

Uporaba nanoprecizne robotske celice za meritev van der Waals-ove sile med mikro objekti

Božidar Bratina, Jakob Šafarič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor
E-pošta: bozidar.bratina@um.si

Abstract.

The paper presents the method for measurement of micro object (sizes between 10-100 μm) nano roughness. The method uses the measured contact van der Waals force between two micro objects (spheres), and calculation of so called van der Waals peak distance (1-10 \AA) which is a qualitative indicator of the roughness. The developed model for micro object nano roughness has been confirmed by experimental lab results.

1 Uvod

Uporaba meritev van der Waals-ove sile v kontaktu za potrebe identifikacije nekaterih lastnosti mikro objektov (radij objekta v primeru objektov okrogle ali cilindrične oblike) zahteva kvalitetno meritev nano hrapavosti površine mikro objekta. V splošnem obstajajo tri metode meritve nano hrapavosti: kristalografska metoda [1], ki se uporabljajo za meritev t.i. van der Waals-ovega radija atoma in zahteva slikanje površine kontakta z X-žarki, nadalje metoda meritev vrhov nano hrapavosti z AFM mikroskopom [2], in tretja računsko metoda, podobna prejšnji vendar uporablja zahtevne izračune fraktalne površine in Fourierjeve transformacije [3]. Značilnost vseh metod je, da zahtevajo izjemno drage naprave za takšne meritve. Naša metoda je računsko enostavna, ne zahteva nobenih dodatnih naprav v robotski nano celici, je inženirsko učinkovita in primerna za avtomatske meritve van der Waals-ove vršne razdalje med objektoma v kontaktu za razdalje 1 \AA - 10 \AA (\AA ngström znaša 10^{-10} metra).

Z razvitim matematični modelom lahko dokaj natančno ($\pm 10\%$) izračunamo van der Waals-ovo silo in posledično iz nje geometrijske parametre (v našem primeru radij) preiskovanega mikro ali pa celo nano objekta. Pri tem mora biti znana Hamaker-jeva konstanta med materialoma v kontaktu.

2 Nanoprecizna robotska celica

Razvita naprava [4] omogoča opazovanje in 3D manipulacijo mikro objektov, gradnjo mikro struktur, meritev van der Waals-ove sile med mikro objekti itd. Točnost pozicioniranja znaša v regulacijski zanki 61 nm, pri odprtozračnem krmiljenju pa 3,9 nm. Slabost naprave predstavlja optična ločljivost trenutno nameščenega mikroskopa, ki omogoča manipulacijo z objekti reda do 1 μm . Mikro objekte je možno premikati z enoprstnim prijemalom na osnovi van der Waals-ove

sile ali kapilarne sile ter jih sestaviti v večjo strukturo. Pri tem je pomembna oblika, velikost in snov (kristalna struktura, nano in mikro hrapavost površine, Hamaker-jeva konstanta) objektov, atmosfera, čistost itd.

V prispevku se bomo osredotočili na uporabo nano robotske celice za potrebe merjenja van der Waals-ove sile in določanja vršne razdalje med mikro objekti v stiku. Predstavljeni bodo metoda za meritev sile in teoretične formule za izračune, orodje za manipulator oz. robota, priprava merilne traverze in mikro objektov, programska oprema in avtomatiziran postopek meritve.

