

PULZNO MAGNETRONSKO NAPRŠEVANJE PRI VELIKI VRŠNI MOČI

Peter Panjan, Miha Čekada, Matjaž Panjan, Srečko Paskvale, Darja Kek Merl

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Pulzno magnetronsko naprševanje pri veliki vršni moči (HPPMS) je nov način priprave prevlek, ki se v industrijski proizvodnji še ni uveljavil. Omogoča pripravo nove generacije trdih prevlek z boljšimi lastnostmi od klasičnih. Bistvo postopka HPPMS je povečanje ionizacije razpršenih atomov tarče. Povečanje gostote plazme dosežemo tako, da za kratek čas (do približno 150 μ s) zelo povečamo moč na tarči (tudi do 1 MW). Sledi daljši interval brez plazme (nekaj deset milisekund), ko se tarče in podlage hladijo. Pri naprševanju HPPMS je gostota moči na tarči praviloma 100-krat večja v primerjavi s klasičnim postopkom. Čeprav je vršna moč na tarči zelo velika, pa je povprečna moč na tarči primerljiva s tisto pri klasičnem magnetronskem naprševanju. Visoka stopnja ionizacije prinaša vrsto prednosti, ki jih lahko s pridom izkoristimo pri pripravi tankih plasti. S kontrolo ionskega obstrlejanja lahko prikojimo lastnosti prevleke (mikrostrukturno, notranje napetosti, morfologijo, kristalno strukturo).

High power pulsed magnetron sputtering

ABSTRACT

High power pulsed magnetron sputtering (HPPMS) is a relatively new deposition technique and has not been yet established in industrial practice. HPPMS allows the preparation of a new generation of PVD hard coatings with better properties in comparison to the conventional coatings. The basic feature of this technique is to increase the plasma density in front of the sputtering source. The increase in plasma density is simply achieved by applying a very high electrical power for a short period of time (up to 150 μ s). The cooling period is followed for several ten milliseconds. Typically the HPPMS power density is about 100 times of that in classical magnetron sputtering. Although the peak power is very high (up to 1 MW) the average power is in the range of classical magnetron sputtering. High ionization rate has a lot of benefits, which can be used for coating preparation. New coating properties can be tailored by control of ion bombardment of the growing film.

1 UVOD

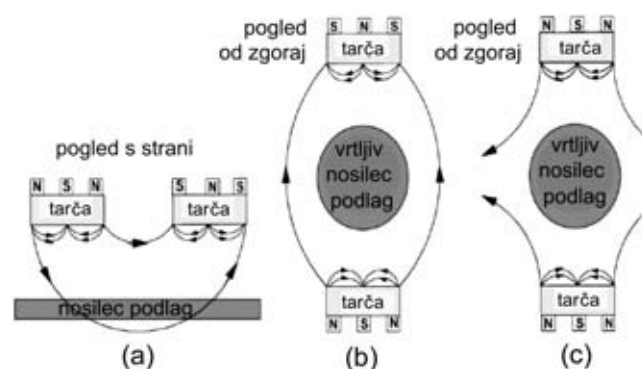
Razvoj novih inovativnih postopkov obdelave sodobnih materialov (npr. visokohitrostna in suha obdelava, obdelava v trdo) zahteva nenehen razvoj orodnih materialov in postopkov njihove zaščite. Novejši razvoj na področju zaščite orodij je usmerjen v pripravo zelo kompaktnih, gladkih, nanoplastnih in nanokompozitnih trdih PVD-prevlek. Kvaliteta in učinkovitost trdih PVD-prevlek ni odvisna samo od njihove strukture in sestave, ampak v veliki meri od postopka njihove priprave.

Od postopkov nanašanja trdih PVD-prevlek so se v industrijski proizvodnji v zadnjih desetletjih uveljavili naslednji:

- naprevanje z nizkoenergijskimi elektroni;
- naprevanje s katodnim lokom in
- naprševanje z magnetronskimi izviri.

Med njimi je magnetronsko naprševanje najbolj univerzalen postopek nanašanja trdih prevlek, ker omogoča pripravo širokega spektra prevlek na podlagah s komplicirano geometrijo. To je tudi edini postopek, ki omogoča nanos prevlek na osnovi ogljika. Pri klasičnem postopku naprševanja se kovinska tarča razpršuje pretežno v obliki nevtralnih atomov, na katere ne moremo vplivati z negativno električno ("bias") napetostjo na podlagah. Delovanje magnetronskega izvira pri konstantni napetosti na tarčah temelji na električni razelektritvi v električnem in magnetnem polju, ki sta med seboj pravokotni. Značilna gostota moči je okrog 50 W/cm², gostota toka ionov na podlagah pa je manj kot 10 mA/cm². Delci, ki razpršujejo tarčo, so ioni delovnega plina (argona, kripton). Struktura in lastnosti napršene plasti so v veliki meri odvisni od energije, ki se z ioni prenese v rastočo plast. Ta energija je produkt energije posameznega iona in gostote ionskega toka. V splošnem je gostota plazme 10¹⁵–10¹⁷ /m³, medtem ko je delež ionov med razpršenimi delci le nekaj odstotkov. Slaba stran tega postopka je torej majhna stopnja ionizacije razpršenih (uparjenih) atomov tarče, kar se izraža v stebričasti mikrostrukturi prevleke, ki negativno vpliva na tribološke lastnosti prevlek.

