

Gradnja mikrostruktur z nanoprecizno robotsko celico

Suzana URAN

Izvleček: Prikazana sta razvoj in zgradba nanoprecizne robotske celice z natančnostjo vodenja vrha robota $\pm 3,9$ nm v odprti položajni zanki oziroma ± 61 nm v zaprti položajni zanki. Uporabljeni piezoelektrični motorji zagotavljajo prostornino delovnega območja robotske celice ok. $1,5 \text{ cm}^3$. Prikazana sta dva postopka prijemanja, premikanja in odlaganja mikroobjektov (steklene ali polistirenske kroglice premera $1\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$): enoprsto prijemalo, osnovano na van der Waalsovi sili, in enoprsto prijemalo, osnovano na kapilarni sili. Prikazani so primeri gradnje enostavnejših mikrostruktur (pokončni trikotnik, 3D-piramida) in bolj zapletena mikrostruktura zobnika premera $150 \text{ }\mu\text{m}$.

Ključne besede: nanoprecizni robot, gradnja mikrostruktur, prijemala za mikroobjekte

1 Uvod

Razvoj področja nano- in mikroizdelave zahteva bazične raziskave na štirih raziskovalnih področjih:

- raziskave postopkov samosestavljanja [1, 2],
- sestavljanje z nanomanipulacijo [3, 4], ki prenaša in sestavlja nano-/mikroobjekte, izdelane s postopki samosestavljanja v kompleksne strukture,
- množično vzporedno sestavljanje in
- razvoj računalniških orodij za nanomehansko načrtovanje.

Ta prispevek se dotika raziskovalnega področja »sestavljanje z nanomanipulacijo« in podrobneje obravnava praktično izgradnjo zanesljivega nanopreciznega 3D-robotskega mehanizma in njegovega podsistema prijemal za objekte v dimenzijskem območju $1\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$, s katerimi bi lahko opravljali gradnjo 3D-mikrostruktur za mikrostroje, MEMS-e (mikroelektromehanske sisteme), mikrozobnike, mikroreduktorje itd. Predstavljena dva različna postopka prijemanja premikanja in odlaganja objektov (eno-

prsto prijemalo, osnovano na van der Waalsovi sili, in enoprsto prijemalo, osnovano na kapilarni sili) sta alternativni drugim postopkom, npr. optičnim pincetam [5], ki so namenjene premikanju nanoobjektov z dielektričnimi snovnimi lastnostmi v tekočinskem mediju. Razvita in aplikativno prikazana postopka prenašanja objektov s pomočjo enoprstih prijemal, osnovanih na van der Waalsovi ali kapilarni sili, sta primerna za objekte velikosti $1\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$ v zraku pri pritisku 1 bar ali vakuumu vse do tlaka $0,1 \text{ mbar}$.

Prenašanje (prijemanje, premikanje, odlaganje) objektov, večjih od $100 \text{ }\mu\text{m}$, ni strokovno zahtevno. Dejansko lahko v teh primerih posnemamo mehanska dvoprsta ali troprsta prijemala iz makrosveta, seveda v skrajno pomanjšani obliki, za motorje pa se uporabljajo piezoelektrični pogoni namesto električnih motorjev. V teh primerih so mikroobjekti še dovolj težki, da se zaradi gravitacijske sile pri odlaganju odtrgajo od prijemala in jih lahko namestimo na odlagalno površino. V splošnem prijemanje in premikanje mikroobjektov ni problematično. Povsem drugačna pa je zgodba, ko imamo opravka z odlaganjem objektov, manjših od $100 \text{ }\mu\text{m}$. V tem primeru zaradi kapilarne sile, ki je posledica kondenzacije vlage iz zraka, van der Waalsove sile, vedno prisotne šibke medmolekularne privlačne sile ali parazitne elektrostatične sile, od-

laganje mikroobjektov na odlagalno površino ni mogoče. Velikost privlačne kapilarne ali van der Waalsove sile med objektom in prijemalom preseže gravitacijsko silo objekta, kadar so objekti manjši od ok. $100 \text{ }\mu\text{m}$, ali po iznosu preseže gravitacijsko silo za nekaj 100-krat, kadar imamo opravka z objekti velikosti okoli $1\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$.

