno analizo vedno omejene s končno globinsko ločljivostjo. Edini način za natančnejše določanje koncentracijskih profilov je uporaba modelov za rekonstrukcijo profilov. Model MRI, ki ga je razvil Hofmann, se je v praksi pokazal za najuspešnejšega, zato se danes najpogosteje uporablja. Z njim lahko relativno preprosto rekonstruiramo koncentracijske profile, študiramo difuzijo v nanoplastnih strukturah ali pa raziskujemo vpliv ionskega jedkanja na parametre mešanja w , hrapavosti σ in informacijske globine λ . Študij difuzije in določanje difuzijskih parametrov v delu ilustriramo s preiskavo večplastne strukture (Cr/Fe) \times 3, ki smo jo toplotno obdelali pri različnih temperaturah v območju 400–650 °C.

5 LITERATURA

- ¹S. Hofmann, *Interface Anal.* **27** (1999), 825
- ²J. Y. Wang, A. Zalar, Y. H. Zhao, E. J. Mittemeijer, *Thin Solid Films* **433** (2003), 92
- ³A. Zalar, J. Kovač, B. Praček, S. Hofmann, P. Panjan, *Appl. Surf. Sci.* **252** (2005), 2056
- ⁴S. Hofmann, J.Y. Wang, *Surf. Interface Anal.* **39** (4) (2007), 324
- ⁵S. Hofmann, *Surf. Interface Anal.* **30** (1986), 228
- ⁶S. Hofmann, *Surf. Interface Anal.* **21** (1994), 673
- ⁷S. Hofmann, *Surf. Interface Anal.* **30** (2000), 228
- ⁸J. P. Biersack, *Nucl. Instrum. Methods B* **27** (1987), 21
- ⁹S. Tanuama, C. J. Powell, D. R. Penn, *Surf. Interface Anal.* **17** (1991), 927
- ¹⁰D. A. Porter, K. E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, Van Nostrand Reinhold, Berkshire, (1988)
- ¹¹V. Kesler, S. Hofmann, *J. Surf. Anal.* **9** (2002), 428
- ¹²J. Y. Wang, A. Zalar, E. J. Mittemeijer, *Appl. Surf. Sci.* **222** (2004), 171
- ¹³A. Zalar, S. Hofmann, P. Panjan, *Vacuum* **48** (1997), 625