

NASVETI

PRIPRAVA ATOMSKO ČISTIH POVRŠIN

Rok Žitko

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Izpopolnitev tehnik za doseganje ultravisokega vakuumu ter postopkov za pripravo atomsko čistih površin so omogočili pravi zagon fizike in kemije površin. Površino imamo navadno za atomsko čisto, če je število površinskih nečistoč manjše od nekaj odstotkov monoplasti. Takšna stopnja čistoče je zadovoljiva za številne meritve, saj so lastnosti površine tedaj že blizu idealnim. V nekaterih primerih pa že neznatna količina površinskih nečistoč vodi k bistveno spremenjenim lastnostim površine. Prav posebno občutljive so na primer nekatere metastabilne površinske rekonstrukcije. Izredno čiste podlage so potrebne tudi za pripravo tankih plasti z epitaksijo in pri poizkusih s posameznimi molekulami z uporabo vrstičnega tunelskega mikroskopa.

Najbolj pogoste (in trdovratne) nečistoče so ogljik, kisik, žveplo, klor in fosfor, v nekoliko manjši meri pa še dušik, kalcij, silicij, bor in magnezij ⁽¹⁾. Vrste nečistoč, ki jih navadno zaznamo na površinah, so seveda odvisne od snovi, iz katere je vzorec. Na primer na površinah bakra največkrat najdemo ogljik, kisik in žveplo, na železu pa ogljik, žveplo, kisik, dušik, fosfor in klor. Včasih so kupljeni materiali nečisti, ker zanje še niso poznani učinkoviti postopki za ločevanje snovi. V hafniju je tako navadno okoli 3 % kemijsko zelo sorodnega cirkonija ⁽¹⁾. Ker cirkonij difundira iz notranjosti vzorca na površino, je čiščenje izjemno dolgotrajno.

Obstaja veliko postopkov za pripravo atomsko čistih površin, štirje najbolj učinkoviti in najpogosteje uporabljeni pa so:

- 1) pregrevanje vzorca v ultraviskem vakuumu ali v atmosferi reaktivnega plina
- 2) jedkanje površine z ionsko erozijo
- 3) in-situ lomljenje ali cepljenje kristalov
- 4) priprava plasti z epitaksijo.

V primeru monokristalnih vzorcev je izbira tehnike za izbran material močno odvisna tudi od kristalografske orientacije površine, ki jo želimo dobiti ⁽¹⁾. Pogosto moramo zaporedoma uporabiti več različnih postopkov, da dobimo zadovoljiv rezultat.

Predhodna (ex-situ) obdelava površin

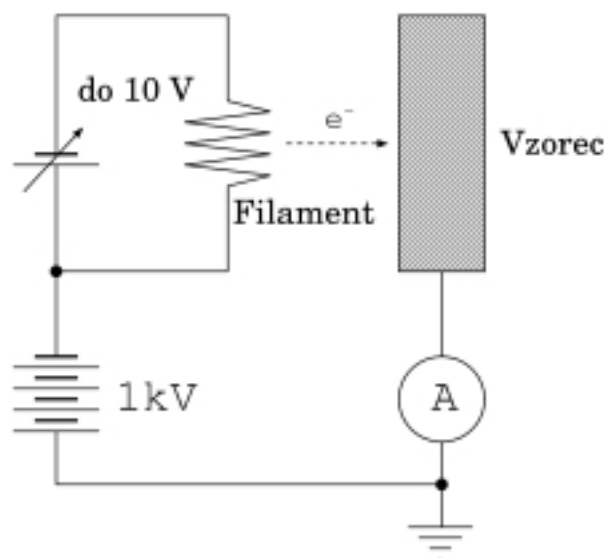
Vzorce moramo navadno predhodno obdelati, preden jih vstavimo v vakuumski sistem. Pogosto jih

mehansko, kemijsko ali elektrokemijsko poliramo, da dobimo zadosti gladko površino. Pri tem se moramo zavedati, da se lahko med obdelavo vzorec kontaminira. Površine razmastimo z ultrazvočnim čiščenjem v etanolu, trikloretilenu, acetonu ali izopropanolu, ostanke topila pa moramo temeljito odstraniti (na primer s segrevanjem vzorca).

Čiščenje s segrevanjem vzorcev v vakuumski komori

Pregravanje vzorcev v vakuumu je navadno prvi korak čiščenja. S segrevanjem povzročimo desorpcijo šibko vezanih površinskih nečistoč, kot sta na primer voda in ogljikov monoksid.

