

MAGNETRONSKO NANAŠANJE VOLFRAMSKIH TANKIH PLASTI

Andrej Furlan, Nikola Radić

Institut »Ruđer Bošković«, Laboratorij za tanke filmove, Bijenička 54, 10000 Zagreb

POVZETEK

Volframske tanke plasti imajo zaradi svojih odličnih mehanskih in kemičnih lastnosti široko uporabo v industriji. Eden od načinov priprave volframskih tankih plasti je magnetronsko nanašanje. Ta postopek je sicer praktičen za industrijsko uporabo, vendar moramo upoštevati tudi njegove pomanjkljivosti, sicer je kakovost nanese volframske tanke plasti slaba. V tem delu obravnavamo probleme magnetronskega nanašanja volframskih tankih plasti. Opisujemo mehanizem nanašanja in pojav notranjih napetosti ter metastabilne β -faze volframa v odvisnosti od parametrov nanašanja.

Deposition of tungsten thin films by magnetron sputtering

ABSTRACT

Due to their excellent mechanical and chemical properties the tungsten thin films used very often in industry. One of the possible ways of their preparation is magnetron sputtering. This procedure can be easily used in the industrial practice. In order to obtain high quality films we have to consider also its drawbacks. In this paper the problems of magnetron sputtering of tungsten thin films are described. The mechanisms of growth, the intrinsic stress phenomena and the occurrence of metastable β -phase as a function of deposition parameters are explained.

1 UVOD

Zaradi svojih odličnih mehanskih lastnosti, visokotemperaturne stabilnosti in korozijske obstojnosti se volfram uporablja v industriji v različne namene. Prav zaradi teh izjemnih lastnosti je obdelava volframa zelo zahtevna. Zaradi tega je njegova uporaba pri izdelavi masivnih komponent še vedno zelo omejena. Namesto da bi celotne komponente izdelali iz volframa, raje uporabljamo postopek nanašanja tanke plasti volframa na komponente, ki so narejene iz materialov, ki jih je lažje obdelovati. Tako tanka plast volframa ščiti osnovni material pred zunanjimi vplivi. Eden od najpogostejših načinov nanašanja volframskih tankih plasti v industriji je magnetronski. Da bi pripravili tanko plast z želenimi lastnosti, je treba poznati značilnosti postopka tega nanašanja. Glavna značilnost pri tem je pojav notranjih napetosti v plasti. Te se pri magnetronskem nanašanju vedno pojavljajo in vplivajo na oprijemljivost plasti na podlago, kar zahteva uporabo plasti za določen namen. Razen tega se poleg stabilne α -faze volframa pod določenimi pogoji pojavlja tudi metastabilna β -faza, ki ni vedno zaželena.

2 INDUSTRIJSKA UPORABA MAGNETRONSKEGA NANAŠANJA VOLFRAMSKIH TANKIH PLASTI

Volfram se pogosto uporablja v mikroelektronskih vezjih z zelo visoko (VLSI) in ultravisoko stopnjo

integracije (ULSI) za metalizacijo in izdelavo povezav. Za ta namen se volfram najpogosteje nanaša na podlago z magnetronskim nanašanjem, čeprav se pri takšnem nanašanju pojavljajo nekatere težave. Prva je pojav mehanskih napetosti, ki je sestavljena iz dveh delov: napetost, ki se redno pojavlja kot posledica samega mehanizma nanašanja, in napetost zaradi nastanka že omenjene metastabilne β -faze volframa. Le-ta nastane, ker je magnetronsko nanašanje termično neravnotežen proces. Če so napetosti dovolj velike, lahko povzročijo luščenje plasti s podlage. Druga težava je visoka električna upornost β -faze volframa, zaradi česar so plasti z večjim deležem te faze neuporabne v mikroelektroniki.

V začetku osemdesetih let se je začela uporaba volframskih tankih plasti pri izdelavi mask za rentgensko svetlobo v rentgenski litografiji (XRL)⁽¹⁾. Za te namene se je prej uporabljalo zlato. Zaradi podobnega koeficienta absorpcije rentgenskih žarkov v območju valovnih dolžin 0,7-1,2 nm, ki so zanimive za XRL, volfram v zadnjem času vse bolj zamenjuje zlato. Med litografskimi procesi za submikrometerske tehnologije ima XRL zaradi svoje visoke ločljivosti veliko prednost. Maska za rentgenske žarke je sestavljena iz šablone, ki je določena s tanko plastjo težke kovine (ki dobro absorbira rentgensko svetlobo) debeline 100-600 nm, nanese na membrano, ki je prepustna za te žarke. Absorpcijska plast mora imeti veliko gostoto zaradi velike energije ustavljanja. Da bi se izognili popačenosti maske zaradi napetosti v nanese plasti, morajo biti le-te čim manjše in enakomerno razporejene v plasti.