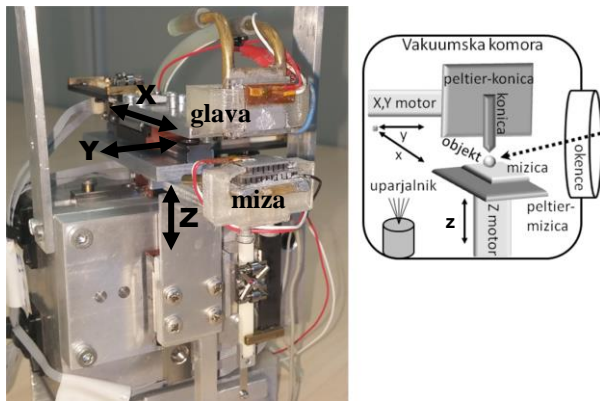
2.1 Opis naprave

Omenjeno nano robotsko celico (slika 1) sestavlja vakuumska komora (1), optični mikroskop s kamero (2), nanoprecizni robotski mehanizem v notranjosti komore, hladilni sistem, sistem za uparjanje vode, vakuumski črpalki (dvo stopenjska oljna črpalka in turbomolekularna črpalka (3)), merilna oprema (senzor tlaka in temperature), čelna plošča nano robotske celice (4), računalnik za vodenje robotske celice v realnem času in grafični vmesnik za upravljanje celice (slika 3).



Slika 1. Nanoprecizna robotska celica

Nano pozicionirnik oz robot (slika 2) omogoča linearno premikanje po X, Y, in Z osi, kjer slednja predstavlja gibanje mize gor/dol na katero se namestijo mikro objekti. Glava robota se lahko premika po X (levo/desno) in Y osi (naprej/nazaj), nameščeno pa lahko ima različno orodje (enoprstno prijemalo, traverza za meritve sile). Delo poteka v vakuumu za kar skrbita vakuumska dvostopenjska oljna črpalka in turbomolekularna črpalka (do 10 μbar). Sistem hlajenja ali gretja pri aplikaciji meritve sile ni potreben, zato ga na tem mestu ne bomo podrobno opisovali.



Slika 2. Operaterski vmesnik za delo z nanorobotsko celico in avtomatsko meritvijo van der Waals-ove sile.

Meritev van der Waals-ove sile poteka med objektom na podlagi in objektom na merilni traverzi ali zgolj traverzo (slika 4). Pri tem je v določenih primerih (dimenzije objektov, material) potrebno objekt na podlago pritrditi, da se med merjenjem ne prestavi.

Priprava objektov in merilne traverze zahteva čisto okolje ter ustrezen postopek namestitve objektov na podlago in traverzo. Merilno traverzo izdelamo iz kosa ravne žice (čisto zlato) premera 50 μm , in jo odrežemo na dolžino 15 - 25 mm. En konec z lepilom pritrdimo na orodje glave robota, na drug konec pa nalepimo mikro objekt (slika 3). Le-tega pritrdimo z dvokomponentnim lepilom (polistiren) ali UV lepilom (steklo, kovine).

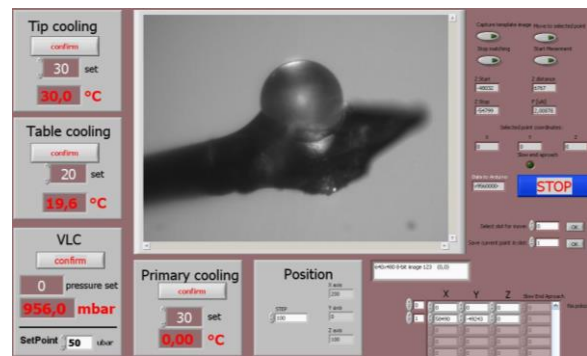
Steklena podlaga na katero namestimo mikro objekte se očisti z destilirano vodo ali izopropanolom ter posuši. Mikro objekte (kroglice) različnih dimenzij (10-100 μm) se vmeša v majhno količino destilirane vode ter se jih nanese na stekleno podlago v obliki kapljice. V vakuumu znotraj komore voda izhlapi in na stekleni podlagi ostanejo le mikro objekti. Vakuum preprečuje tudi onesnaženje s prašnimi delci, ki so lahko celo večji od mikro objektov.