Vzorce lahko pregravamo z omskim gretjem. Polprevodnike (na primer silicij) lahko segrevamo preprosto tako, da tok spustimo skozi sam vzorec. Če pa vzorec nima primerne upornosti (kovina ali dober izolator), ga mehansko pritrdimo na nosilec iz čistega molibdena ali volframa in segrevamo nosilec. Vodniki morajo seveda imeti nizko upornost v primerjavi z nosilcem. Primerne so na primer debele bakrene žice, pri tem pa moramo biti pozorni na morebitne težave z odvajanje toplote, saj so vakuumski skozniki občutljivi za visoke temperature in se hitro poškodujejo.



Slika 1: Postavitev pri pregrevanju vzorca z elektronskim curkom. Z ampermetrom merimo tok elektronov, ki padajo na vzorec, in tako lahko ocenimo moč segrevanja

Zelo učinkovita tehnika segrevanja je obstreljevanje vzorca (ali nosilca vzorca) s hrbtne strani z elektroni.

V neposredno bližino vzorca postavimo grelni žičko, ki jo segrevamo s tokom. Med vzorcem in žičko vzpostavimo potencialno razliko okoli 1 kV, tako da pospešeni elektroni trkajo v vzorec in ga tako segrevajo (slika 1). V komori moramo seveda imeti zadosti dober vakuum, da elektroni nemoteno letijo od izvira do tarče, torej vsaj 10^{-3} mbar. Majhen vzorec bakra na dvajsetgramskem nosilcu iz jekla lahko tako brez težav segrejemo na $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ v dveh minutah. Za izvir elektronov uporabimo kar volframovo žičko iz avtomobilske žarnice (12 V, 50 W), ki smo ji odbrusili stekleno bučko.

Med segrevanjem merimo temperaturo površine nekontaktno z optičnim pirometrom skozi okno vakuumskega sistema. Ceneje, vendar manj natančno, pa se da temperaturo meriti tudi z uporabo termočlena, ki se dotika vzorca ⁽²⁾.

Vzorec lahko čistimo tudi s pregrevanjem v atmosferi reaktivnega plina ali plazme ⁽³⁾. Tako lahko odstranimo nekatere trdovratne nečistoče, na primer ogljik na površini niklja in drugih elementov iz sredine periodnega sistema ⁽¹⁾. Ogljik odpravimo v kisikovi atmosferi. Vzorec najprej segrejemo na visoko temperaturo v UHV, tako da nečistoče difundirajo na površino, nato pa temperaturo nekoliko znižamo, da omejimo nadaljnjo difuzijo. V vakuumski sistem potem vpustimo zelo čist kisik, ki reagira z ogljikom in tvori lažje odstranljive okside. Na podoben način lahko potem kisik in okside odstranimo v vodikovi atmosferi, saj nastanejo hlapni hidridi ⁽¹⁾.

Vzorec, ki je že bil očiščen, a je v vakuumski komori že tako dolgo, da so se na površino adsorbirali residualni plini, najlažje pripravimo za meritve tako, da ga za kratek čas močno segrejemo (angl. *flashing*).

Jedkanje z ionsko erozijo

Pri jedkanju z ionsko erozijo (angl. *ion beam sputtering*) površino obstreljujemo z visokoenergijskimi (okoli 1 keV) ioni žlahtnih plinov, na primer argona ali neona. Tako s površine odstranimo adsorbirane atome nečistoč in nekaj površinskih plasti podlage. S tem tudi močno razbrazdamo površino in porušimo kristalno ureditev. Zato moramo po jedkanju vzorec močno segreti (na temperaturo od 50 do 80 odstotkov temperature tališča), s čimer iz površine odstranimo ujete in adsorbirane atome žlahtnih plinov, nato pa s popuščanjem dosežemo rekristalizacijo površine. Celoten postopek erozije in popuščanja moramo večkrat ponoviti; po vsakem obstreljevanju z ioni površino popuščamo in preverimo čistost in urejenost površine z meritvijo LEED in spektra AES.