Drugi primer uporabe volframskih tankih plasti je zaščita različnih komponent pred nezaželenimi vplivi, ki so jim izpostavljene med uporabo. Nezaželeni vplivi so lahko mehanske, toplotne ali kemične narave. Uporaba volframskih tankih plasti je zaradi izvrstnih lastnosti volframa velikega pomena.

Dober primer takšne uporabe je zaščita turbinskih lopatic pri reakcijskih motorjih (plinske turbine). Lopatice turbine so izpostavljene plinom iz komore za sežiganje, ki so segreti na temperaturo, višjo od tališča kovine, iz katere so narejene (lopatice se hladijo z zunanje strani skozi vmesne kanale s pretokom mrzlega zraka). Poleg tega so lopatice izpostavljene še korozijskim produktom, ki nastanejo med gorenjem, in močnim centrifugalnim silam, ki nastajajo zaradi hitrega vrtenja turbine. Jasno je, da v takšnih razmerah uporaba igra pomembno vlogo oprijemljivost plasti na podlago.

Do sedaj so v te namene uporabljali skoraj izključno plasti volframovega karbida (WC). V zadnjem času so se v nekaterih britanskih revijah za letalstvo pojavila poročila, da so se pri najnovejši generaciji motorjev začele uporabljati plasti čistega volframa. Pred tem je bilo očitno potrebno rešiti problem oprijemljivosti čistih volframskih plasti na podlago. Zaradi industrijske in vojaške uporabe teh tehnologij literaturni podatki niso dosegljivi.

Novejša uporaba volframskih tankih plasti, ki jo velja omeniti, so poskusi uporabe volframa pri izdelavi pihalnih glasbil. Prvi takšni poskusi so bili narejeni pred tremi ali štirimi leti pri izdelavi ustnikov za flavte. Ti deli so posebno občutljivi, ker so pri uporabi nenehno izpostavljeni vlagi (iz ust). Pomembno je preprečiti tudi nastanek kakršnekoli oksidacijske plasti. Za te namene se navadno uporablja srebro, platina ali zlato z večjim deležem bakra. Te kovine imajo visoko ceno, pa tudi nagnjenost k poškodbam je velika. Torej bi volfram pomenil idealno zamenjavo. Po prvih poskusih z volframom so delo prekinili zaradi izredno težke obdelave volframa. Tukaj se odpirajo možnosti za uporabo volframovih tankih plasti. Ustnik, ki bi bil narejen iz materiala, ki ga je lažje obdelovati, bi lahko zaščitili s tanko plastjo volframa.

3 MEHANIZEM NANAŠANJA TANKIH PLASTI

Pri postopku nanašanja tankih plasti z magnetronom je zgradba plasti odvisna od energije delcev, ki se kondenzirajo v tanki plasti. Delci, ki so razpršeni iz katode, imajo določeno energijsko porazdelitev. Na poti od katode do podlage izgubljajo energijo pri trkih z atomi delovnega plina v magnetronu. Energija in vpadni kot razpršenih delcev glede na podlago v največji meri določata ali ima plast amorfno ali kristalinično zgradbo. Poleg tega vplivata na velikost, mikrostrukturo in usmerjenost kristalnih zrn ter delež praznin. Za računanje energijske porazdelitve, ki jih imajo delci pri trku s podlago, je bilo treba razviti modele, ki opisujejo gibanje delcev od katode do podlage. To gibanje je v magnetronu zelo zapleteno. Zato je treba pri oblikovanju modela nujno uvesti veliko aproksimacij in povprečij.