Bistvo sodobnih postopkov naprševanja je v povečani stopnji ionizacije razpršenih delcev. Prva izboljšava v tej smeri je bila dosežena z razporeditvijo magnetronskih izvirov v konfiguracijo, kjer se magnetne silnice sosednjih magnetronov zaprejo in oblikujejo t. i. magnetno "steklenico" (slika 1). Takšno magnetno polje bistveno podaljša pot elektronov. Stopnja ionizacije razpršenih atomov (kovinske) tarče ter atomov reaktivnega in inertnega plina je zato pre-



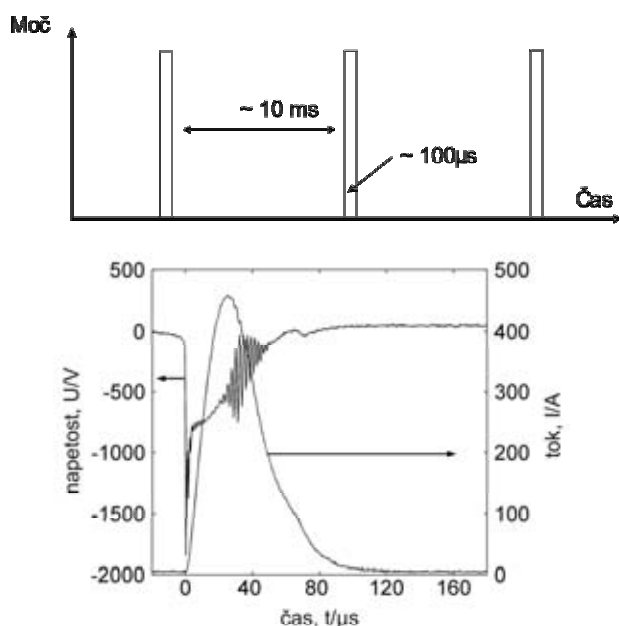
Slika 1: Tri konfiguracije magnetronov s po dvema magnetronskima izvirova: (a) konfiguracija z zaprtimi silnicami; izvira sta en poleg drugega, (b) konfiguracija z zaprtimi silnicami; izvira sta nasproti, (c) konfiguracija z zrcalnimi silnicami

cej večja, vendar pa še vedno manjša kot pri napre-
vanju s katodnim lokom. Stopnjo ionizacije lahko
povečamo tudi, če uporabimo dodatne anode. Le-te
potegnejo sekundarne elektrone iz magnetronskega
izvira in jih pospešijo v prostoru pred podlagami.
Ionizacijo delovnega plina (argona, kripton) pa lahko
povečamo tako, da ju uvajamo skozi t. i. votlo anodo.

Eden novejših postopkov priprave zelo kvalitetnih
trdih zaščitnih prevlek je pulzno magnetronsko
naprševanje pri veliki vršni moči (HPPMS – high-
power pulsed magnetron sputtering). Prva objava o
HPPMS-nanašanju trdih prevlek je iz leta 1999 ^(1,2).
Ruska raziskovalca Kouznetsov in Fetisov sta poka-
zala, da je v fazi, ko je med naprševanjem na tarči
velika moč, ionizacija uparjenih atomov iz tarče in
atomov plina iz vakuumske posode izjemno velika.
Povečanje gostote plazme dosežemo tako, da za kratek
čas zelo povečamo moč na tarči. Le-ta je lahko do 1
MW, vendar samo za zelo kratek čas (do približno 150
 μ s). Sledi daljši interval brez plazme (nekaj deset
milisekund), ko se tarče in podlage hladijo (slika 2).