Čiščenje poteka tako, da vakuumsko komoro napolnimo s čistim žlahtnim plinom, pogosto argonom, do tlaka okoli 10^{-6} mbar. Površino nato obstreljujemo z ioni argona, ki nastajajo v ionski puški. Ioni nastanejo ob trkih elektronov z atomi plina, nakar jih pospešimo z napetostjo do 1000 V. Tipična gostota ionskega toka je nekaj $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Pomembno je, da je ionski curek čim bolj homogen, da je jedkanje prostorsko enakomerno. Zato imajo ionske puške elektronsko optiko, s katero lahko curek fokusiramo. Hitrost jedkanja površine je odvisna od vrste parametrov: mase in energije ionov, materiala in kristalne orientacije površine, vpadnega kota ionov in temperature površine. Kot primer naj navedemo površino Cu(111), pri kateri z ioni argona odstranimo približno eno monoplast na minuto, če je energija ionov 1 keV, gostota toka $10\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ in vpad pravokoten.

Ključnega pomena je, da imamo med obstreljevanjem v komori čim manj residualnih plinov (na primer CO), saj se tudi ti plini ionizirajo in trkajo v površino, kjer se adsorbirajo ali celo implantirajo globlje v vzorcu.

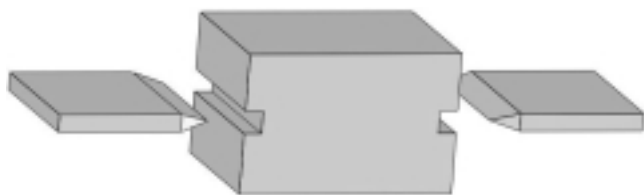
Priporočljivo je, da vzorce močno in zadosti dolgo predhodno pregrevamo, tako da odstranimo tudi nečistoče iz notranjosti vzorca. Te bi v nasprotnem primeru segregirale na površino med popuščanjem in čiščenje bi morali velikokrat ponoviti, da bi dobili zadosti čisto površino.

Z ionsko erozijo težje čistimo električno nevodne površine, ki se nabijejo in ustvarijo odbojno električno polje na površini. V tem primeru lahko hitrost jedkanja povečamo tako, da sočasno površino obstreljujemo tudi z elektroni.

Lomljenje in cepljenje kristalov

Pogosto uporabljen postopek je cepljenje kristalov v samem vakuumskem sistemu. Ker se kristali cepijo vzdolž določenih kristalnih ploskev, lahko tako dobimo čiste in kristalografsko kvalitetne površine, ki so v primeru večatomnih kristalov v splošnem stehiometrične. Najbolj pogosti površinski defekti, ki nastanejo kot posledica cepljenja, so površinske stopnice ⁽⁴⁾.

Cepimo lahko le trdne kristale, ki so krhki, na primer alkalne halide (NaCl, KCl), okside (ZnO, TiO₂, SnO₂), polprevodnike (Ge, Si, GaAs) in plastne materiale (grafit). Cepljenje ni primerno za pripravo površin mehkih vzorcev, lahko pa naredimo tudi takšne materiale primerno krhke, če jih in-situ ohladimo na zelo nizke, kriogene temperature. Krom lahko na primer zelo lepo cepimo pri temperaturi tekočega helija ⁽⁵⁾. Čiste površine nekaterih snovi (kot



Slika 2: Cepljenje kristala z dvema nožema

so litij, talij in indij) lahko v vakuumu pripravimo tudi tako, da jih postružimo ⁽¹⁾.

Vzorec (monokristal) moramo pred cepljenjem primerno orientirati, tako da ostro rezilo preseka kristal v ravno pravi kristalografski smeri. To najlaže naredimo tako, da na dveh straneh kristal predhodno zarezemo, s čimer definiramo ploskev cepljenja. V vakuumu kristal stisnemo med dva jeklena noža (angl. *double wedge technique*), slika 2. Udarec prenesemo na kristal preko vakuumskega skožnika ali pa z uporabo kladivca, ki ga sproži elektromagnet.

S cepljenjem lahko dobimo samo nekatere izmed površin ⁽⁴⁾. Kristalov z ionsko vezjo na primer ne moremo cepiti vzdolž polarnih ploskev, saj bi s tem ločili pozitivne in negativne ione, med katerimi deluje močna vez. Kristal pa se preprosto cepi vzdolž nepolarnih ploskev.