2.2 Programska oprema za merjenje sile

Aplikacija za merjenje sile je izvedena v okolju LabView in omogoča dva načina merjenja: ročni in avtomatski. Pri ročnem postopku meritve sile operater krmili robota po korakih velikih 61 nm, kjer lahko hitrost premikanja poljubno nastavi, seveda znotraj zmožnosti motorja. Najprej mora operater postaviti robota v začetni položaj, tako da sta objekta med katerima merimo silo v kontaktu. Operater si položaj osi zabeleži nato pa pomika mizo robota navzdol dokler se objekta zaradi sile upogiba traverze ne ločita. Operater na podlagi končnega položaja z-osi izračuna razliko (upogib) in iz razlike van der Waals-ovo silo med objektoma.

Avtomatsko merjenje sile deluje na podlagi strojnega vida, za kar je bila uporabljena LabView knjižnica za strojni vid. Operater najprej zajame sliko merilne traverze s pritrjenim objektom. To statično stanje oziroma začetno sliko programska oprema

uporabi, da zazna ločitev objektov. Pred meritvijo operater poskrbi za kontakt med objektoma ter sproži postopek avtomatske meritve sile s pritiskom na gumb v vmesniku. Vgrajen algoritem poskrbi za avtomatsko pomikanje mize (z-os) navzdol dokler se objekta zaradi sile upogiba ne ločita. Ločitev objektov prepozna algoritem strojnega vida (slika na mikroskopu je enaka kot tista, ki je bila na začetku posneta) in ustavi premikanje mize. Vmesnik nato preko sprogramirane formule s podatki merilne traverze (dimenzije, material) in izmerjenega upogiba traverze izračuna silo med mikro objektoma. Prednost avtomatskega merjenja razdalje pred ročnim je v večji natančnosti meritve, saj ima programska oprema krajši odzivni čas v trenutku ločitve mikro objektov, kot človeški operater. Zaradi tega se premikanje mizice ustavi bližje položaju, kjer sta se objekta ločila, kar poveča natančnost meritev.



Slika 3. Operaterski vmesnik za delo z nanorobotsko celico in avtomatsko meritvijo van der Waals-ove sile.

2.3 Opis metode meritve van der Waals-ove sile

Van der Waals-ova sila je šibka privlačna medmolekulska sila, ki nastopa med sosednjima molekulama oziroma atomoma zaradi njunih induciranih električnih dipolov. Van der Waals-ova sila med objekti velikosti 10-100 μm v stiku znaša približno 0,1-10 μN , odvisno od materiala, oblike in dimenzij. Meritev tako majhnih sil med mikro objekti običajno zahteva drago namensko opremo [2], [3], v prispevku pa smo uporabili enostavno metodo meritve sile glede na upogib traverze [4] (slika 4). Princip meritve temelji na enostransko vpeti traverzi znanega (okroglega) profila, dolžine in elastičnosti materiala. Iz izmerjenega upogiba se po (1) izračuna sila:

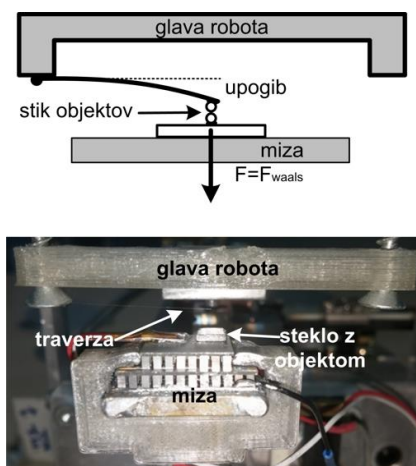
$$F_{waals} = \frac{3fE\pi d^4}{64l^3} \quad (1)$$

kjer F_{waals} predstavlja izračunano van der Waals silo, f izmerjen upogib, E Youngov koeficient elastičnosti traverze, d premer in l dolžino traverze. Velikost sile je tako odvisna od oblike, snovi in dimenzij objektov v stiku. Enačba (2) predstavlja izračun sile med kroglo in ravnino, enačba (3) pa silo med dvema kroglima:

$$F_{waals} = \frac{R_1 A_{1_vac_2}}{6D^2}, \quad (2)$$

$$F_{waals} = \frac{(R_1 R_2)}{(R_1 + R_2)} \cdot \frac{A_{1_vac_2}}{6D^2}, \quad (3)$$

kjer R_1 in R_2 predstavljata radij objektov, $A_{1_vac_2}$ je Hamaker-jeva konstanta med materialom 1 in 2 preko medija vakuum, in D predstavlja vršno razdaljo med objektoma v stiku.