Našteti problemi pri odlaganju so v zadnjem desetletju vodili do razvoja množice postopkov odlaganja objektov (nanospajkanje, nanovarjenje, dielektroforeza, lepljenje objekta na površino, sintranje ...) [4, 5, 6, 7]. Vse te metode delujejo za posamezne materiale ali oblike objektov in še vedno potrebujejo gravitacijsko silo za odlaganje objektov. Posebne rešitve predstavljajo enoprsta ledna prijemala, ki delujejo na principu mehanske sklopljenosti med ledom, ki primrzne in zaobjame mikroobjekt v vodnem mediju [8] ali v zraku [9]. Njihov glavni problem je nezanesljivo in natančno odlaganje, kar velja tudi za postopke odlaganja z inercijsko silo (vibracijo konice enoprstega prijemala) ali pnevmatsko silo [10, 11, 12].

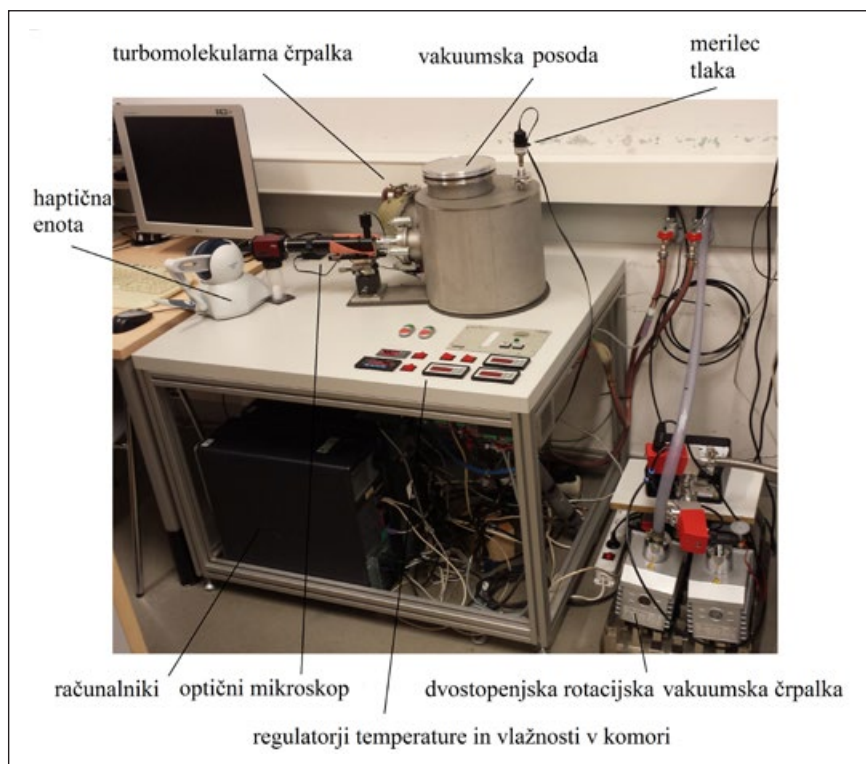
V članku predstavljena postopka enoprstih prijemal sta izjemno primerna za objekte dimenzij $1\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$ in sta neobčutiljiva na obliko in material objekta. Vse aplikacije gradnje 2D- in 3D-objektov, predstavljene v tem članku, so bile opravljene s tema dve-

Doc. dr. Suzana Uran, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

ma enoprstima prijemaloma, ki zagotavljata zanesljivo odlaganje (skoraj 100 % odlaganj kroglastih objektov je opravljenih brez problemov) in natančno odlaganje, kjer je bila napaka pri odlaganju manjša od $0,5 \mu\text{m}$. Mikroobjekti, s katerimi smo gradili mikrostrukture, so imeli kroglasto obliko s premerom $30\text{--}50 \mu\text{m}$, materiala sta bila steklo ali polistiren.

■ 2 3D-nanoprecizna robotska celica

Robotska celica je predstavljena na *sliki 1*. Sestavljajo jo: 3D-nanoprecizni manipulator, podsistem enoprstega prijemala, krmilnik robotske celice, vakuumska posoda, vakuumska in turbomolekularna črpalka, podsistem za regulacijo temperature, vlažnosti in tlaka v vakuumski posodi, sistem hlajenja in optični mikroskop. 3D-nanoprecizni manipulator (glej *slika 2*) je nameščen v vakuumski posodi in je tako zaščiten pred prašnimi delci, ki lebdiijo v zraku. S pomočjo dveh zaporednih vakuumskih črpalk v vakuumski posodi reguliramo tlak v območju od $1 \mu\text{bar}$ do 1bar in relativno vlažnost v območju od 10 % do 90 %. Dvostopenjska vakuumska rotacijska črpalka lahko zniža tlak v vakuumski posodi od 1bar do 1mbar . Tej dvostopenjski vakuumski črpalki je zaporedno vezana turbomolekularna črpalka, ki lahko še dodatno zniža tlak v vakuumski posodi za faktor 1000-krat, vse do tlaka $1 \mu\text{bar}$. Tlak na celotnem omenjenem območju reguliramo s proporcionalno-integrirno-diferencirnim (PID) regulatorjem tlaka, vlažnost pa s PID-regulatorjem temperature Peltierjevih elementov. Peltierjevi elementi hladijo ali grejejo zrak v neposredni okolici prijemala. Skozi okence vakuumske posode opazujemo vrh prijemala in mikroobjekte s pomočjo optičnega mikroskopa z žariščno razdaljo leče 21mm . To nam omogoča opazovanje objektov večjih od $2 \mu\text{m}$. Dva računalnika, povezana v mrežo, s pomočjo FPGA-karte NI-PCI7356 proizvajalca National Instruments in z aplikacijo programa LabView skrbita za krmiljenje in regulacijo položaja posameznih osi manipulatorja s časom tipanja $1 \mu\text{s}$. Piezo koračni modul TCMC-090 služi kot krmilnik piezoelektričnih motorjev za