Kakovost nastale površine je odvisna od adhezijske energije dane površine: kristal najlaže cepimo vzdolž ploskev, kjer je ta energija nizka. Težave lahko nastanejo, če obstajajo druge ploskve, ki imajo prav tako nizko energijo in ki so od izbrane ploskve naklonjene za majhen kot. V tem primeru dobljena površina ne bo idealna ploskev, temveč bo sestavljena iz večjega števila manjših ploskev ⁽⁴⁾. Rezultat je odvisen tudi od hitrosti cepljenja: nekatere kristale lahko cepimo tako, da postopoma povečujemo pritisk nanje, pri drugih pa dobimo lepe ploskve le tedaj, ko udarec sprožimo hitro.

Nekatere plastne kristale, ki imajo kemijsko relativno inertne površine, kot so na primer grafit in trihalkogenidi prehodnih kovin, lahko "olupimo" kar na zraku. To najlaže storimo z uporabo lepilnega traku, s katerim prelepimo površino. Ko trak odtrgamo, s tem odstranimo nekaj površinskih plasti in v idealnem primeru dobimo atomsko čisto površino. Če vzorec zadosti hitro (v nekaj minutah) prenesemo v vakuumski sistem, je nova površina sprejemljivo čista za površinske meritve.

Epitaksija

Nekaterih površin ne moremo pripraviti z nobenim od zgoraj opisanih postopkov. Do tega pride na primer pri kristalnih spojin, če kristala ne moremo cepiti in če pri ionski eroziji hitrosti jedkanja za različne atome niso enake, saj v tem primeru površina ne bi bila

stehiometrična in imeli bi veliko število defektov. Za nekatere snovi (polprevodnike III-V, kot so GaAs, GaAlAs) je zato priprava tankih plasti z epitaksijo edini poznani postopek za pripravo velike čiste površine. Tudi nekatere druge površine, na primer površine redkih zemelj, raje pripravimo v obliki tankih plasti. Pri epitaksiji z molekulskim curkov (angl. *molecular beam epitaxy*, MBE) na segreto atomsko čisto podlago usmerimo curek atomov ali molekul ⁽²⁾. Atomi tvorijo kristalno plast, ki se kristalografsko ujema s podlago, torej epitaksijsko plast. Ker postopek poteka v ultravisokem vakuumu, so dobljene tanke plasti atomsko čiste.

Drugi postopki

Šibko vezane (fiziadsorbirane) nečistoče lahko odstranimo z elektronsko stimulirano desorpcijo: vzorec obstreljujemo z nizkoenergijskimi elektroni (100 eV), ki povzročijo desorpcijo adsorbatov ⁽⁶⁾. Desorpcijo nečistoč lahko povzročimo tudi z laserskim obsevanjem. Površino obsevamo s kratkimi (40 ms) pulzi visoke moči. Ker toplota v tako kratkem času ne more disipirati, s površine odletijo površinski atomi. Ta postopek je zelo primeren za čiščenje izolatorjev in polprevodnikov ⁽⁶⁾.

Preverjanje čistosti površin

Kemijsko čistost površine preverjamo z Augerjevo elektronsko spektroskopijo (AES), rentgensko fotoemisijsko spektroskopijo (XPS) ali z masno spektroskopijo sekundarnih ionov (SIMS). Z AES lahko zaznamo nečistoče, ki jih je več kot en promil monoplasti, XPS pa ima prag zaznavanja še desetkrat nižji. Metoda SIMS je sicer veliko bolj občutljiva, kot sta predhodni, vendar je destruktivna ⁽⁷⁾. Kristalno ureditev nadzorujemo z uklonom nizkoenergijskih elektronov (LEED) ⁽⁴⁾.

Namesto sklepa nadaljnje branje

Zelo uporaben pregledni članek je vir ⁽¹⁾, kjer so podrobno opisani postopki za pripravo atomsko čistih površin za štiriinšedemdeset elementov. V istem viru najdemo tudi naslednjo strategijo za čiščenje razsežnih vzorcev, za katere še ni poznan postopek čiščenja. Vzorec najprej razplinjamo (degaziramo) pri temperaturi malo pod tališčem. Nato ga pri sobni temperaturi jedkamo z ionsko erozijo (Ar, 1 keV, nekaj $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), dokler s kemijsko specifičnim merjenjem ne ugotovimo, da je površina atomsko čista. Nato vzorec popuščamo s temperature, enake dvema tretjinama tališča, pri tem pa opazujemo sestavo površine. Če na površino segregira kakšna nečistoča, moramo poiskati temperaturo največje koncentracije

te nečistoče in pri tej temperaturi nadaljevati ionsko erozijo.

