

Gradnja mikrostruktur z uporabo enoprstnega prijemala na osnovi kapilarne in van der Waals-ove sile

Božidar Bratina, Suzana Uran, Riko 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 a method for reliable gripping/releasing micro objects using one-finger gripper and capillary force. A capillary bridge (meniscus) between micro objects or surface is formed by condensation of water vapour from surrounding air (lowering the temperature below the dew-point). The thin layer of water on contact surfaces creates capillary bridge and force for gripping/releasing tasks. With presented technique we build 3D microstructures from polystyrene beads (diameters 28–32 μm), and sintered them to obtain rigid form. Sintering was done in specially developed micro furnace with temperature control. Some examples of 3D microstructures are shown in the conclusion.

1 Uvod

Gradnja 3D mikrostruktur z mikro objekti v obliki kroglic v velikosti 3–100 μm zahteva tehnologijo in znanje zanesljivega prenašanja ter povezovanja mikro objektov. Postopek prenašanja poteka v treh operacijah: prijemanje, premikanje in odlaganje mikro objektov. Dosedanja metoda prijemanja/odlaganja temelji na uporabi van der Waals-ove sile [1], kar onemogoča delo s temperaturno in tlačno občutljivimi materiali. V članku je za prijemanje/odlaganje mikro objektov razvit postopek s kombinacijo kapilarne sile in van der Waals-ove sile, kar bo prikazano v nadaljevanju.

Sledi opis principa delovanja obeh metod in teoretični model, opis nano robotske celice, nano preciznega manipulatorja, enoprstnega prijemala, mikro objektov in podpornega materiala. V tretjem poglavju je prikazana gradnja 3D mikrostruktur in sintranje izdelanih mikrostruktur v mikro peči. V zaključku so podane primerjave med metodama, prednosti/slabosti, in možnosti uporabe pri gradnji mikrostruktur, tudi z biološkimi materiali (celice).

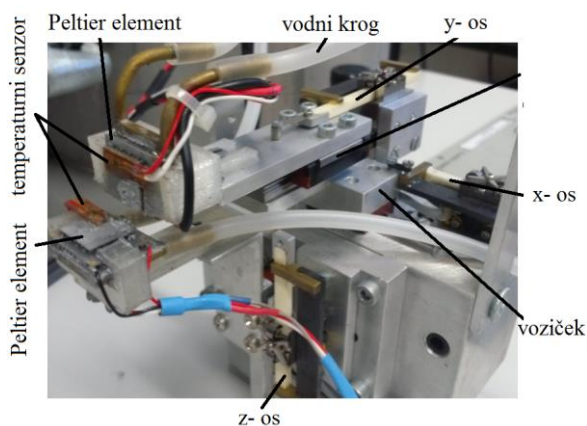
2 Nano precizno prijemanje/odlaganje

Mikrostrukture gradimo v nano robotski celici z nano preciznim manipulatorjem, ki ima nameščeno enoprstno prijemalo. Mikro objekte je možno prenašati z Van der Waals-ovo silo, ki je šibka medmolekulska privlačna sila med molekulami različnih materialov v kontaktu ali zelo blizu (do 100 nm). Sila nastopa med sosednjima molekulama oziroma atomoma zaradi njunih induciranih električnih dipolov. Robni pogoj metode prijemanja/odlaganja z van der Waals-ovo silo je

zahtevan vakuum (tlak pod trojno točko vode) v delovnem prostoru celice, kjer se za prijemanje/odlaganje izkorišča sprememba vodne pare direktno v led in obratno (depozicija/sublimacija). Tvorba ledu zahteva konstantno dodajanje vodne pare v mikro okolico delovnega prostora, za kar je potrebna regulacija tlaka v komori. Pri delu z biološkim materialom temperatura pod lediščem in nizek tlak nista ustrezna delovna pogoja, zato se je postopek prenašanja nadgradil z uporabo kapilarne sile, ki deluje pri normalnem tlaku in temperaturi višji od ledišča.