2 FIZIKALNE OSNOVE HPPMS-POSTOPKA NAPRŠEVANJA

Pri magnetronskem HPPMS-naprševanju je
gostota moči na tarči praviloma 100-krat večja
(1000–3000 W/cm²) v primerjavi s klasičnim postop-
kom (10–30 W/cm²). Čeprav je vršna moč na tarči
zelo velika (do 1 MW), pa je povprečna moč na tarči
primerljiva s tisto pri klasičnem magnetronskem
naprševanju. Najvišja dovoljena termična obremenitev
tarče je omejena s povprečno električno močjo in ne z



Slika 2: Časovna odvisnost električne moči na tarči pri HPPMS-naprševanju (zgoraj) in obliki napetostnega in tokovnega pulza (spodaj)

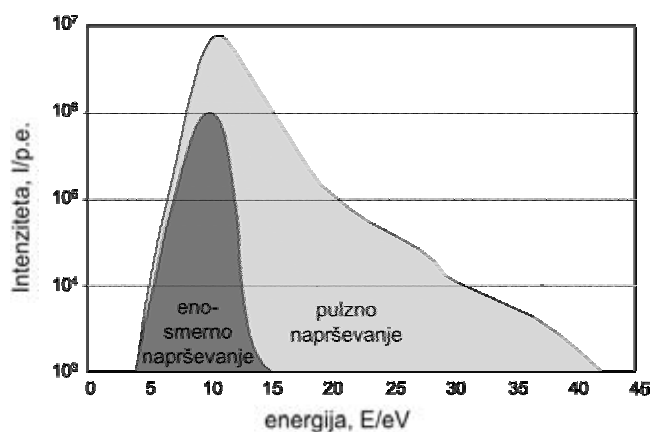
najvišjo močjo, zato je le-ta lahko za kratek čas tudi
ekstremno visoka. Temperatura je odvisna tudi od
toplotne prevodnosti materiala tarče in učinkovitosti
ohlajanja. Vendar pa je pomembna tudi povprečna
moč na tarči in ne le trenutna oz. vršna moč.
Frekvenco ponavljanja pulza (50-500 Hz) izberemo
tako, da je povprečna moč v mejah dovoljenega.
Najvišja električna napetost na tarči je do nekaj tisoč
voltov, ustrezní razelektritveni tok pa reda velikosti
1 A/cm².

Pri najvišji moči na tarči (nekaj 1000 W/cm²) je
gostota elektronov okrog 10¹⁹ m⁻³. Gostota elektronov
je torej za tri velikostne rede večja od tiste, ki jo
dosežemo v klasičnem magnetronskem izviru. Velika
gostota elektronov poveča verjetnost za ionizacijo
razpršenih atomov tarče. Stopnja ionizacije je odvisna
od materiala tarče in je od 4,5 % za ogljik do 90 % za
titan. Stopnja ionizacije je odvisna od ionizacijskega
potenciala materiala in od tega, kolikšen je presek za
ionizacijo z elektronom. Poleg enkrat ioniziranih ko-
vinskih atomov se v plazmi nahajajo tudi večkrat
nabiti ioni. Značilna gostota toka ionov na podlage je
20 mA/cm² in velika večina teh ionov so kovinski ioni
iz tarče. Tarčo razpršujejo ioni inertnega plina (argo-
na, kripton) in tisti kovinski ioni, ki jih negativna
napetost potegne nazaj na tarčo.

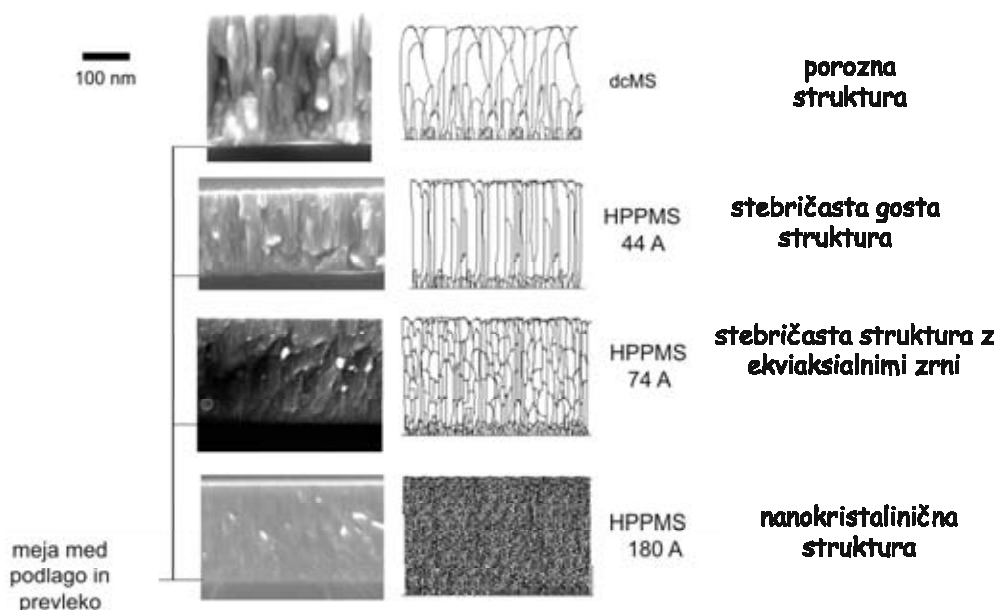
Tabela 1: Primerjava parametrov klasičnega in HPPMS naprševanja