LITERATURA

¹R. G. Musket, W. McLean, C. A. Colmenares, D. M. Makowiecki, W. J. Siekhaus *Preparation of atomically clean surfaces of selected elements: a review*, Appl. Surf. Sci. **10** (1982), 143–207

²J. R. Arthur *Molecular Beam Epitaxy*, Surf. Sci., **500** (2002), 189

³R. E. Thomas, M. J. Mantini, D. P. Malta, S. V. Hattangady, R. J. Markunas, *Carbon and oxygen removal from silicon(100) surfaces by remote plasma cleaning techniques*, J. Vac. Sci. Tech., **10** (1992), 817

⁴H. Lüth, *Surfaces and Interfaces of Solid Materials*, Springer Verlag, Berlin, tretja izdaja, 1995

⁵O. Y. Kolensnychenko, R. de Kort, H. van Kempen, *Atomically flat ultra-clean Cr(001) surfaces produced by cleavage of a single crystal: scanning tunneling microscopy and spectroscopy study*, Surf. Sci., **490** (2001), L573

⁶J. Verhoeven, *Techniques to Obtain Atomically Clean Surfaces* The Journal of Environmental Sciences **9** (1979)

⁷L. C. Feldman, J. W. Mayer, *Fundamentals of surface and thin film analysis*, North-Holland, 1986

DOLOČANJE DEBELINE TANKIH PLASTI IZ MERITVE PROFILA STOPNICE

Miha Čekada

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

UVOD

O različnih metodah merjenja debeline tankih plasti smo v Vakuumistu ⁽¹⁾ že pisali. Kot eno najbolj uporabnih metod smo opisali tudi merjenje s profilometrom. Pred nanosom tanke plasti del vzorca zastremo s primerno masko, ki prepreči rast plasti na tem delu. Po končanem nanosu masko odstranimo in s profilometrom pomerimo prečni profil vzorca. Na profilu se prehod med golo podlago in tanko plastjo kaže v obliki stopnice. Višina te stopnice je enaka debelini plasti. Soroden način priprave stopnice je jedkanje (ali kakšen drug način odstranitve) dela plasti.

Težave

V uvodu zapisane trditve seveda držijo, vendar se pogosto pojavijo težave, zaradi katerih težko natančno odčitamo višino stopnice. Neredko je stopnica tako slabo izražena, da lahko podamo le grobo oceno o debelini plasti. Teh težav je več:

1. Neenakomerna debelina tanke plasti

Enakomernost debeline plasti je močno odvisna od tehnike nanosa, toda pogosto pride do večjih sprememb debeline na robovih vzorca ali kakršnih koli spremembah geometrije. Primerno mesto za merjenje debeline naj bo ravno, stran od robov in štrlečih delov, ki bi utegnili povzročati senčenje.

2. Neizrazita stopnica

Če maska ni primerno pričvrščena na podlago (spet so zahteve močno odvisne od tehnike nanosa), stopnica ni jasno izražena. Namesto ostrega skoka

med golo podlago in tanko plastjo dobimo zvezen prehod, kjer ni jasno, kje je prava debelina tanke plasti (slika 1a). Takšen pojav je pogost pri pripravi stopnice z jedkanjem.

3. Preveč izrazita stopnica

Pri nekaterih postopkih priprave stopnice (npr. sol gel) je velikost stopnice pretirana in je pravilno mesto za odčitek debeline tanke plasti stran od prehoda gola podlaga/tanka plast (slika 1b). Podobno je pri luščenju dela površine, kjer sicer dobimo zelo ostre stopnice, a utegne biti plast ob robovih nekoliko upognjena.