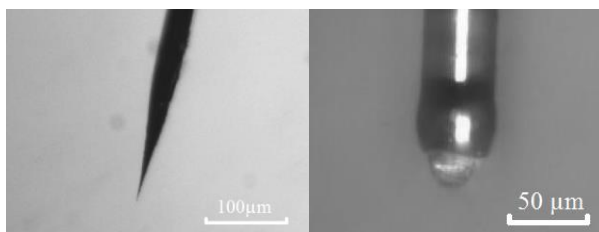
Prenašanje mikro objektov s kapilarno silo je natančno in zanesljivo (zanesljivost odlaganja znaša 0,5 μm), nadzor nad velikostjo sile oziroma mostu pa se kontrolira s hlajenjem/gretjem mikro objektov v lokalni okolici. Velikost kapilarne sile med tekočino in mikro objekti določajo lastnosti okolice (temperatura, relativna vlažnost in tlak), kapljevina (viskoznost, površinska napetost), geometrija mikro objektov (tip, polmer) in drugi vplivi (elektrostatika naboja, kot meniskusa v stiku objektov). Sprememba temperature (ali vlage) vpliva na povečanje/zmanjšanje kapilarnega mostu (meniskus), s čimer se posledično upravlja z razmerjem sil pod in nad mikro objektom kar omogoča postopek prijemanja/odlaganja. Razvita metoda prenašanja s kapilarno silo omogoča gradnjo tudi organskih mikrostruktur. V nasprotju z organskimi (rast, sprijemanje) je potrebno anorganske mikrostrukture po gradnji utrditi, kar je izvedeno s postopkom sintranja.

Omenjena postopka prijemanja/odlaganja sta alternativni dvoprstnim, ali celo triprstnim prijemalom, optičnim pincetam, ki so namenjene premikanju nano objektov z dielektričnimi snovnimi lastnostmi v tekočinskem mediju, itd. [2] Enoprstno prijemalo je del nano preciznega manipulatorja nameščenega v vakuumsko komoro nanorobotske celice. Celotno napravo [1] sestavlja vakuumsko komora, optični mikroskop s kamero, nanoprecizni manipulator (v notranjosti komore), hladilni sistem, sistem za uparjanje vode, vakuumsko črpalka, merilna oprema (senzor tlaka in temperature), čelna plošča in računalnik za vodenje v realnem času. Nano precizni manipulator (slika 1) 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 premika po X (levo/desno) in Y osi (naprej/nazaj) z nameščenim različnim orodjem. Premike omogočajo PiezoLegs linearni motorji nameščeni na vodila posameznih osi manipulatorja, za točnost položaja pa je na vseh motorjih nameščena magnetna inkrementalna lettev.



Slika 1. Nano precizni manipulator z nameščenim prijemalom in podlago

Ponovljivost pozicioniranja znaša v regulacijski zanki ± 61 nm, pri odprtozračnem krmiljenju pa 3,9 nm. Optična ločljivost nameščenega mikroskopa omogoča prenos objektov reda do 1 μm . Konica prijemala (slika 2) je izdelana iz kosa ravne žice (čisto zlato) premera 50 μm , ki se namesti na Peltier glave s pomočjo temperaturno prevodne paste. Spodnji del konice se jedka ali pa nanj nalepi kroglica, odvisno od aplikacije. Polistirenske kroglice, ki so uporabljene za gradnjo so iz podjetja Kisker Biotech GmbH & Co. Steklena podlaga je iz mikroskopskega stekla, ki se ga pred namestitvijo mikro objektov očisti z destilirano vodo ali izopropanolom ter posuši.



Slika 2. Primer konic enoprstnega prijemala pri uporabi van der Waalsovega (levo) ali kapilarnega (desno) principa.