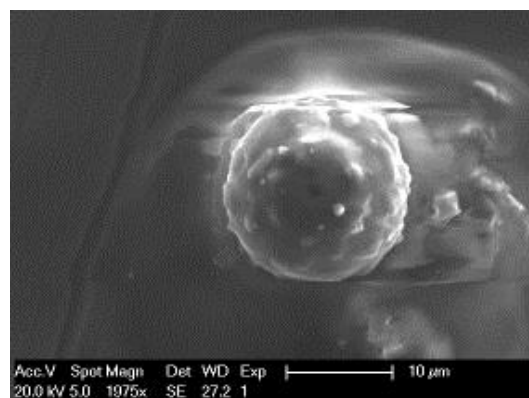


Slika 4. Princip meritve van der Waals-ove sile z merilno traverzo v praksi

Izmerjena sila se lahko primerja z modeli teoretičnih izračunov glede na različne oblike, dimenzije in materiale (Hamaker-jeva konstanta) ter ustrezno razvrsti in razpozna. Če na primer pričakujemo stike z znanimi objekti, meritve pa bistveno odstopajo lahko sklepamo na dotik z objektom nepričakovanih dimenzij, oblike ali celo materiala. Ta princip se aplikativno uporablja za razpoznavo ustreznih mikro objektov pri gradnji mikro struktur, kjer morajo biti posamezni gradniki popolnoma enaki (zobnik).

3 Van der Waals-ova vršna razdalja

Pri manipulaciji z mikro objekti in gradnji struktur je zelo pomembna kvaliteta gradnikov. Material za katerega lahko z makro vidika rečemo, da je gladek in čist se pod mikroskopom izkaže, da je poln mikro deformacij, razpok, izboklin, kar vpliva na kvaliteto stika in posledično silo med objektoma. Teoretična razdalja med dvema objektoma v kontaktu je določena s t.i. van der Waals-ov radijem obeh materialov. V praksi se izkaže, da geometrija objektov ni tako popolna kot predpostavljamo v teoriji, zato je dejanska razdalja med objektoma v kontaktu večja in odvisna tudi od mikro hrapavosti površine objektov, kar prikazuje slika elektronskega mikroskopa (slika 5). Vsak material ima svoje površinske lastnosti, kjer je t.i. mikro hrapavost umetno izdelanih mikro objektov posledica kvalitete mehanske obdelave in proizvodnega postopka. Obstaja pa še t.i. nano hrapavost materiala (več različno velikih izboklin na površini materiala v velikosti 0,2 - 0,5 nm. Omenjen van der Waals-ov radij, ki določa minimalni stik med objekti je za večino kemijskih elementov že izmerjen [5]. Nano hrapavost skupaj z van der Waals-ovim radijem lahko imenujemo van der Waals-ov vrh, ki predstavlja pravo razdaljo med objektoma v stiku.



Slika 5. Mikro hrapavost SiO_2 kroglice vidna pod elektronskim mikroskopom

Le-ta je za različne materiale, kristalne strukture, nano hrapavosti različna, njegova določitev na podlagi meritve van der Waals-ove sile med objekti pa prikazana v nadaljevanju.