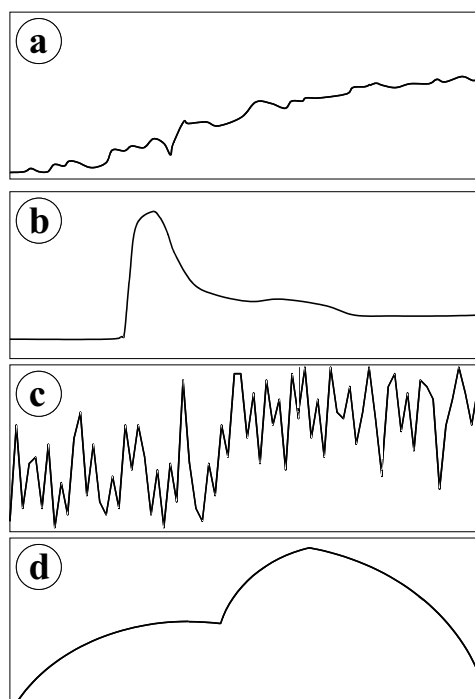
4. Hrapavost

Tako površina podlage kot tudi površina tanke plasti imata neko končno hrapavost. Ta lahko med nanosom ostane enaka, se poveča (npr. nanos s katodnim lokom) ali zmanjša (npr. breztokovni nanos). Hrapavost ni moteča, če je mnogo manjša od debeline plasti. Pri zelo tankih plasteh pa je hrapavost večkrat primerljiva z debelino plasti, zato je težko odčitati ničelno linijo podlage in višino stopnice (slika 1c).

5. Ukrivljenost vzorca

Vse prej našteje težave se da relativno enostavno obiti, če je podlaga (ničelna linija) ravna. Večinoma pa temu ni tako. Če sama podlaga ni popolnoma ravna, bodisi zaradi nenatančne izdelave ali kasnejše obdelave površine. Če je debelina tanke plasti 1 µm, bo ukrivljenost 1 µm na razdalji 10 mm (to je le 1:10.000) precej pokvarila meritev (slika 1d).

Toda bolj kot nepravilna oblika vzorca je pomembna ukrivljenost vzorca zaradi notranjih ali



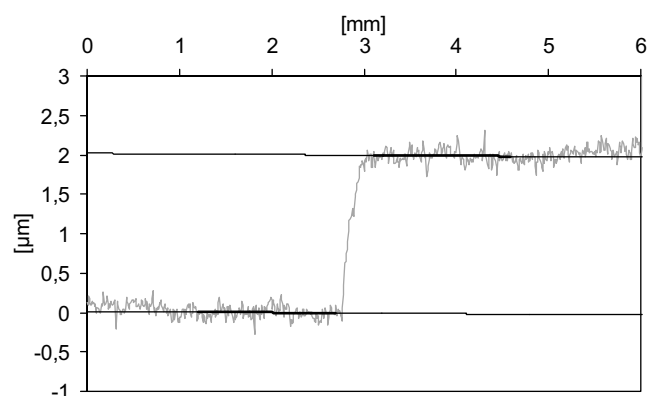
Slika 1: Značilne težave pri odčitavanju višine stopnice: a) neizrazita stopnica, b) preveč izrazita stopnica, c) prevelika hrapavost površine, d) prevelika ukrivljenost vzorca

termičnih napetosti. Testni vzorci so ponavadi tanki (silicijeve rezine, stekla, keramične ploščice itd.), tako da jih napetosti na fazni meji zlahka ukrivijo za nekaj mikrometrov. Posebej neugodno je, ker pride na meji gola podlaga/tanka plast do največjih pregibov, tako da izgubimo referenčno linijo.

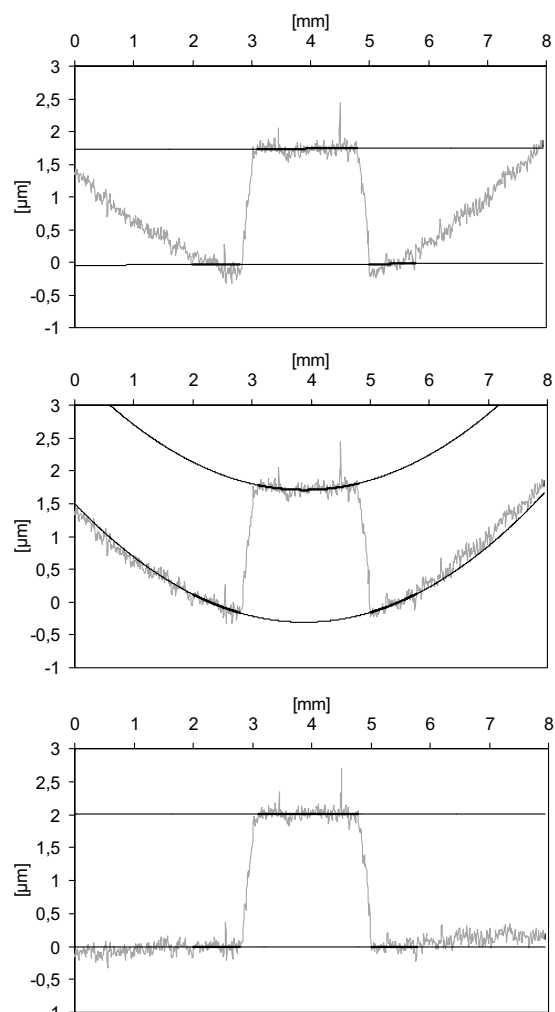
Seveda lahko več teh težav nastopi skupaj in v takih primerih, npr. neizrazita stopnica na močno hrapavi in ukrivljeni podlagi, debeline plasti ne moremo določiti.