| | klasično magnetronsko naprševanje | HPPMS |
|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| vršna napetost | 300-600 V | 0,8 – 2 kV |
| vršni tok | ≈ 30 mA/cm ² | ≈ 1-10 A/cm ² |
| vršna moč | ≈ 1-20 W/cm ² | ≈ 1-20 kW/cm ² |
| obratovalni ("duty") faktor | 100 % | ≈ 1 % |

Medtem ko je energija razpršenih delcev pri
klasičnem razprševanju 5-10 eV, je pri HPPMS-raz-
prševanju do 100 eV, več kot 50 % ionov pa ima ener-



Slika 3: Energijska porazdelitev delcev pri klasičnem magnetronskem naprševanju in pri postopku HPPMS



Slika 4: Primerjava mikrostrukture prevlek, ki so bile narejene s klasičnim magnetronskim naprševanjem (dcMS) s tistimi, ki so bile narejene s postopkom HPPMS pri različni gostoti ionskega toka ⁽²¹⁾

gijo, ki je višja od 20 eV ⁽³⁾. Energijska porazdelitev razpršenih delcev ima pri naprševanju HPPMS vrh pri znatno višji energiji kot pri klasičnem naprševanju (slika 3).

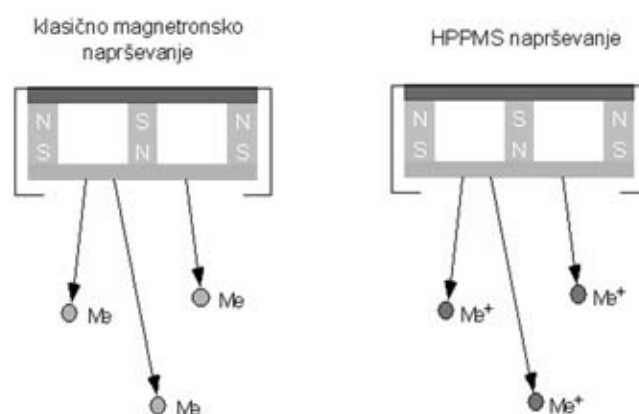
Velik tok kovinskih ionov na podlage zelo vpliva na mikrostrukturo prevleke in njeno oprijemljivost na podlago. Pri tem velja, da delci, ki imajo majhno energijo, oblikujejo stebričasta kristalna zrna s prazninami med njimi, medtem ko delci z veliko energijo oblikujejo goste plasti, ki jih sestavljajo ekvialksialna kristalna zrna (slika 4).

Postopek HPPMS pomeni velik napredek na področju nanašanja tankih plasti. Velika energija razpršenih ioniziranih delcev omogoča nanos fino zrnatih prevlek, ki jih je bilo prej možno pripraviti samo pri visoki temperaturi. Pri postopku HPPMS lahko na gibanje ionov vplivamo z električnim poljem. Tako v bistvu iz magnetronskega izvira naredimo ionski izvir (slika 5). Z negativno električno napetostjo (bias) na podlagah lahko ioniziranim delcem spreminjamo energijo. Pri trku ionov z atomi rastoče plasti nastane prenos gibalne količine. Za rast in adhezijo prevleke je pomembna gostota energije, ki jo na podlage prinesejo ioni. Pri klasičnem postopku naprševanja je gostota toka ionov v primerjavi s HPPMS relativno majhna.

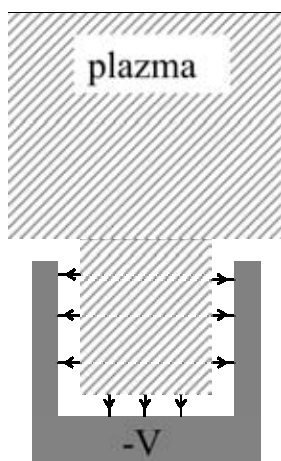
Gostoto energije, ki jo na podlage prinesejo ioni, lahko pri klasičnem magnetronskem naprševanju povečamo edino tako, da povečamo energijo ionov. Le-to lahko spreminjamo z negativno napetostjo na podlagah (bias), ki je pri klasičnem postopku naprševanja okrog -100 V. To pomeni, da ioni pridobijo energijo 100 eV. V primerjavi z vezavno energijo

atomov v trdnih snoveh je to velika energija, zato takšni ioni v kristalni strukturi prevlek zasedajo energijsko manj ugodna mesta. Posledica so defekti v prevleki, deformacija kristalne strukture in tlačne notranje napetosti, ki se povečujejo linearno z debelino prevleke. Tlačne notranje napetosti omejujejo največjo debelino prevleke, ki jo lahko še pripravimo. Če je debelina prevleke prevelika, potem se le-to odluči s podlage.