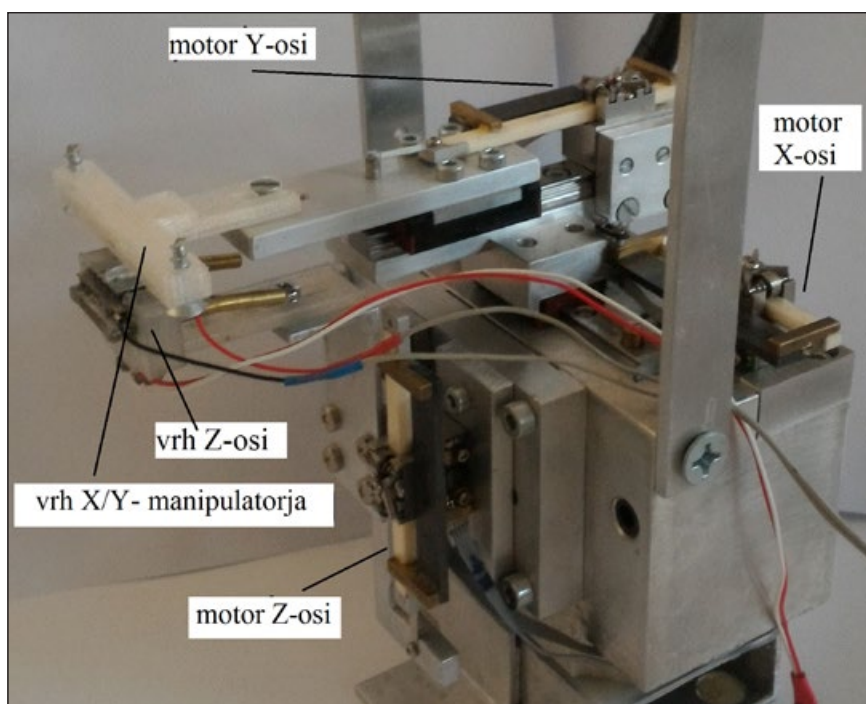
Slika 1. Zgradba nanoprecizne robotske celice

X-, Y- in Z-os (glej *slika 2*). Oboje je izdelalo podjetje PiezoLEGS.

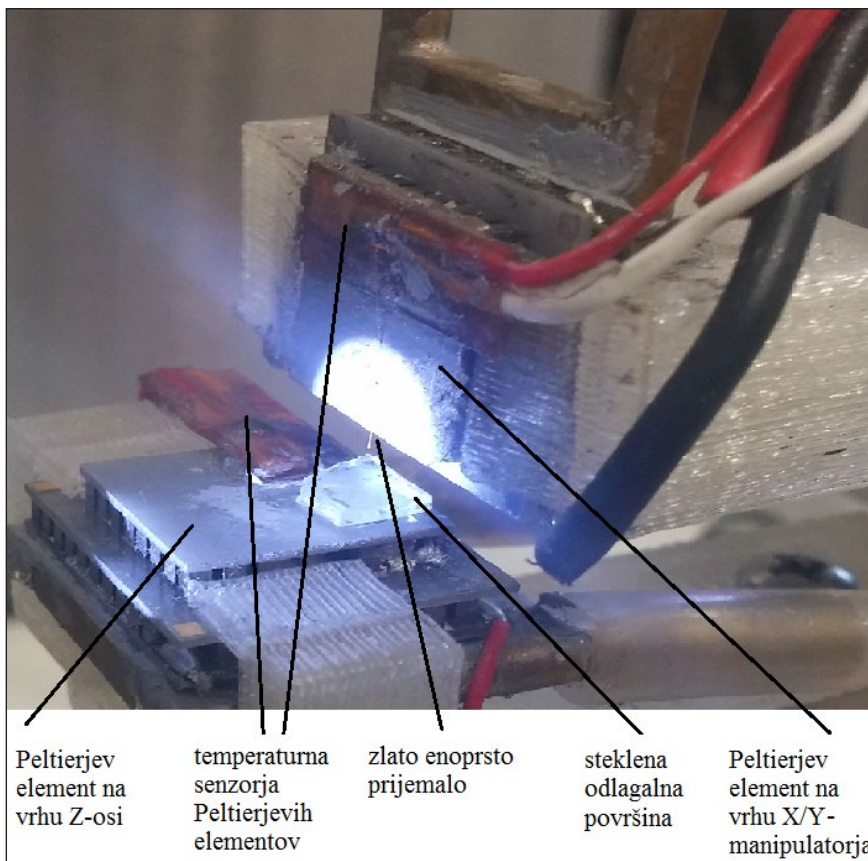
■ 2.1 Mehanizem 3D-nanopreciznega manipulatorja