Rešitve

Prej opisane težave lahko zreduciramo na naslednji problem:



Slika 2: Odčitavanje višine stopnice s prilagajanjem dveh vzporednih premic. Intervala, na katerih je bilo narejeno prilagajanje, sta odebeljena.

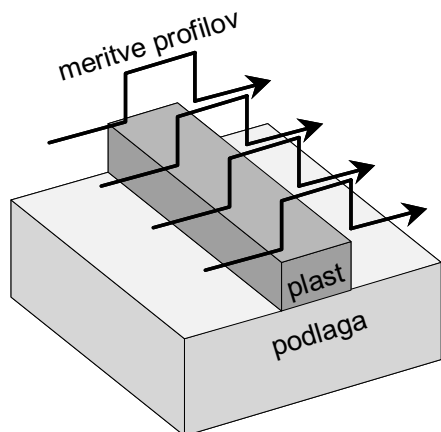


Slika 3: Analiza profila z dvema stopnicama: a) neustreznost linearnega prilagajanja, b) postopek kvadratnega prilagajanja, c) "poravnani" profil. Intervali, na katerih je bilo narejeno prilagajanje, so odebeljeni.

1. poiskati je treba del profila, kjer je gotovo gola podlaga
2. poiskati je treba del profila, kjer je gotovo tanka plast prave debeline
3. na obeh odsekih je treba potegniti vzporedni premici (ali kakšni drugi krivulji), ki se dobro prilegata merjenemu profilu
4. razlika med obema premicama oz. krivuljama je enaka iskani debelini.

Prvi dve nalogi rešimo na podlagi izkušenj - tu nam ne pomaga nobena matematika. Referenčni del profila naj bo čim bližje stopnici, vendar ne sme segati v prehodno območje. Prav tako se izognimo prevelikim artefaktom (veliki vrhovi zaradi prašnih delcev ipd.), ki nam pokvarijo natančnost izračuna.

Najpreprostejši način rešitve tretje točke je, da na natisnjem profilu z ravnilom potegnemo dve premici: eno čez referenčni del gole podlage in drugo čez referenčni del tanke plasti (slika 2). Premici morata biti vzporedni. Razlika med premicama (razlika višin, ne razdalja med njima!) je enaka

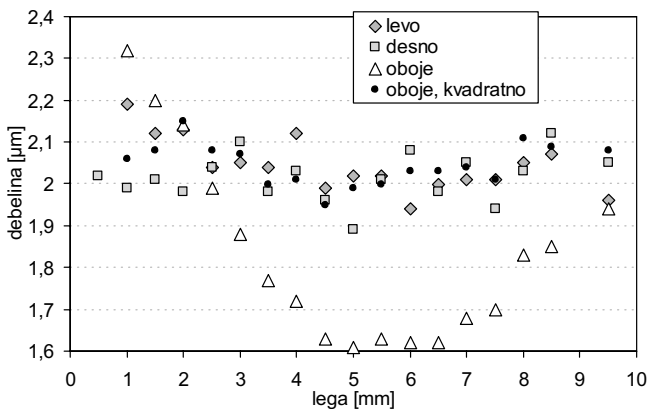


Slika 4: Skica vzorca, na katerem smo testirali zanesljivost meritev

debelini tanke plasti. Če sta ukrivljenost vzorca in hrapavost površine majhni, je tak način dovolj natančen kljub preprostosti.