Pri postopku HPPMS-nanašanja pa je gostota toka ionov na podlage bistveno večja. Zato lahko enako gostoto energije, ki jo ioni prinesejo na podlage, dosežemo pri bistveno manjši pospeševalni (bias) napetosti. Notranje napetosti so zato manjše, debeline prevlek, ki jih lahko pripravimo, pa so v primerjavi s klasičnimi (okrog 5 μm) precej večje (do 15 μm). Večja debelina prevlek zagotavlja večjo obrabno obstojnost orodja.



Slika 5: Klasični magnetronski izvir pretežno električno nevtralnih atomov (levo) in HPPMS (ionski) izvir (desno). Me so kovinski atomi.



Slika 6: Pri postopku HPPMS, kjer je večina razpršenih atomov ioniziranih, ioni sledijo električnim silnicam, zato bolj enakomerno prekrivajo tudi površine, ki so v geometrijski senci

Ker električno nabiti delci sledijo električnim silnicam, lahko nanašamo plasti tudi na tiste dele površine, ki so v geometrijski "senci" (okrog vogalov). Postopek HPPMS nam torej omogoča, da naneseemo bolj enakomerno debelo plast z enako mikrostrukture na podlage s komplicirano geometrijo (slika 6).

Prve naprave za HPPMS-nanašanje trdih prevlek so naredili na Univerzi v Linköpingu v sodelovanju z ruskimi raziskovalci ⁽⁴⁾. Kouznetsov je postopek HPPMS skupaj s podjetjem Chemfilt R&H (zdaj Chemfilt Ion Sputtering AB) tudi patentno zaščitil ⁽⁵⁾. Kasneje so se v razvoj novega postopka nanašanja trdih PVD-prevlek vključili raziskovalci Univerze v Sheffieldu ⁽⁶⁾ in raziskovalci univerze RWTH v Aachnu. V ZDA pa se je razvoj postopka HPPMS vključilo podjetje Advanced Energy Industries, ki je specializirano za močnostne (pulzne) napajalnike.

Postopek HPPMS je podoben nanašanju tankih plasti s katodnim lokom (osnovni princip je znan že skoraj trideset let), saj v obeh primerih dosežemo zelo visoko stopnjo ionizacije uparjenih delcev. Vendar je med njima bistvena razlika. Pri postopku HPPMS ne nastajajo makrokapljice, zato so tako pripravljene plasti zelo goste, njihova površina pa je gladka. Postopek HPPMS ima tudi druge prednosti:

- možnost nanosa gostih plasti z gladko površino;
- manjše tlačne notranje napetosti omogočajo pripravo debelih PVD-prevlek (do 15 μm);
- možnost priprave plasti z različnimi fazami in teksturo;
- oprijemljivost prevlek je boljša;
- v primerjavi s klasičnim magnetronskim naprševanjem, kjer potujejo razpršeni atomi premočrtno, omogoča HPPMS-nanos bolj enakomerno debele prevleke in z enako mikrostrukture na vse dele

orodja s komplicirano geometrijo (npr. rezalne ploščice in svedri);

- HPPMS-postopek reaktivnega naprševanja oksidnih plasti je bolj stabilen, problem histereze je zmanjšan ali pa ga ni, hitrost nanašanja pa večja kot pri klasičnem enosmernem magnetronskem naprševanju.

Pri HPPMS-naprševanju so ioni, ki prispejo na podlage, v glavnem kovinski ioni iz tarče. Ehasarian ⁽⁷⁾ je te ione uporabil za ionsko jedkanje podlag pred nanosom trdih prevlek CrN. Prevleke, ki jih je pripravil na tak način, so imele gosto in fino zrnato mikrostrukture z manj defekti. Njihove tribokemične karakteristike (korozijska in obrabna obstojnost) so zato boljše od tistih, ki so bile pripravljene s postopkom katodnega nanašanja.