Odločili smo se za zasnovo X/Y-manipulatorja, podprtega z eno

podajalno mizico, ki deluje v smeri Z-osi. Sama izvedba manipulatorja je izvedena fleksibilno in omogoča implementacijo različnih orodij na vrhu X/Y-manipulatorja. *Slika 2* pa prikazuje primer zgradbe laboratorijskega 3D-nanopreciznega manipulatorja s ponovljivostjo nastavljanja položaja v nanoobmočju in z natančnostjo vodenja vrha ro-



Slika 2. 3D-nanoprecizni manipulator



Slika 3. Podsystem enoprstega prijemala

bota $\pm 3,9$ nm v odprti položajni zanki oziroma ± 61 nm v zaprti položajni zanki. Delovno območje vrha nanopreciznega manipulatorja je okoli $1,5 \text{ cm}^3$ (10 mm x 10 mm x 15 mm).

Dva motorja, skupaj z magnetnima linearnima inkrementalnima dajalnikoma, sta pritrjena na osnovno aluminijasto ohišje. Izjema je motor Y-osi, ki je pritrjen na pomični voziček linearnega vodila X-osi. Motorja X-osi in Y-osi tvorita X/Y-manipulator in sta orientirana pravokotno drug na drugega in med sabo povezana z elastičnim sklepom. Bolj podroben prikaz načrtovanja, izdelave in delovanja nanoprecizne robotske celice je podan v [13, 14].

2.2 Podsystem enoprstega prijemala

Podsystem enoprstega prijemala je razdeljen na dva dela. Prvi del je na vrhu X/Y-manipulatorja in vsebuje nosilec za dvostopenjski Peltierjev element, hladilnik ter enoprsto prijemalo (zlata žička). Medtem ko je

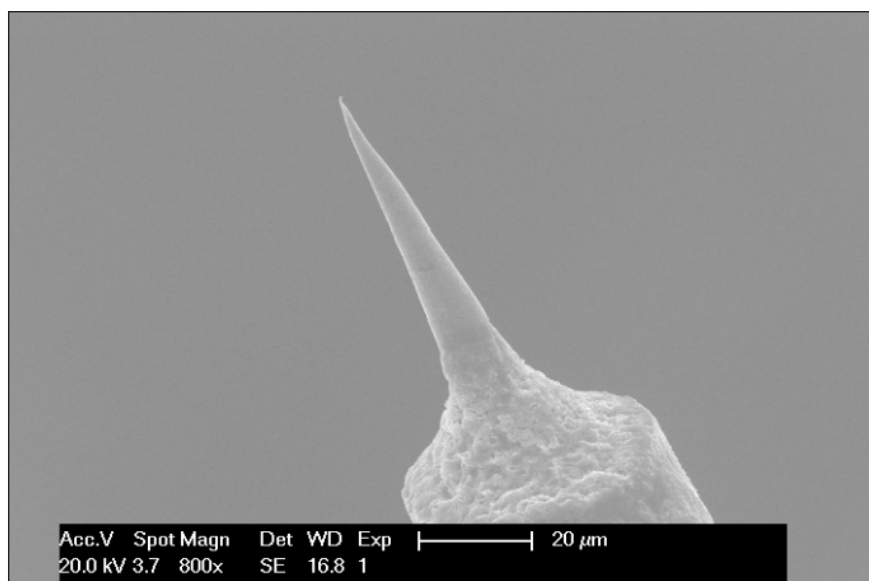
drugi del na vrhu Z-osi manipulatorja in vsebuje dvostopenjski Peltierjev element, hladilnik ter stekleno odlagalno površino (glej *sliki 2 in 3*). Oba Peltierjeva elementa sta hlajena na vroči strani s hladilnikoma sekundarnega hladilnega kroga. Temperatura vode v sekundarnem hladilnem krogu se ves čas vzdržuje