Pogosto pa stopnica ni tako preprosta, da bi na roko določili debelino. Tedaj je treba profil posneti in debelino izračunati. Določiti moramo dve premici, eno potegnemo čez referenčno področje podlage ($y=kx+n_1$), drugo pa čez referenčno področje tanke plasti ($y=kx+n_2$). Obe referenčni področji morata biti približno enako dolgi. Kot rečeno, sta premici vzporedni, zato sta koeficienta k enaka. Določiti moramo torej tri parametre (k , n_1 in n_2), in sicer tako, da bo vsota kvadratov razlik med premico in merjenim profilom na obeh referenčnih področjih najmanjša. Debelina plasti je enaka $d=n_2-n_1$. V večini primerov linearno prilagajanje zadostuje in prilagajanje s krivuljami višjega reda ne izboljša natančnosti.

Pri močno ukrivljenih vzorcih pa je koristno, da masko pripravimo tako, da nastane tanka plast le na področju pasu preko vzorca, na obeh straneh pa je gola podlaga. Lahko naredimo tudi obratno, da je s tanko plastjo prekrit ves vzorec razen pasu na sredini, ki ostane gol. Na profilu torej dobimo dve stopnici, na katerih določimo tri referenčna področja: gola podlaga levo, tanka plast v sredini in gola podlaga desno. Če je vzorec ukrivljen, referenčni področja podlage na bosta



Slika 5: Meritve debeline konkretnega vzorca, izračunane z različnimi metodami prilagajanja

vzporedni, zato bomo pri linearnem prilagajanju dobili napačen rezultat (slika 3a). Treba je uporabiti kvadratno prilagajanje, kar ima tudi ustrezno fizikalno ozadje. Po Stoneyjevi formuli je namreč vzorec pod vplivom notranjih napetosti ukrivljen v obliki parabole.

Modeliranje poteka podobno kot pri linearnem prilagajanju. Potegnemo dve paraboli (slika 3b): prva gre čez obe referenčni področji gole podlage ($y=ax^2+bx+c_1$), druga pa čez referenčno področje plasti ($y=ax^2+bx+c_2$). Ker sta paraboli vzporedni, sta kvadratna člena (a) in linearna člena (b) enaka. Tokrat imamo štiri proste parametre (a , b , c_1 in c_2), debelina pa je enaka razliki prostih členov. Poenostavljeno lahko povemo, da na ta način "poravnamo" celoten vzorec, ne da bi popačili stopnice (slika 3c). Takšen način dela nam da bolj zanesljiv rezultat.

Zanesljivost

Poglejmo si konkreten primer vzorca (podlaga iz polirane keramike 1 cm × 1 cm), na katerega je bil nanosen pas tanke plasti AlCuFe. V prečni smeri smo v razmaku 0,5 mm izmerili profile (slika 4). Na vsakem profilu smo izmerili višino leve stopnice in ločeno desne stopnice z linearnim prilagajanjem (slika 2). Posebej pa smo na obeh stopnicah skupaj naredili še analizo s kvadratnim prilagajanjem (slika 3b) in za primerjavo še z linearnim prilagajanjem (slika 3a).

Na sliki 5 so prikazane debeline, izračunane na štiri različne načine za vsak profil posebej. Na abscisi je vzdolžna smer pasu, na katerem je bila nanosena tanka plast. Takoj lahko opazimo, da je analiza z linearnim prilagajanjem obeh stopnic skupaj obremenjena z veliko sistematično napako in zato neprimerna. Linearno prilagajanje na eni stopnici (levi ali desni) nam da zadovoljivo ponovljiv rezultat – sipanje je $\pm 0,1 \mu\text{m}$, kar ob debelini $2 \mu\text{m}$ prinese natančnost v okviru 5 %. Takšno natančnost torej lahko pričakujemo tedaj, ko imamo na razpolago le eno stopnico. S kvadratnim prilagajanjem obeh stopnic skupaj pa je sipanje manjše, še vedno pa je znatno ob robovih vzorca. Meritev na sredini vzorca in naknadna analiza torej dosežeta natančnost $\pm 0,04 \mu\text{m}$ oz. 2 %.

Sklep

V izjemnih primerih predstavlja merjenje debeline tanke plasti s profilometrom le odčitek na izpisu. Ponavadi pa je zaradi hrapavosti, ukrivljenosti in neenakomerne stopnice potrebno prilagajanje profila s premicami. Večkrat pa niti to ne zadostuje in je potrebno kvadratno prilagajanje na profilu z dvema stopnicama. To nam pri izrazitejših profilih zagotavlja veliko natančnost, pri neizrazitih pa je edina možnost za dosego uporabnega rezultata.

Literatura

¹M. Čekada, Vakuumist 20(1) (2000) 16–19