Za gibanje razpršenih delcev v magnetronu so najpomembnejši: a) trki med razpršenimi delci in delci delovnega plina, ki so podobni trkom med trdimi krogli, z Lenard-Jonesovim potencialom ali z nekim drugim potencialom medsebojnega delovanja, ki je odvisen od energije delcev, b) problem kotne porazdelitve razpršenih delcev po trkih, c) problem začetne energijske porazdelitve razpršenih delcev in č) dogajanje z delci, ki so se odbili nazaj. V nekaterih

primerih je za kote razpršitve in za začetne energije možno vzeti povprečne vrednosti, toda za natančnejše modele se problem močno zaplete.

Energijsko porazdelitev razpršenih atomov lahko približno opišemo z izrazom ⁽²⁾:

$$n(E) = BE^{1/2} \cdot \exp(-E/E_0)$$

kjer je B konstanta, sorazmerna razpršitvenemu koeficientu (*sputtering yield*) in verjetnosti ionizacije delcev z elektroni iz plazme, E_0 pa je značilna vrednost energijske razdelitve. Z naraščanjem energije ionov, ki razpršujejo katodo, vrednost E_0 raste, kar pomeni, da povprečna energija razpršenih delcev raste.

Modeli prenosa delcev v magnetronu se delijo na numerična – Monte Carlo simulacije – in analitična računanja. Mehanizem prenosa delcev snovi, ki se vgrajujejo v tanko plast, od katode do podlage skozi delovni plin v cilindričnem magnetronu lahko opišemo s tremi modeli ⁽³⁾. Tlaki delovnega plina, ki veljajo za posamezni model, so bili izračunani za oddaljenost podlage od katode 50 mm in za napetost na magnetronu 380 V;

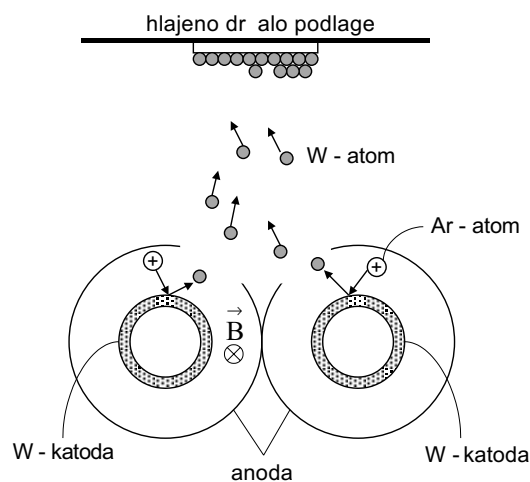
- 1) Po modelu, kjer privzamemo, da je prelet razpršenih delcev prost, se aproksimira situacijo, ko je število trkov na dolžini poti razpršenih atomov zanemarljivo. Da bi ta aproksimacija veljala, mora biti razmerje povprečne proste poti λ in dolžine narejene poti r večje od 1: $\lambda/r > 1$. Primerjava modeliranih in eksperimentalnih rezultatov pokaže, da v primeru volframa in za oddaljenost med katodo in podlago 50 mm takšen model velja do tlaka delovnega plina argona okoli 0,7 Pa.
- 2) Z naraščanjem tlaka delovnega plina v magnetronu se število trkov povečuje, tako da pri določenemu tlaku število trkov ni več zanemarljivo. Tu je treba upoštevati elastične trke med razpršenimi delci in atomi delovnega plina, zaradi česar se del delcev razpršuje nazaj in nikoli ne pride do podlage. Posledica je dejansko zmanjšanje gostote toka vstopajočega curka. Takšen model velja pri volframu za tlake delovnega plina do okoli 2 Pa.
- 3) Za večje tlake delovnega plina se število trkov toliko poveča, da niso več dvomljivi posamezni trki, pač pa se tok razpršenih delcev modelira z difuzijsko kontroliranim transportom.

4 METODE MAGNETRONSKEGA NANAŠANJA VOLFRAMSKIH TAKIH PLASTI

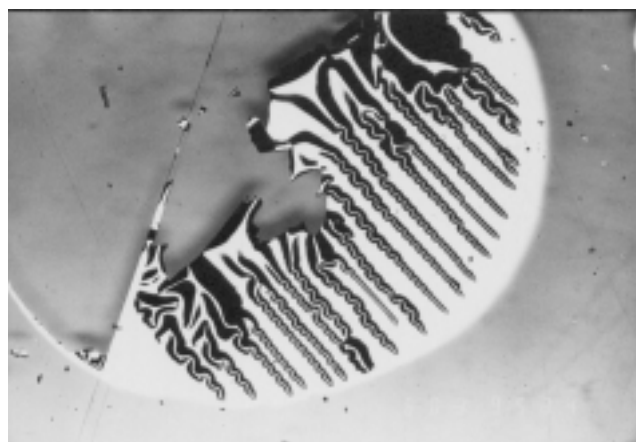
V naših raziskavah so bile volframske tanke plasti pripravljene s sočasnim nanašanjem čistega volframa iz dveh cilindričnih magnetronov lastne izdelave v enosmernem režimu dela (slika 1) na podlage iz