3 MOŽNOSTI UPORABE HPPMS-POSTOPKA NAPRŠEVANJA

Postopek HPPMS je z vidika industrijske uporabe zanimiv ne samo za pripravo trdih zaščitnih prevlek ^(7,8), ampak tudi za pripravo tankih optičnih plasti z nizko emisivnostjo, za pripravo antirefleksnih plasti z velikim lomnim količnikom (s postopkom HPPMS nanašanja lahko pripravimo tanke plasti TiO_2 ⁽⁹⁾, ki imajo rutilno strukturo in lomni količnik $n > 2,6$), za pripravo dielektričnih plasti v mikroelektroniki in pomnilnikih. Dekoven s sodel. ⁽¹⁰⁾ je s postopkom HPPMS nanasel bistveno gostejše ogljikove prevleke ($2,7 \text{ g/cm}^3$) v primerjavi s tistimi, ki so bile narejene s klasičnim magnetronskim naprševanjem (2 g/cm^3). Tudi hrapavost plasti je bila manjša. Tako lahko pripravimo plasti NiCr za senzorje napetosti, ki jih po nanosu ni treba toplotno obdelati, ker so že temperaturno stabilne ⁽¹¹⁾. S postopkom HPPMS-nanašanja lahko pripravimo strukturne faze, ki jih s klasičnim postopkom ne moremo. Primer je naprševanje tanke plasti tantala. Le-ta v masivni obliki kristalizira v kristalni strukturi bcc, v tankih plasteh, ki jih pripravimo pri standardnih pogojih, pa najdemo izključno tetragonalno (β -fazo); fazo bcc dobimo le, če je temperatura podlag zelo visoka. S postopkom HPPMS, kjer so energije razpršenih delcev veliko večje, pa dobimo to fazo tudi pri nizki temperaturi ⁽¹²⁾.

Slaba stran postopka HPPMS je manjša hitrost nanašanja, ki je samo od 25 % do 30 % tiste pri klasičnem magnetronskem naprševanju. Ta pojav je verjetno posledica dejstva, da negativna napetost na tarčah potegne del razpršenih ionov nazaj na tarčo. Manjša hitrost nanašanja je za zdaj z vidika gospodarnega nanašanja prevlek precejšnja pomanjkljivost. Postopek zato uporabimo samo v primerih, ko nimamo druge izbire in kadar je v ospredju zahteva po čim večji kvaliteti prevleke.

Problem majhne hitrosti nanašanja in velike moči pulzov poskušajo raziskovalci rešiti na različne načine. Christykov s sodel. ^(13,14) je predložil, da se pulz sestavi iz dveh delov (modulirana moč pulza – modulated pulsed power – MPP). V prvi fazi prižgemo šibko ionizirano plazmo pri pogojih, kakršni so pri klasičnem magnetronskem naprševanju. V drugi fazi pa z dodatnim pulzom na katodi ustvarimo močno ionizirano plazmo. Hitrost nanašanja je odvisna od oblike napetostnega pulza, trajanja pulza in pogostosti ponavljanja pulza.

Christykov in sodel. so ugotovili, da je pri tehniki MPP hitrost nanašanja lahko manjša, enaka ali večja od tiste pri klasičnem magnetronskem naprševanju pri enaki moči na tarči. Tako je v konkretnem primeru naprševanja bakra pri moči na tarči 8,8 kW hitrost nanašanja 60 % tiste pri klasičnem naprševanju, če je trajanje pulza 200 μ s. Če je čas trajanja pulza 400 μ s, se hitrosti nanašanja izenačita. Če pa povečamo čas trajanja pulza na 1000 μ s, potem je hitrost pri MPP-procesu za 150 % večja. Podoben rezultat je bil dosežen pri MPP-naprševanju titana in aluminija. MPP-postopek so preizkusili tudi pri nanašanju TiN in Al_2O_3 . Pri povprečni moči na tarčo 1,5 kW in razdalji med tarčo in podlagami 26 cm je bila hitrost naprševanja TiN 1 μ m/h, kar je glede na relativno majhno moč in veliko razdaljo med tarčo in podlago dober rezultat.

Odličen rezultat je bil dosežen tudi pri reaktivnem naprševanju Al_2O_3 . Pri pulzno modulirani povprečni moči na tarči 4,5 kW in razdalji med tarčo in podlago 23 cm, pa je bila hitrost naprševanja 12 μ m/h.

S pulznim naprševanjem lahko pripravimo novo generacijo trdih prevlek. Spekter trdih prevlek, ki jih lahko pripravimo s HPPMS-postopkom, je praktično neomejen. Tako novi pulzni postopki nanašanja omogočajo nanos električno neprevodnih prevlek (npr. Al_2O_3 , ZrO_2 , $(Cr,Al)_2O_3$, Si-O-N in drugi oksidi). Med njimi je najbolj zanimiva prevleka Al_2O_3 s kristalinično korundno fazo, ki je primerna npr. za zaščito ploščic za struženje, kjer se zahteva velika termična obstojnost prevleke.