z regulatorjem primarnega hladilnega kroga na ok. $2-3 \text{ }^\circ\text{C}$. PID-regulatorja temperature pa hladno stran Peltierjevih elementov regulirata na temperaturo od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ na $1 \text{ }^\circ\text{C}$ natančno. Natančno in hitro nastavljena temperatura Peltierjevih elementov je bistven parameter obeh enoprstih postopkov prijemanja (osnovanega na van der Waalsovi ali kapilarni sili), ki omogoča kvalitetno in učinkovito delovanje obeh enoprstih prijemal.

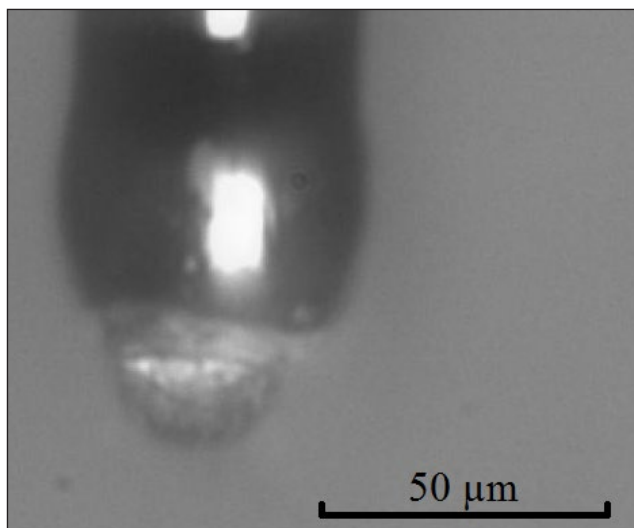
2.3 Izdelava enoprstih prijemal

Enoprsto prijemalo je izdelano iz zlata žičke s premerom $50 \text{ }\mu\text{m}$. Zlata žička je bila uporabljena zato, ker ima zelo velik koeficient toplotne prevodnosti (318 W/mK) in ne korodira.

Zlata žička enoprstega prijemala, osnovanega na van der Waalsovi sili, ima na spodnjem koncu ostro konico. Konica se izdelava s postopkom elektrokemičnega jedkanja, opisanega v [15]. Raztopina, ki se uporabi za jedkanje konic iz zlata, je v razmerju solna kislina : vodikov peroksid : destilirana voda ($3 : 1 : 1,5$). Žička iz zlata je objeta z raztopino v obliki membrane, ki z vseh strani s časom najeda površino žičke. Dinamika jedkanja je odvisna od raztopine, velikosti toka, čistosti mate-



Slika 4. Ostra konica s premerom sto nanometrov, izdelana iz zlata žičke s premerom $50 \text{ }\mu\text{m}$ in slikana z elektronskim mikroskopom (SEM)



Slika 5. Na spodnji konec zlata žičke prilepljena steklena kroglica

rialov, temperature itd. Jedkanje je nadzorovano in poteka nekaj minut, dokler spodnji del jedkane žičke ne odpade. Končni premer konice lahko znaša od le nekaj sto nanometrov do nekaj mikrometrov. Bolj kot je konica prijemala ostra, lažje je odlaganje mikroobjektov. Konico je potrebno pred vpetjem preveriti z elektronskim mikroskopom (SEM). Primer dobro jedkane konice, za enoprsto prijemalo, osnovano na van der Waalsovi sili, je na *sliki 4*.

V primeru izdelave konice za prenašanje mikroobjektov s kapilarno silo je potrebno na ravno odrezan del zlata žičke prilepiti stekleno ali polistirensko mikrokroglico ustreznih dimenzij (premera 20–30 μm). Zlata žička se z zgornjim delom pritrdi na Peltierjev element na vrhu X/Y-manipulatorja, spodnji odrezani konec žičke pa se potopi v kapljico lepila na stekleni odlagalni površini. Pri tem ostane na spodnjem delu žičke del lepila, v katero nalepimo mikrokroglico. Pritrditev je odvisna od materiala in vrste lepila. Uporabimo dvokomponentno lepilo za polistirenske kroglice ali UV-lepilo za steklene kroglice. Primer prilepljene steklene kroglice na zlato žičko prikazuje *slika 5*.