2.1 Enoprstno prijemalo

Princip prijemanja/odlaganja z enoprstnim prijemalom deluje na razmerju sil med podlago in mikro objektom na eni strani, ter mikro objektom in konico (prijemalo) na drugi strani. Kako doseči višjo privlačno silo na eni ali drugi strani pa določa razmerje (kombinacija) sil, ki nastopajo na eni ali drugi strani. Mikro objekti velikosti nad 100 μm so še dovolj težki, da se zaradi gravitacijske sile pri odlaganju odtrgajo od prijemala. Pri manjših mikro objektih pa je lahko neželena kapilarna sila višja od van der Waals-ove sile ali parazitne elektrostatične sile, in odlaganje mikro objektov ni vedno mogoče. Vpliv gravitacijske sile proti kapilarni ali van der Waals-ovi je izenačen pri velikosti mikro objekta približno 100 μm . Z manjšanjem mikro objektov postane vpliv gravitacijske sile zanemarljiv.

Enoprstno prijemalo, ki deluje na van der Waals-ovi sili uporablja led za doseganje večje kontaktne površine med ledom in površino mikro objekta. S spreminjanjem količine ledu na površini se spreminja kontaktna površina med mikro objektom in podlago (spodaj), ter mikro objektom in konico nano preciznega robotskega manipulatorja (zgoraj), kar omogoča spremembo razmerja sil. Slabost prijemala z ledom so pogoji dela v podtlaku in pri temperaturi pod lediščem.

Prijemalo na kapilarni sili pa temelji na vzpostavitvi kapilarnega mostu med mikro objektom in konico/podlago, ki je po teoriji višja od van der Waals-ove sile med istimi objekti v kontaktu. Potrebna kapljevina (vodna vlaga) se med mikro objektom in konico/podlago kondenzira iz okolice (lokalne atmosfere) z ohlajanjem konice/podlage pod temperaturo rosišča. Obratno je izhlapevanje vode izvedeno s segrevanjem konice/podlage s čimer se zagotovi suh kontakt (van der Waals-ova sila).

2.2 Izračun Van der Waals-ove sile v kontaktu in kapilarne sile med mikro objekti.

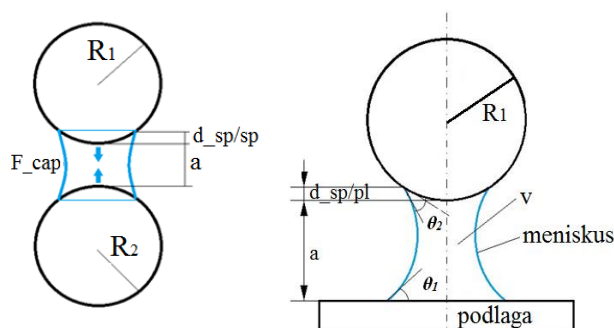
Izračun sile je pogojen z velikostjo, obliko in hrapavostjo mikro objektov, ter t.i. Hamakerjevo konstanto, ki vpliva na velikost privlačne sile. Enačba (1) določa izračun sile med ravno podlago in okroglim mikro objektom, enačba (2) pa izračun sile med dvema okroglima mikro objektoma z različnimi polmeri.

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

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

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 razdaljo med objektoma v stiku. Van der Waals-ova sila med objekti velikosti 10-100 μm v stiku znaša približno 0,1-10 μN .

Kapilarni most med kapljevino in dvema kroglama, oziroma ravno podlago in kroglo prikazuje slika 3.



Slika 3. Kapilarni most (meniskus) med dvema kroglama oziroma med ravno podlago in kroglo.

Izračun kapilarne sile je prikazan z enačbami (3)-(6) in (7)-(8). Enačbe veljajo za izračun kapilarne sile med

kapljevino in dvema krogla, oziroma ravno podlago in kroglo in so povzete po modelih [3], [4].