To je tudi edini PVD-postopek, ki omogoča nanos kvalitetnih oksidnih trdih prevlek (npr. Al_2O_3) in nizkotemperaturnih prevlek (pod 200 °C). Aluminij oksidne prevleke, narejene s CVD-postopkom, se že več desetletij uporabljajo za zaščito rezalnih ploščic. Za ta namen je primerna termodinamsko stabilna in trda korundna faza, ki jo lahko pripravimo pri relativno visoki temperaturi (>800 °C). Prevleka Al_2O_3 je kemijsko inertna in ohrani veliko trdoto do visokih temperatur (do 1300 °C). Debela CVD Al_2O_3 -prevleka se že več kot dve desetletji uporablja za zaščito rezalnih ploščic za visokohitrostno struženje in frezanje feritnih obdelovancev. Slabost CVD-postopkov

je visoka temperatura nanašanja (okrog 1000 °C), zato je izbor možnih podlag omejen (karbidna trdina, kermeti). Drug problem so termične razpoke v plasti, ki nastanejo med ohlajanjem orodij na sobno temperaturo. Natezne napetosti v plasti omogočajo nastajanje in širjenje mikrorazpok. Takšne razpoke poslabšajo tribološke lastnosti prevleke. Al_2O_3 -prevlek vse do pred nekaj leti ni bilo mogoče pripraviti s PVD-postopki. To je bilo možno šele z razvojem pulznih postopkov ⁽¹⁴⁻¹⁹⁾. Med njimi je HPPMS-postopek tisti, ki je najbolj obetaven.

S postopkom HPPMS lahko pripravimo tudi kvalitetne trde prevleke pri nizki temperaturi. Temperaturo podlag lahko reguliramo s povprečno močjo na tarčah. Nizkotemperaturne prevleke so še zlasti zanimive za zaščito strojnih delov. Pri klasičnih postopkih nanašanja trdih prevlek je temperatura podlag okrog 450 °C. Pri tej temperaturi se doseže optimalna oprijemljivost, mikrostruktura in druge funkcionalne lastnosti, medtem ko večina orodnih jekel ohrani trdoto in dimenzijske tolerance. Z možnostjo znižanja temperature nanašanja pod 300 °C bi se povečal nabor podlag, ki bi jih bilo možno zaščititi s PVD-postopki. Takšne nizkotemperaturne PVD-prevleke so zlasti zanimive za zaščito različnih sestavnih delov avtomobilov z namenom, da se poveča njihova obrabna obstojnost oz. da se zmanjša trenje.

Če uporabimo klasične PVD-postopke pri manjših močeh v izviri za nanašanje, zmanjšamo temperaturo podlag in hitrost nanašanja. Vendar pa je adhezija takšnih nizkotemperaturnih prevlek slaba, zmanjša pa se tudi mikrotrdota ⁽²⁰⁾. Za pripravo kvalitetnih nizkotemperaturnih trdih prevlek je primeren postopek pulznega naprševanja. Med trajanjem pulza je gostota plazme in energija delcev v plazmi dovolj velika, da zagotavlja nanos kvalitetnih prevlek. S periodo med dvema pulzoma pa lahko reguliramo temperaturo podlage. Vendar to ni edina prednost prevlek, narejenih po HPPMS-postopku. Tudi kristalna struktura in tekstura takšnih prevlek je lahko drugačna od tistih, ki so bile narejene s klasičnim naprševanjem. HPPMS-prevleke imajo bolj finostrukturo, manj defektov in večjo gostoto. Pozitivne posledice so bolj gladka površina (manjše trenje), manjša poroznost in večja korozijska obstojnost.

Omenili smo že, da postopek HPPMS omogoča ionsko jedkanje s kovinskimi ioni, ki je učinkovitejše od jedkanja z ioni argona. Postopek HPPMS omogoča nanos enakomerno debele prevleke na orodja s komplicirano geometrijo. Pri tem mikrostruktura prevleke ni odvisna od smeri nanašanja. Oboje je posledica tega, da ioni sledijo električnemu polju okrog podlag, zato lahko potujejo tudi okrog vogalov in priletijo pravokotno na podlago.

Z vidika uporabe je pomembno tudi to, da namesto konstantne napetosti na podlagah (bias) uporabimo pulzno. Tako lahko trde prevleke nanašamo tudi na električno neprevodne podlage (npr. kermete, keramične ploščice iz Si_3N_4 , mešanih oksidov ali c-BN) in na temperaturno občutljive podlage.