borosilikatnega stekla ali monokristalnega silicija okrogle oblike⁽⁴⁾.

Prva in najpomembnejša težava, na katero naletijo pri vseh tankih plasteh, torej tudi pri volframskih, je problem oprijemljivosti. Treba je doseči, da se plast po celi površini dotika podlage. Razlogi za nezadostno oprijemljivost so predvsem notranje napetosti v sami plasti in tudi zunanje, ki se pojavljajo zaradi različnih koeficientov termičnega raztezka volframa in podlage. Te napetosti se vedno pojavljajo in se jim ni mogoče izogniti. Zato se mora nanašanje izvajati na tak način, da se napetosti zmanjšajo na najmanjšo možno mero. Eden od načinov nadzora napetosti je, da se plast nanaša na rotirajočo se podlago. Tako se naj bi napetosti v plasti enakomerno razporedile v vseh smereh. Nasprotno pa je, če je podlaga vedno na istem mestu glede na magnetron, curek razpršenih delcev prihaja na podlago pod nekim stalnim kotom in povzroča napetosti vzdolž prednostne osi in pravokotno nanjo. Napetosti vzdolž prednostne osi povzročajo periodično kopičenje, pravokotno na to os. Posledica napetosti, pravokotno na prednostno os, so periodične neravnine, pravokotne na smer kopičenja (slika 2).

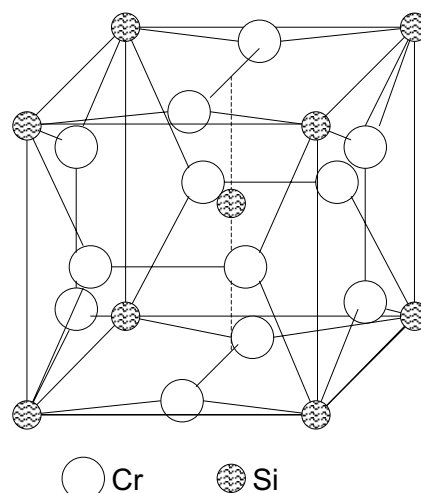


Slika 1: Shema in fotografija magnetrona, s katerim so bile narejene tanke plasti volframa



Slika 2: Luščenje volframskih tankih plasti zaradi notranjih napetosti (avtor posnetkov dr. M. Stubičar)

Pojav napetosti v volframskih tankih plasteh je tesno povezan z metastabilno β -fazo. Eksperimentalno je bilo ugotovljeno, da povečanje deleža β -faze vedno spremlja zmanjšanje tlačnih napetosti in povečanje nateznih. Nasprotno od stabilne α -faze, ki ima prostorsko centrirano kubično (bcc) zgradbo, ima β -faza t. i. A15-zgradbo Cr_3Si -razreda (slika 3). Mrežni parameter celice β -W je 0,5036 nm, celice α -W pa 0,3165



Slika 3: Zgradba osnovne celice A15 – strukture tipa Cr_3Si

nm. Razen tega ima A15-struktura 8 atomov na celico, medtem ko ima bcc-struktura samo 2 atoma na celico. Zaradi tega ima α -W, ki nastaja z razpadom metastabilnega β -W, mrežni parameter različen od mrežnega parametra α -faze. Ugotovljeno je bilo, da so v celici α -W vedno natezne napetosti. Te so značilne tudi za tanko plast takšnega materiala. Zaradi tega in zaradi prej omenjene zelo visoke električne upornosti β -W je ta volframova faza nezaželena v tanki plasti.

Obstaja več načinov, kako preprečiti nastanek β -W v volframskih tankih plasteh. Najenostavnejše so metode, s katerimi se povečuje termična energija atomov volframa, kar pospeši njihov prehod v stanje z nižjo energijo. V nadaljevanju bomo te metode natančneje opisali.