Izračun kapilarne sile med dvema krogla:

$$F_{cap} = \frac{2\pi R\gamma \cos \theta}{1 + \left(\frac{a}{2d_{sp/sp}}\right)}, \quad (3)$$

Pri čemer se izračunajo:

$$R = \frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2} \quad (4), \quad 2\cos \theta = \cos \theta_1 + \cos \theta_2 \quad (5)$$

$$d_{sp/sp} = \frac{a}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2V}{\pi R a^2}} \right], \quad (6)$$

R_1 in R_2 sta radija okroglih mikro objektov, a je ocenjena razdalja med mikro objektoma (0,5 μm , nista v stiku!), γ predstavlja površinsko napetost vode (74 mN/m), in V je ocenjen volumen (0,2 piko litra) kapilarnega mostu (meniskus), kota θ_1 (20°) in θ_2 (30°) pa ocenjena kontaktna kota kapljevine in mikro objektov. Enačbi (7) in (8) določata izračun kapilarne sile med mikro objektom in ravno podlago.

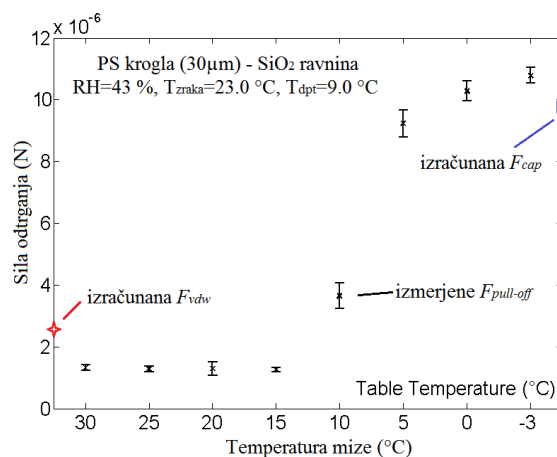
$$F_{cap} = \frac{4\pi R_1\gamma \cos \theta}{1 + \left(\frac{a}{d_{sp/pl}}\right)}, \quad (7)$$

$$d_{sp/pl} = a \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{V}{\pi R_1 a^2}} \right]. \quad (8)$$

Izračuni kažejo, da je velikost kapilarne sile v primerjavi z van der Waals-ovo pri enakih geometrijah mikro objektov lahko tudi za 5-6 krat višja. Meritev Van der Waals-ove sile je bila izvedena pri različnih stopnjah vlažnosti notranjosti nano robotske komore, kar je doseženo z ohlajanjem mize in posledično kondenzacijo vodnih kapljic pod točka rosišča. Meritev temelji na principu ugotavljanja potrebne sile za razdvojitve dveh mikro objektov v kontaktu s pomočjo elastične traverze [5]. Slika 4 prikazuje ujemanje teoretične in izmerjene van der Waals-ove in kapilarne sil za primer krogla – ravnina.

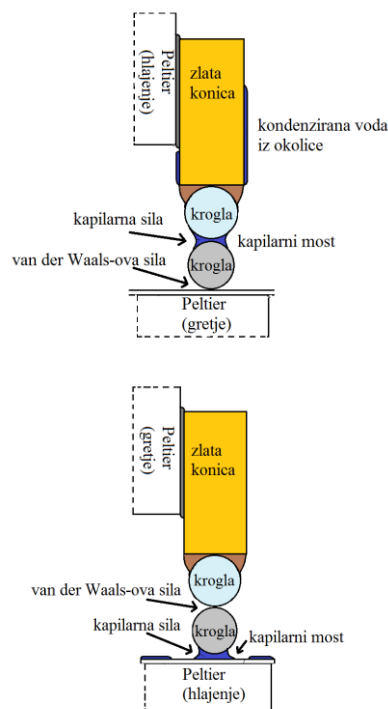
2.3 Princip prijemanja/odlaganja mikro objektov

Prijemanje/odlaganje mikro objektov s kapilarno silo izkorišča tanek sloj kondenzirane vode iz okolice na površini objektov pri tlaku 1 bar. Sloj vode med mikro objekti, konico prijemala ali podlago lahko s spremembo temperature nadzorovano spreminjamo. Temperatura rosišča vode je med 10-20 °C (pri atmosferskem tlaku 1 bar in pri relativni vlažnosti 35-65%) in jo je potrebno pred postopkom prijemanja/odlaganja določiti. Če želimo mikro objekt prijeto je potrebno konico prijemala ohladiti pod temperaturo rosišča, podlago in s tem mikro objekt pa segreti nad temperaturo rosišča. Obratno velja za odlaganje. Temperaturo se regulira s Peltier elementom pod prijemalom in pod podlago.