■ 2.4 Mikroobjekti

Pri delu smo uporabili steklene (SiO_2) kroglice (amorfná struktura) s premerom 2–10 μm , 10–30

μm in 50–100 μm proizvajalca PolySciences, Inc. (Warminster, PA, ZDA). Polistirenske kroglice premera 30–40 μm je proizvedel Kisker Biotech GmbH & Co. KG (Steinfurt, Nemčija). Prijemalo je narejeno iz zlata žičke (Premion 99,995%) s premerom 50 μm , proizvajalec Alfa Aesar GmbH & Co. KG (Karlsruhe, Nemčija).

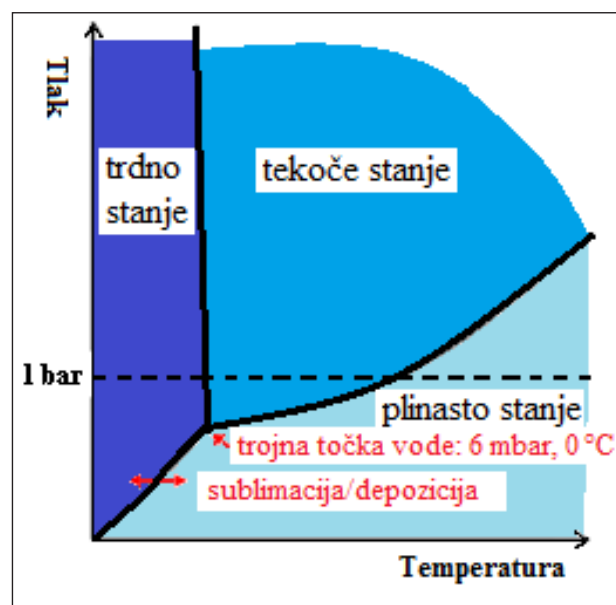
■ 3 Prenášanje mikroobjektov z enoprstim prijemalom

Mikroobjekte je možno prenašati z enoprstim prijemalom na osnovi van der Waalsove sile ali kapilarne sile ter jih sestaviti v mikrostrukturo. Pri tem med mikroobjekti, prijemalom, stekleno odlagalno površino in okolico nastopajo sile z različnimi vplivi glede na geometrijo mikroobjektov, strukturo in površino materialov, elektrokemijske vezi, atmosfero, čistost itd.

■ 3.1 Enoprsto prijemalo, osnovano na van der Waalsovi sili

Enoprsto prijemalo na osnovi van der Waalsove sile izkorišča privlačno silo, ki nastane med molekulami različnih materialov, ki so zelo blizu (do razdalje 100 nm) ali v kontaktu. Različni pari materialov, ki nastopajo v kontaktu, imajo različne t.i. Hamakerjeve konstante, ki vplivajo na velikost privlačne sile. Tako je privlačna sila idealnega stika zlata in stekla

v vakuumu večja kot stekla in ledu, stekla in stekla itd. Zaradi različnih kristalnih struktur, nano- in mikrohrapavosti in deformacij površine materialov je pomembno poznavanje kvalitete stika. Že želimo vplivati (povečati/zmanjšati) na privlačno silo med materiali, je pri enaki Hamakerjevi konstanti potrebno povečati/zmanjšati stično površino oziroma količino stikov. To lahko izvedemo s povečanjem površine ledu na prijemalu (jedkana zlata žička). Za tvorjenje in spreminjanje površine ledu na prijemalu je uporabljen znan princip fizikalnega učinka H_2O depozicije ali sublimacije pod t. i. trojno točko v diagramu vode pritisk/temperatura (6 mbar, 0 $^{\circ}\text{C}$) [6] (glej *slika 6*). Sublimacija je fizikalni proces, pri katerem se trdni material spremeni v plinastega ob dodajanju toplotne energije brez vmesne tekočinske faze; pri obratnem procesu depozicije pa se material iz plinastega stanja spreminja v trdno stanje, spet brez vmesnega kapljevinastega stanja. Glede na ta učinek se depozicija kristala H_2O (ledu) prične, ko je pritisk hlapov H_2O okoli konice prijemala manjši od 6 mbar in temperatura konice prijemala manjša od 0 $^{\circ}\text{C}$. Velja tudi obratno: če se temperatura konice nekoliko poveča čez 0 $^{\circ}\text{C}$, kristal H_2O na konici sublimira v hlapo. Hitrost rasti kristalne plasti H_2O okoli konice enoprstega prijemala lahko krmilimo z natančno nastavljenimi vrednostmi pritiska in



Slika 6. Fazni diagram H_2O

temperature v vakuumski posodi od debeline plasti kristala nič do nekaj nm ali pa nekaj μm v samo 4–6 sekundah. Seveda velja, če je plast kristala H_2O tanjša, tedaj je za rast kristala potreben krajši čas. Slika 7 a prikazuje konec depozijskega procesa, ko je kontaktna površina med konico, obloženo z ledom, in objektom večja od kontaktne površine med objektom in odlagalno površino. Zaradi tega je van der Waalsova sila med prijemalom, obloženim z ledom, in objektom večja od van

der Waalsove sile med objektom in odlagalno površino in je prijemanje objekta na prijemalo izvedljivo.