Ker je β -faza metastabilna, spontano prehaja v stabilno α -fazo tudi pri sobni temperaturi. Razpad β -faze volframa pri sobni temperaturi traja več mesecev ali celo let, gretje končnih sestavin na temperature, pri katerih prihaja do hitrega razpada ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), pa je pogosto nepraktično, zlasti pri uporabi v mikroelektroniki. Objavljeno je bilo ⁽⁵⁾, da pri sobni temperaturi del β -faze prehaja v α -fazo že v 75 dneh. V naših raziskavah nismo opazili nikakršne vidne spremembe v deležu β -faze niti potem, ko so vzorci stali tri leta na sobni temperaturi. Bolj praktičen način zmanjšanja β -faze v tankih plasteh je pospeševanje njenega razpada z bombardiranjem tankih plasti z visokoenergijskim ionskim curkom, ki s trki prenaša kinetično energijo na atome volframa v plasti in jim tako omogoča, da lažje preidejo difuzijsko pregrado ⁽⁶⁾. Tako rešujejo le problem visoke električne upornosti volframskih tankih plasti z visokim deležem β -W, čeprav problem natezne napetosti, ki je posledica prehoda α -W v β -W, ostaja. Zaradi tega moramo tanko plast naprševati v takšnih razmerah, da se izognemo nastajanju β -faze. To bistveno zaplete stvari, ker poleg parametrov nanašanja, ki se lahko kontrolirajo (kot so temperatura podlage pri nanašanju in tlak delovnega plina v magnetronu), na nastajanje β -faze in pojav notranjih napetosti v veliki meri vplivajo tudi parametri, ki jih je zelo težko nadzorovati in katerih vpliv še ni popolnoma raziskan. To so v prvi vrsti nečistoče, ki se vgrajujejo v plast in vplivajo na stabilnost β -faze. Tu ima pomembno vlogo kisik.

5 RAST VOLFRAMSKIH TANKIH PLASTI IN NAPETOSTI V NJIH

Da bi se med naprševanjem volframskih tankih plasti ustvarilo čim manj β -faze, se mora plast nanašati v razmerah, ki omogočajo čim večjo gibljivost

napršenih atomov volframa na površini plasti. Velika energija jim omogoči prehod v stanja z nižjo energijo, ki ustrezajo nastajanju α -faze.

Za atom, ki se po površini plasti giblje naključno, je povprečna dolžina d , ki jo naredi v času t , podana z izrazom ⁽⁷⁾:

$$d = (Dt)^{1/2}$$

kjer je D difuzijski koeficient, opisan z enačbo:

$$D = D_0 e^{-E_D/RT}$$

E_D je aktivacijska energija difuzije, T je temperatura in R splošna plinska konstanta. Značilne vrednosti za atome volframa sta: E_D od 57 kJ mol^{-1} do 87 kJ mol^{-1} in $D_0 \approx 3,8 \cdot 10^{-11}\text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Iz tega je razvidno, da je difuzijsko gibanje atomov večje pri višji temperaturi. Torej bo nastajanje α -faze favorizirano pri čim višjih temperaturah podlage med nanašanjem.

Drugi parameter, ki vpliva na energijo razpršenih delcev, je tlak delovnega plina v magnetronu. Kot smo že omenili, se s povečanjem tlaka delovnega plina povečuje tudi število trkov razpršenih delcev z atomi delovnega plina. To povzroči premik maksimuma energijske porazdelitve razpršenih delcev proti nižjim energijam in povečanje vpadnega kota razpršenih delcev na podlago. Zaradi tega atomi volframa vse težje prehajajo difuzijsko pregrado na površini volframa in pogosto ostajajo v stanjih povišane energije. To je razlog za nastanek β -faze. Iz navedenega je jasno, da je prvo pravilo, ki ga je treba upoštevati, da bi se izognili nastajanju metastabilne β -faze pri nanašanju volframskih tankih plasti, da se plasti nanašajo pri čim nižjem tlaku delovnega plina in čim višji temperaturi podlage ⁽⁸⁾.