Slika 4. Izračunana van der Waalsova sila med polistirensko kroglico premera 30 μm in stekleno podlago (zvezdica) znaša 1,3 μN , kapilarna sila (kvadrat) znaša 10,7 μN . Graf prikazuje naraščanje meritve sile med ohlajanjem podlage in mikro objekta (večanje kapilarnega mostu) ter nakazuje približno točko rosišča pri temperaturi 12 °C.

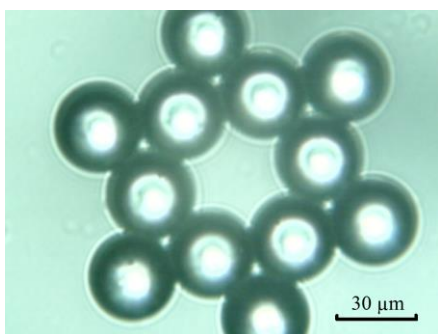
Slika 5 prikazuje fazo prijemanja (zgornja slika) in fazo odlaganja mikro objekta (spodnja slika) s kapilarno silo. V fazi prijemanja se med ohlajeno konico prijemala (nalepljena krogla) in mikro objektom tvori kapilarni most (kapilarna sila), med mikro objektom in segreto podlago pa ne (van der Waals-ova sila). Kapilarna sila je višja od van der Waals-ove sile zato je možno mikro objekt prijeto in prenesti. V fazi odlaganja s segrevanjem konice prijemala vodni most izhlapi, zato deluje med konico prijemala in mikro objektom le van der Waals-ova sila. Ohlajena podlaga omogoča tvorbo kapilarnega mostu med mikro objektom in podlago, kar omogoča odlaganje mikro objekta.



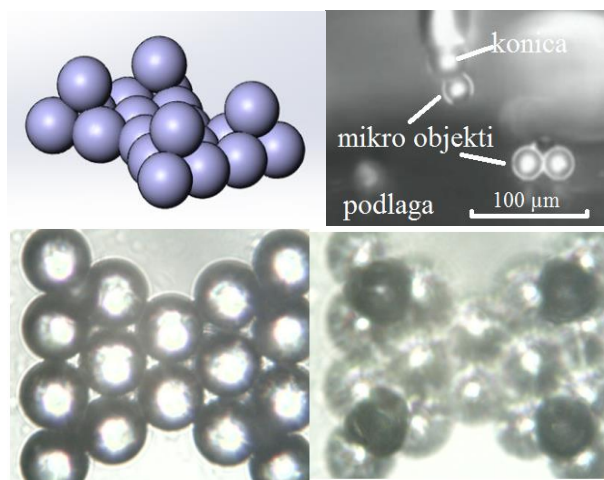
Slika 5. Prijemanje mikro objekta (spodnja krogla) s steklene površine s kapilarno silo (zgornja slika), in odlaganje mikro objekta na stekleno površino s kapilarno silo (spodnja slika).

3 Gradnja 3D mikrostruktur

V nano robotski celici je možno opazovanje in prenašanje mikro objektov, gradnja 3D mikro struktur, meritev van der Waals-ove sile med mikro objekti itd. Kot primer je prikazana gradnja in sintranje enostavnih 3D mikrostruktur (zobnik, podnožje) iz polistirenskih kroglic s pomočjo enoprstnega prijemala in kapilarne sile. Na nivoju mikro mehanike želimo zgraditi mikro pogonski stroj (motor z menjalnikom), ki bo omogočal izdelavo mikro črpalk, pogonov, itd. Osnovna gradnika, ki smo ju izdelali sta zobnik, ki ga sestavlja 12 polistirenskih kroglic (slika 6), in nosilec pogonske gredi iz 16 kroglic (slika 7).