3.1 Kalibracija van der Waals-ove vršne razdalje

Obstaja več načinov merjenja van der Waals-ove vršne razdalje [2], [5]. V prispevku bomo predstavili določitev vršne razdalje s pomočjo merjenja van der Waals-ove sile med objekti znanih materialov, geometrije in velikosti. Vršno razdaljo med dvema objektoma v kontaktu lahko izrazimo iz enačbe za silo med dvema objektoma. Enačba (4) predstavlja izpeljano van der Waals-ovo vršno razdaljo med kroglo in ravnino, enačba (5) pa med dvema kroglama:

$$D = \sqrt{\frac{R_1 A_{1_vac_2}}{6F_{waals}}}, \quad (4)$$

$$D = \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{A_{1_vac_2}}{6F_{waals}}}. \quad (5)$$

Torej za mikro objekte znanih dimenzij in Hamaker-jevo konstanto med njimi, lahko s pomočjo izmerjene van der Waals-ove sile po zgornjih enačbah določimo van der Waals-ovo vršno razdaljo med objekti v kontaktu. Moramo se zavedati, da tako izračunana vršna razdalja velja samo za objekte iz istega materiala in narejene z isto metodo. Razlog je v metodi izdelave, ki vpliva na hrapavost objekta in kristalni strukturi.

3.2 Merjenje velikosti kroglice s pomočjo van der Waals-ove sile

S pomočjo meritve van der Waals-ove sile lahko tudi določimo velikost objektov (kroglic). Iz enačbe (2) oz. (3) lahko izpeljemo radij objekta, ob predpostavki da poznamo ostale dimenzije objektov, merilne traverze, Hamaker-jevi konstanti, van der Waals-ovo vršno razdaljo za ta tip objektov, in silo. Določitev radija R_2 ob predpostavki, da je krogla z radijem R_1 znana:

$$R_2 = \frac{6R_1 F_{waals} D^2}{A_{1_vac_2} R_1 - 6F_{waals} D^2}. \quad (6)$$

S predstavljeno metodo težko zelo natančno določimo velikost saj je natančnost odvisna od natančnosti izmerjene sile, lahko pa jo ocenimo v rangi +/- 10 %. Natančnost je prav tako odvisna od geometrije kroglice (odkrušena, vdolbine, izbokline), potem lahko izmerimo preveliko ali premalo silo (npr. več stikov).

3.3 Rezultati meritev vršne sile med različnimi objekti

Mikro objekti, ki smo jih uporabili za določitev van der Waals-ovega vrha so iz običajnega (natrijevega) stekla (večji objekti), boro-silikatnega stekla (manjši objekti) in polistirena. Oba tipa steklenih kroglic sta iz podjetja Polysciences Inc. Polistirenske kroglice (PS) oz. latex mikro kroglice so iz podjetja Kisker Biotech GmbH & Co. Za stekleno podlago (ravnina) smo uporabili mikroskopsko steklo. Izvedli smo kombinacije stikov med objekti: SiO₂ krogla - SiO₂ krogla, SiO₂ krogla - SiO₂ ravnina, SiO₂ krogla - PS krogla, PS krogla - SiO₂ ravnina. Izvedli smo dvajset zaporednih meritev van der Waals-ove sile ter izločili dve največji in dve najmanjši. Iz izračunane van der Waals-ove sile smo po formulah (4) in (5) določili vršno razdaljo D med dvema objektoma v stiku.

Tabela 1. Meritve upogibov traverze (sile)

Št.	Začetek	Konec	Št. korak.	Upogib [nm]
1	29180	28460	720	43920
2	29180	28480	700	/
3	29220	28460	760	46360
4	29180	28420	760	46360
5	29200	28440	760	46360
6	29180	28440	740	45140
7	29180	28400	780	47580
8	29200	28480	720	43920
9	29180	28500	680	/
10	29240	28500	740	45140
11	29260	28540	720	43920
12	29280	28440	840	/
13	29260	28500	760	46360
14	29240	28420	820	/
15	29240	28540	700	42700
16	29220	28520	700	42700
17	29260	28540	720	43920
18	29260	28540	720	43920
19	29240	28540	700	42700
20	29280	28520	760	46360