Slika 7 b pa kaže sublimacijsko fazo, v kateri je objekt odložen s konice enoprstega prijemala na odlagalno površino. V tem primeru je van der Waalsova sila med odlagalno površino in objektom večja od van der Waalsove sile med objektom in ostro konico enoprstega prijemala, zato je odlaganje objekta na odlagalno površino izvedljivo.

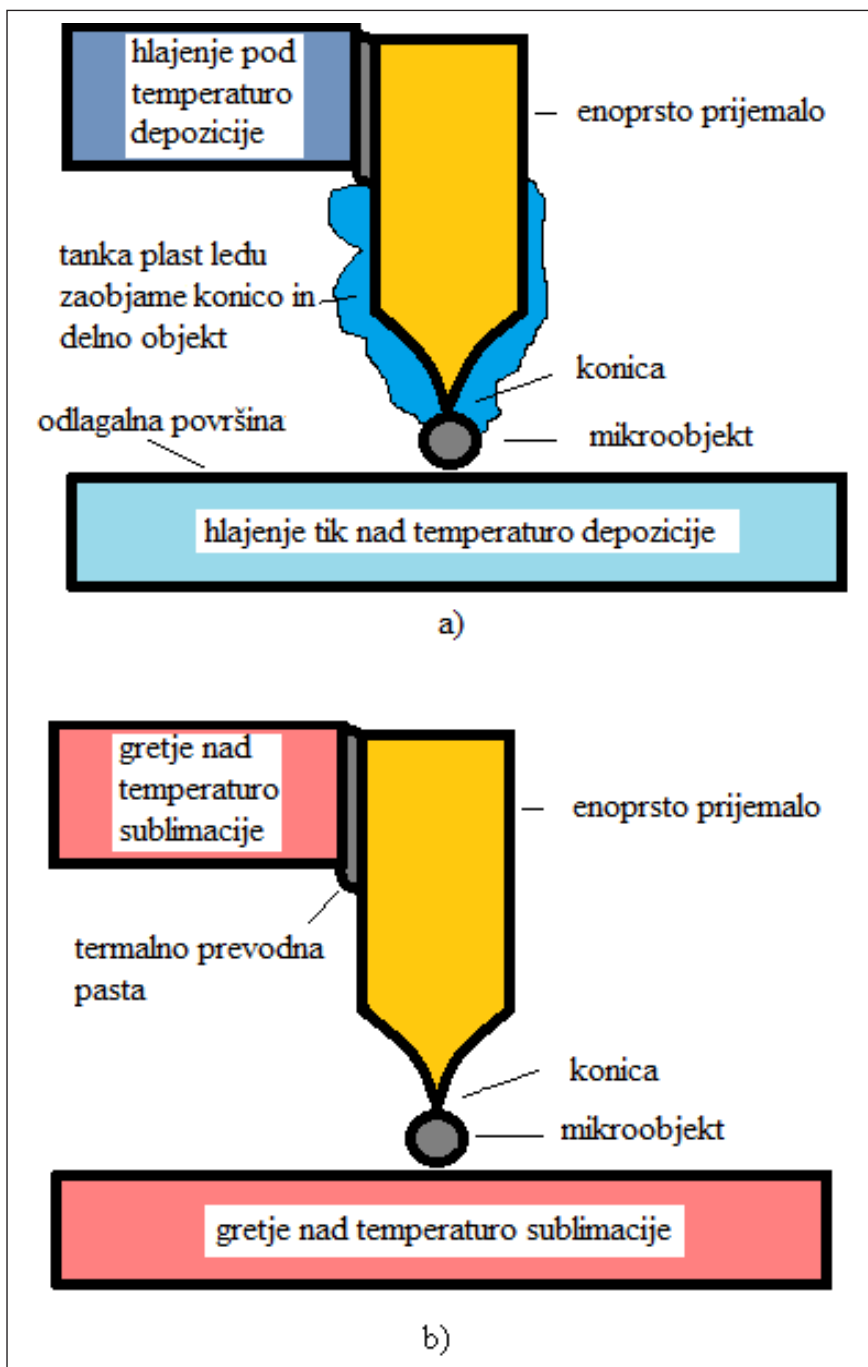
3.2 Enoprsto prijemalo, osnovano na kapilarni sili