4 SKLEPI

Najsodobnejši postopek nanašanja trdih prevlek, ki je bil razvit pred kratkim, je pulzno magnetronsko naprševanje pri velikih močeh (HPPMS). Ta postopek omogoča pripravo nove generacije trdih prevlek. Tako pripravljene prevleke imajo bolj gosto mikrostrukturo, so v primerjavi s tistimi, ki jih pripravimo s klasičnim magnetronskim naprševanjem, bolj gladke in brez vgrajenih mikrokapljič. HPPMS-postopek obeta možnost priprave visokokvalitetnih dielektričnih tankih plasti, pri čemer se izognemo nastajanju prebojev. S HPPMS-postopkom lahko s kontrolo ionskega obstreljevanja prirojimo lastnosti prevleke (mikrostrukturo, notranje napetosti, morfologijo, kristalno strukturo).

LITERATURA

- ¹V. Kouznetsov, K. Macák, J. M. Schneider, U. Helmersson, I. Petrov, *Surf. Coat. Technol.* 122 (1999), 290–293
- ²I. K. Fetisov, A. A. Filippov, G. V. Khodachenko, D. V. Mozgrin, A. A. Pisarev, *Vacuum* 53 (1999), 133–136
- ³J. Bohlmark, M. Lattemann, J. T. Gudmundsson, A. P. Ehiasarian, Y. Aranda Gonzalvo, N. Brenning, U. Helmersson, *Thin Solid Films* 515 (2006), 1522–1526
- ⁴K. Macák, V. Kouznetsov, J. Schneider, U. Helmersson, *J. Vac. Sci. Technol. A* 18 (2000), 1533–1537
- ⁵V. Kouznetsov, Method and apparatus for magnetically enhanced sputtering, US patent 6.296.742 (2001)
- ⁶A. P. Ehiasarian, R. New, W. -D. Münz, L. Hultman, U. Helmersson, V. Kouznetsov, *Vacuum* 65 (2002), 147–154
- ⁷A. P. Ehiasarian, P. Eh. Hovsepian, L. Hultman, U. Helmersson, *Thin Solid Films* 457 (2004), 270–277
- ⁸K. Bobzin, N. Bagcivan, P. Immich, S. Bolz, R. Cremer, T. Leyendecker, *Thin Solid Films* 517 (2008), 1251–1256
- ⁹S. Konstantinidis, J. P. Dauchot, M. Hecq, *Thin Solid Films* 515 (2006) 1182–1186
- ¹⁰B. M. DeKoven, P. R. Ward, R. E. Weiss, D. J. Christie, R. A. Scholl, W. D. Sproul, F. Tomasel, A. Anders, *Proceedings, Annual Technical Conference – Society of Vacuum Coaters* (2003), 158–165
- ¹¹R. Bandorf, S. Falkenau, K. Schiffmann, H. Gerdes, *Proc. Ann. Tech. Conf. Soc. Vac. Coaters* (2008)
- ¹²J. Alami, P. Eklund, J. M. Andersson, M. Lattemann, E. Wallin, J. Bohlmark, P. Persson, U. Helmersson, *Thin Solid Films* 515 (2007) 3434–3438
- ¹³R. Chistyakov, Methods and apparatus for generating strongly-ionized plasmas with ionizational instabilities, US patent 7.095.179 (2006)
- ¹⁴R. Chistyakov, High deposition rate sputtering, US patent 6.896.773 (2005)
- ¹⁵S. Schiller, K. Goedicke, F. Fietzke, O. Zywitcki, M. Sjöstrand, B. Ljungberg, V. Alfredsson, T. Hilding, *int. patent appl. WO/1999/024634*
- ¹⁶R. Cremer, M. Witthaut, D. Neuschütz, G. Erkens, T. Leyendecker, M. Feldhege, *Surf. Coat. Technol.* 120–121 (1999), 213–218
- ¹⁷A. Schütze, D. T. Quinto, *Surf. Coat. Technol.* 162 (2003), 174–182
- ¹⁸E. Wallin, T. I. Selinder, M. Elfving, U. Helmersson, *Deposition of crystalline alumina coatings using reactive high power impulse magnetron sputtering – process and film properties, lecture at 11th International Conference on Plasma Surface Engineering, Garmisch-Partenkirchen* (2008)
- ¹⁹T. I. Selinder, E. Coronel, E. Wallin, U. Helmersson, *Int. J. Refract. Met. H.* 27 (2009) 507–512
- ²⁰P. Panjan, M. Čekada, M. Maček, A. Zalar, *Low temperature sputter deposited PVD hard coatings, 6th Symposium of European Vacuum Coaters : Anzio* (2004) (8 pp)
- ²¹J. Alami, K. Sarakinos, F. Uslu, M. Wuttig, *J. Phys. D* 42 (2009), 015304 (7pp)