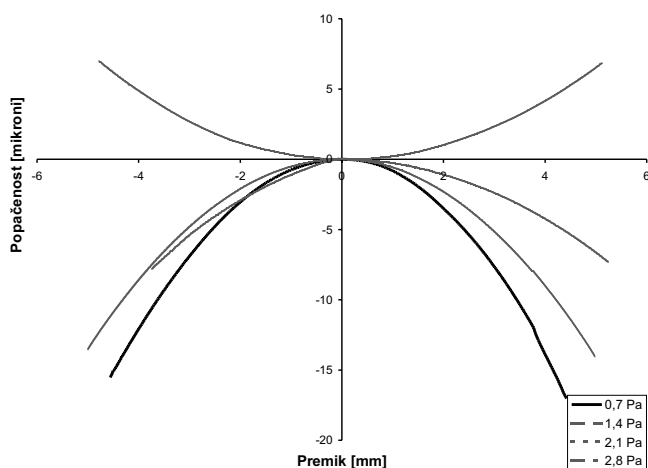
Temperatura podlage in tlak delovnega plina sta parametra nanašanja, ki ju je najlažje nadzorovati. Vendar obstajajo še drugi parametri, ki jih je zelo težko ali nemogoče nadzorovati. Znano je, da s povečanjem debeline plasti delež β -faze v plasti pade ^(5,8) in da je α -faza do debeline plasti okoli 50 nm natezno napeta. Ta natezno napeta α -faza nastane blizu meje s podlago s transformacijo β -faze, ki je nastala ob sami podlagi. Vzrok za pojav te β -faze je razlika v parametrih kristalne mreže ali amorfnе zgradbe podlage in v parametrih kristalne mreže tanke plasti. Ta razlika v zgradbi povzroči, da naneseni atomi volframa ne zasedejo energijsko najbolj ugodnih stanj, zato nastane β -faza ⁽⁹⁾. Vidi se, da se tako nastala β -faza zaradi še neznanih razlogov hitro spremeni v stabilno α -fazo, in ker je ta α -faza natezno napeta, je jasno, da ne prispeva k dobri oprijemljivosti plasti na podlago.

Problem notranjih napetosti v plasti ne moremo reševati samo s prilagajanjem tlaka delovnega plina in

z uravnavanjem temperature podlage. Volframske tanke plasti, nanesene pri nizkih delovnih tlakih v magnetronu (do okoli 1,0 Pa), so sestavljene večinoma iz α -faze in imajo gosto stebričasto mikrostrukturo pod izrazitimi tlačilnimi napetostmi ⁽⁵⁾. Praznine med stebri in v njih so zelo redke ali jih sploh ni. Takšno zgradbo povzroča proces, ki se imenuje atomsko nabijanje (*atomic peening process*). Visoke povprečne energije razpršenih delcev volframa in njihova kotna razporeditev, ki ima maksimum pravokotno na podlago, favorizirajo večjo globino prodiranja prihajajočih delcev v plast, lokalno preurejanje in premike atomov. To pomeni, da imajo prihajajoči atomi in tisti atomi, ki so blizu mesta trka prihajajočega atoma, veliko gibljivost. Zaradi tega lahko prehajajo čez površinsko difuzijsko oviro in se lahko pomaknejo v položaje, ki omogočajo rast stabilne kristalne zgradbe.

S povečevanjem tlaka delovnega plina v magnetronu se povprečna energija prihajajočih delcev zaradi povečane razpršitve na atomih delovnega plina zmanjšuje, maksimum njihove kotne porazdelitve pa se vse bolj oddaljuje od smeri pravokotno na podlago nanašanja. Zaradi tega imajo atomi volframa na površju plasti vse manjšo gibljivost. Njihova energija ni dovolj velika, da bi atomi prišli v najbolj ugodna energijska stanja. To povzroči ustvarjanje praznin v plasti. Te se pojavljajo med stebri in v njih. Praznine povzročajo sprostitve tlačne napetosti, toda kohezijske sile med stenami praznin povzročajo pojav natezne napetosti. To povzroči, da imajo volframske tanke plasti, nanesene pri višjih tlakih delovnega plina v magnetronu, vse manj izraženo tlačno notranjo napetost, a vse bolj natezno.