V Tabeli 1 je prikazana začetna pozicija z-osi robota oziroma mize (*Začetek*) pred pričetkom meritve, končna pozicija z-osi po razklopu mikro objektov (*Konec*), *število korakov* pomika z-osi, ter izračunan *upogib*, ki je zmnožek št. korakov in 61 nm konstante (resolucija pomika). Pri izračunu sile med dvema SiO₂ kroglama (7) je uporabljena povprečna vrednost izbranih upogibov f , E za zlato traverzo znaša 79 GPa, premer traverze (d) je 50 μm , dolžina traverze (l) pa 16,5 mm. Pri vseh izračunih je podan standardni odklon meritev.

$$F_{\text{waals}} = \frac{3fE\pi d^4}{64l^3} = 0,72\mu\text{N} \quad (7)$$

Tabela 2. Rezultati meritev sil in vršne razdalje

	PS krogla	SiO ₂ krogla	SiO ₂ ravn.
PS krogla			
$A_{1_vac_2}$ [zJ]	98	80	80
F_{waals} [μN]	2,05±0,19	1,42±0,08	2,23±0,05
D [\AA]	2,5	3,0	3,0
SiO ₂ krogla			
$A_{1_vac_2}$ [zJ]		66	66
F_{waals} [μN]		0,72±0,02	1,95±0,09
D [\AA]		3,8	3,8

Kjer $A_{1_vac_2}$ predstavlja Hamaker-jevo konstanto med materialoma, F_{waals} izračunano silo glede na upogib traverze in D ugotovljeno vršno razdaljo med objektoma v stiku. Radij steklene kroglice na traverzi je znašal 25 μm , na mizi 14,9 μm , polistirenske kroglice pa 15 μm . V tabeli 2 so razvidne vršne razdalje med mikro objekti različnih dimenzij istega in različnega materiala. Očitno v meritvah najbolj vpliva material (polistiren, steklo) oz. kristalna struktura, saj se pri polistirenu stikamo s prostimi vodikovimi atomi, pri steklu pa s prostimi kisikovimi atomi (večji od vodikovih). Mikro hrapavost objektov nam je vnesla +/- 10 % odstopanja v rezultatih.

4 Zaključek

V članku smo prikazali princip avtomatiziranega merjenja radija SiO₂ ali polistirenskega mikro objekta s pomočjo nanopozicionirnika. Po začetni kalibraciji smo preko meritve van der Waals-ove sile izračunali t.i. van der Waals-ove vršne razdalje med kontaktnima površinama za razdalje 1-10 \AA . Eksperimentalni rezultati kažejo, da na ta način lahko dosežemo meritve radijev mikro objektov znotraj natančnosti cca. 10 %. Razvita aplikacija z nanorobotsko celico predstavlja enostavno ugotavljanje radija mikro objektov na osnovi van der Waals-ove sile, v primerjavi z metodami, ki temeljijo na dragi laboratorijski opremljeni (mikroskop na atomsko silo itd). Namenjena je gradnji mikro struktur (reduktor premera 30 μm), kjer je potrebno razpoznavanje mikro objektov pred manipulacijo.

Literatura

- [1] H. Rumpf: Particle Technology, Chapman & Hall, London/New York, 1990.
- [2] Y. I. Rabinovich et al: Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces I. Role of Asperity Geometry, Journal of Colloid and Interface Science 232, 10–16, 2000.
- [3] S. Eichenlaub, A. Gelb, S. Beaudoin: Roughness models for particle adhesion, Journal of Colloid and Interface Science 280, 289–298, 2004.
- [4] R. Šafarič, D. Lukman: One-finger gripper based on the variable van der Waals force used for a single nano/micro-sized object, Journal of micromechanics and microengineering, Vol. 24, 1-13, 2014.
- [5] Alvarez S.: A cartography of the van der Waals territories, Dalton Trans., 42, 8617–8636, 2013.