Slika 6. Zgrajen zobnik.

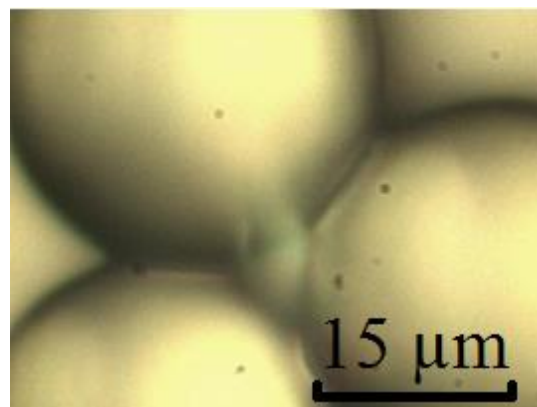


Slika 7. Podnožje pogonske gredi - 3D model, slika gradnje z nano preciznim manipulatorjem v komori, tloris spodnje prve plasti mikrostrukture, in tloris zgornje plasti.

3.1 Sintranje mikrostruktur

S postopkom sintranja (pregrevanja materiala) dosežemo trdnost zgrajenih mikrostruktur iz polistirenskih kroglic. Sintranje poteka v namensko razviti mikro peči in pri ustrezno regulirani temperaturi, dolžina trajanja postopka pa je odvisna od želene trdnosti spojev, našem primeru 5-6 minut pri temperaturi 190 °C. Slika 8 prikazuje dobro sintrane spoje med kroglicami. Razvoj tehnologije sintranja mikrostruktur je potekal eksperimentalno, saj je

temperaturno polje v mikro okolici zelo občutljivo na motnje in vpliva na zahtevano temperaturno območje sintranja. Izbira enovitega postopka sintranja ali postopka po plasteh je odvisna od geometrije mikrostrukture, števila plasti, lokacije na podlagi (sredina, rob) itd.



Slika 8. Dobro sintrani spoji med polistirenskimi kroglicami mikrostrukture.

4 Zaključek

V članku je predstavljen postopek za zanesljivo prijetanje/odlaganje mikro objektov z uporabo enoprstnega prijemala in uporabo kapilarne sile. Največja prednost omenjenega prijemala pred t.i. lednim (van der Waals-ova sila) prijemalom je v natančnosti in zanesljivosti odlaganja mikro objektov, pogoji dela (normalni zračni tlak in temperatura nad lediščem) pa omogočajo prenašanje tudi organskih mikro objektov (biotehnologija). Prikazana je izgradnja 3D mikrostruktur iz polistirenskih kroglic, ki so po končni obliki še sintrane, da zadržijo želeno obliko. Za sintranje se je razvilo namensko peč in tehnologijo. Prvi primeri mikro mehanskih delov pogonskega stroja so že dali obetajoče rezultate kot so vrtenje dveh povezanih zobnikov, motor na osnovi kapilarne sile, itd.

Literatura

- [1] 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, št. 24, str. 1-13, 2014.
- [2] C. Pagano, I. Fassi: Devices and techniques for contact microgripping, Advanced Mechatronics and MEMS Devices, Springer USA, št. 23, str. 165–178, 2012.
- [3] Y. I. Rabinovich s sod.: Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces, I. Role of Asperity Geometry, Journal of Colloid and Interface Science, št. 232, str. 10–16, 2000.
- [4] P. Lambert s sod.: A case study of surface tension gripping: The watch bearing, Journal of micromechanics and microengineering, št. 16, stran 1267, 2006.
- [5] B. Bratina, J. Šafarič: Uporaba nanoprecizne robotske celice za meritev van der Waals-ove sile med mikro objekti, Zbornik Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2016, 2016, Portorož, Slovenija.