Notranje mikronapetosti v tankih plasteh določimo iz polmera ukrivljenosti podlage, ki se upogne, če je dovolj tanka. Profili podlag se določajo s profilometrijo vzorcev (slika 4). V našem primeru so bile steklene podlage okrogle s premerom 10,8 mm in



Slika 4: Ukrivljenost steklenih podlag v odvisnosti od tlaka delovnega plina med naprševanjem

debelino 0,15 mm. Napetosti se izračunajo s Stoneyev enačbo, ki je v primeru, da je debelina podlage mnogo večja od debeline plasti (kar za volframske tanke plasti vedno velja), enaka:

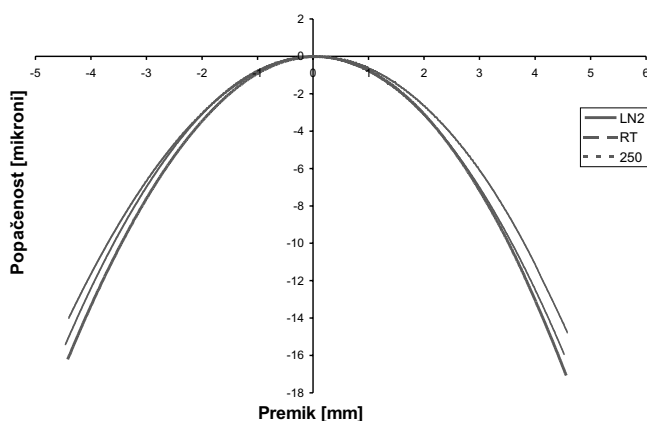
$$\sigma_f = \frac{1}{6R} \frac{E_s d_s^2}{(1 - \nu_s) d_f}$$

kjer so E_s , ν_s in d_s Youngov modul, Poissonovo razmerje in debelina podlage, d_f je debelina plasti in R polmer zakrivljenosti podlage. Če je plast nanesena pri temperaturi, različni od sobne, se zaradi različnih termičnih koeficientov raztezka podlage in plasti pojavijo termične (zunanje) napetosti. V tem primeru notranjo napetost plasti dobimo tako, da od skupne napetosti odštejemo termično (zunanjo) napetost. Za te primere velja prilagojena Stoneyeva enačba za termično napetost v plasti ⁽¹⁰⁾:

$$\sigma_{\text{ITER}} = \frac{(\alpha_s - \alpha_f) \Delta T E_f}{1 - \nu_f}$$

kje sta α_s in α_f koeficienta termičnega raztezka podlage in plasti, E_f in ν_f sta Youngov modul in Poissonovo razmerje plasti, ΔT je razlika med temperaturo nanašanja in sobno temperaturo. Tlačna napetost se v plasti zmanjša s povečanjem tlaka delovnega plina v magnetronu do popolne sprostitve, z nadaljnjim višanjem tlaka se napetost spremeni v natezno. Natezna napetost raste do neke določene vrednosti tlaka, pri katerem doseže maksimum. Te vrednosti so navadno nad 4 Pa in so odvisne od oddaljenosti podlage od katode. Po tej maksimalni vrednosti napetosti se z nadaljnjim naraščanjem tlaka napetost hitro zmanjša in asimptotično prihaja do popolne sprostitve vseh napetosti v plasti. Pojavlja se dendritska struktura z velikim deležem praznin.

Vzrok takšega vedenja napetosti v volframski tanki plasti je pojav prej omenjenih praznin v njej. Praznine med stebri in v njih imajo nasprotni učinek. Praznine v



Slika 5: Ukrivljenost steklenih podlag v odvisnosti od njihove temperature med naprševanjem plasti

stebrih povzročajo zaradi kohezivnih sil med stenami natezne napetosti v plasti. Praznine med stebri so večje, kohezivne sile med stenami pa ne prihajajo do izraza. Zaradi tega te praznine povzročajo le sprostitve tlačne napetosti. Zaradi teh dveh efektov se pojavlja prej omenjeni maksimum natezne napetosti. Dendritske zgradbe, ki nastajajo pri visokih tlakih nanašanja, se pojavijo takrat, ko praznine med stebri postanejo prevelike, da bi lahko prišle do izraza kohezivne sile med stenami. To povzroča hitro zmanjšanje natezne napetosti in amorfno rast plasti s popolnoma sproščeno zgradbo.

Z določitvijo deleža β -faze v volframski tanki plasti z rentgensko difrakcijo ali meritvami električnega upora plasti je bilo ugotovljeno, da ima ta delež svoj maksimum v bližini maksimuma natezne napetosti. To potrjuje tesno povezanost β -faze in natezne napetosti oziroma njun pojav kot rezultat kopičenja odlagajočih atomov volframa v višja energijska stanja.

Iz navedenega je razvidno, da notranjih napetosti in pojava β -faze zaradi njunega specifičnega odnosa ni možno odstraniti samo s kontroliranjem razmer pri nanašanju. Notranje napetosti so lahko včasih koristne, vendar pogosto ogrožajo oprijemljivost plasti s podlago. Ker je pri volframskih tankih plasteh vedno primarni interes preprečiti nastanek β -faze, je za rešitev problema notranjih napetosti treba najti druge poti.

Na koncu povejmo, da poleg že omenjenih težav pri magnetronskem nanašanju tankih plasti obstajata še dva problema, ki še vedno nista zadovoljivo rešena. Prvi je stabilizacija β -faze volframa s kisikom, ki se vgrajuje v plast med nanašanjem. V zadnjem desetletju se v literaturi pojavlja zamisel, da kisik stabilizira β -fazo, vendar sistematične raziskave na tem področju še vedno ni. Druga težava je v oprijemljivosti debelejših plasti na stekleno podlago ali podlago iz monokristala silicija. Pri plasteh, katerih debelina je večja od 300 nm, se kažejo resne težave z oprijemljivostjo na te podlage.

4 SKLEP

Volframske tanke plasti imajo zaradi svojih odličnih mehanskih in kemičnih lastnosti široko uporabo

v industriji. Magnetronsko nanašanje je zelo razširjen način njihove priprave. Žal ima ta metoda nekatere slabe strani, ki povzročajo težave z oprijemljivostjo volframske plasti na podlago in tako omejujejo njihovo uporabnost. Ta težava je tem bolj izražena, ker se volframske tanke plasti zaradi samih značilnosti materiala pogosto uporabljajo za zaščito sestavnih delov pred škodljivimi mehanskimi, toplotnimi in kemičnimi vplivi. V takšnih razmerah je vitalnega pomena močna oprijemljivost na podlage. Da bi to dosegli, se moramo izogniti nastanku metastabilne β -faze volframa že med nanašanjem plasti. Vendar je znižanje notranjih napetosti v plasti bolj zapleten problem, ki se mu ni mogoče izogniti le z nadzorovanjem parametrov nanašanja. Dodatna raziskovanja so potrebna pri analizi vpliva drugih dejavnikov, kot so nečistoče in rast plasti na meji s podlago, na pojav β -faze volframa in notranjih napetosti.

Zahvala

Zahvaljujemo se dr. Mirku Stubičarju s Fizikalnega odseka Fakultete za naravoslovje in matematiko v Zagrebu za dovoljenje za objavo fotografij ločitve tankih plasti od podlage in osebu Odseka za tanke plasti in površine Instituta "Jožef Stefan" v Ljubljani, ker so nam omogočili delo s profilometrom in pomagali z mnogimi nasveti in literaturo.

LITERATURA

- ¹J. Ligot, S. Benayoun, J. J. Hantzpergue, J. C. Remy, *Solid-State Electronics* **43** (1999), 1075-1078
- ²N. V. Plešivcev, *Katodnoe raspilenie*, Atom izdat, Moskva, 1968
- ³T. Car, N. Radić, *Thin Solid Films* **293** (1997), 78.
- ⁴A. Furlan, Utjecaj uvjeta depozicije na pojavu β -faze u tankim filmovima volframa, *Diplomska naloga*, PMF, Zagreb, 2001
- ⁵T. J. Vink, M. A. J. Somers, K. J. A. Aker, *J. Appl. Phys.* **74** (2) (1993), 988
- ⁶N. Durand, K. F. Badawi, Ph. Goudeau, *J. Appl. Phys.* **80** (9) (1996) 5021.
- ⁷P. W. Atkins, *Physical Chemistry*, 6th Ed., Oxford University Press, Oxford, 1998
- ⁸N. Radić, A. Tonejc, A. M. Tonejc, A. Furlan, P. Panjan, M. Čekada, M. Jakić, Z. Medunić, J. Ivkov, *Beta W-phase occurrence and stability in sputter deposited tungsten thin films*, v pripravi
- ⁹I. C. Noyan, T. C. Huang, R. B. York, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **20** (1995) 2, 125
- ¹⁰M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*, Academic Press Inc., 1997