Uporaba kapilarne sile pod nadzorovanimi okoljskimi vplivi omogoča natančno in zanesljivo prenašanje mikroobjektov. Velikost kapilarne sile med tekočino in objekti določajo lastnosti tekočine (viskoznost, površinska napetost), okoljski parametri (temperatura, relativna vlažnost in tlak), površina objektov, določena z geometrijo (polmer ukrivljenosti, dimenzij in hrapavost), in elektrokemijski vplivi (elektrostatični naboj, kot meniskusa v stiku objektov). S pomočjo spremembe površine in temperature (vlage) je mogoče velikost meniskusa in kapilarne sile spreminjati ter posledično vplivati na postopek prijemanja oz. odlaganja mikroobjektov.

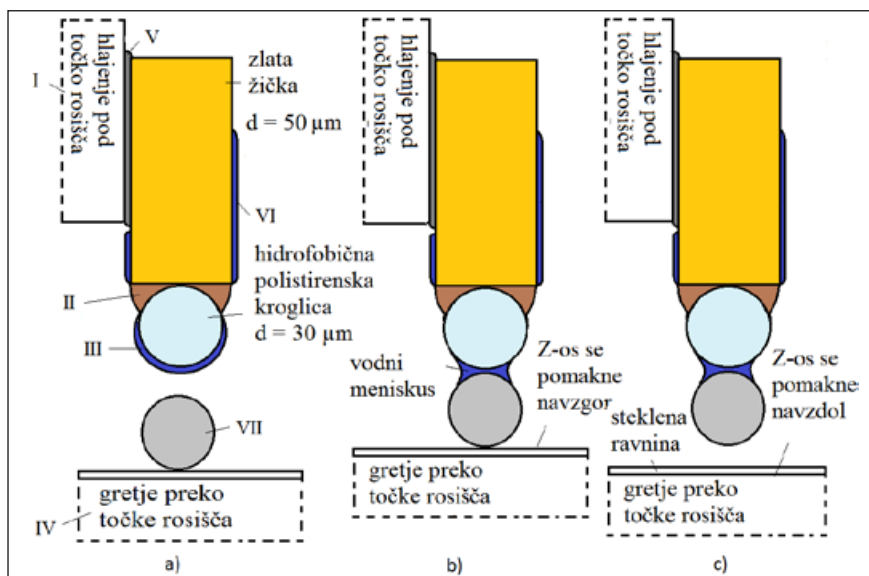
Postopek prijemanja in odlaganja s kapilarno silo

Postopek prijemanja in odlaganja s kapilarno silo deluje na podlagi ustvarjenega tankega sloja kondenzirane vode iz okolice na površini objektov pri tlaku 1 bar. Sloj vode se s pomočjo temperature nadzorovano tvori med mikroobjekti in konico enoprstega prijemala ali med mikroobjekti in stekleno odlagalno površino. Sloj vode se kondenzira v 1–2 s za predmete s premerom 10–50 μm , potem ko se temperatura objekta zniža pod temperaturo rosišča v vakuumski posodi. Temperatura rosišča vode je med 10–20 $^{\circ}\text{C}$ pri normalnem atmosferskem tlaku 1 bar in pri relativni vlažnosti 30–60 %.

Pred postopkom prenašanja mikroobjektov s kapilarno silo je potrebno določiti točko rosišča v vakuumski posodi, saj se ta zaradi okoljskih vplivov (temperatura, vlaga) in dolžine konice spreminja. Običajno je temperaturo rosišča potrebno določiti enkrat dnevno. Postopek določitve poteka tako, da po korakih zmanjšujemo temperaturo konice oziroma odlagalne površine (spodnja steklena površina), dokler ne dosežemo zanesljivega prijemanja/odlaganja mikroobjektov. Pred prijemanjem/odlaganjem sta tempera-



Slika 7. a) prijemanje in b) aktivno odlaganje objekta s postopkom depozi- cije/sublimacije



Slika 8. Postopek prijemanja s pomočjo kapilarne sile. Opombe: I – Peltierjev element na vrhu X/Y-manipulatorja, II – hidrofobično lepilo, III – tanka plast kondenzirane vode na konici, IV – Peltierjev element na Z-osi, V – termalno prevodna pasta, VI – tanka plast kondenzirane vode, VII – mikroobjekt

turi konice in površine za prijemanje oziroma odlaganje običajno podobni. Če torej želimo objekt prijeti, je potrebno konico ohladiti na temperaturo pod temperaturo rosišča, odlagalno površino in s tem mikroobjekt pa segreti nad temperaturo rosišča. Obratno velja za odlaganje.

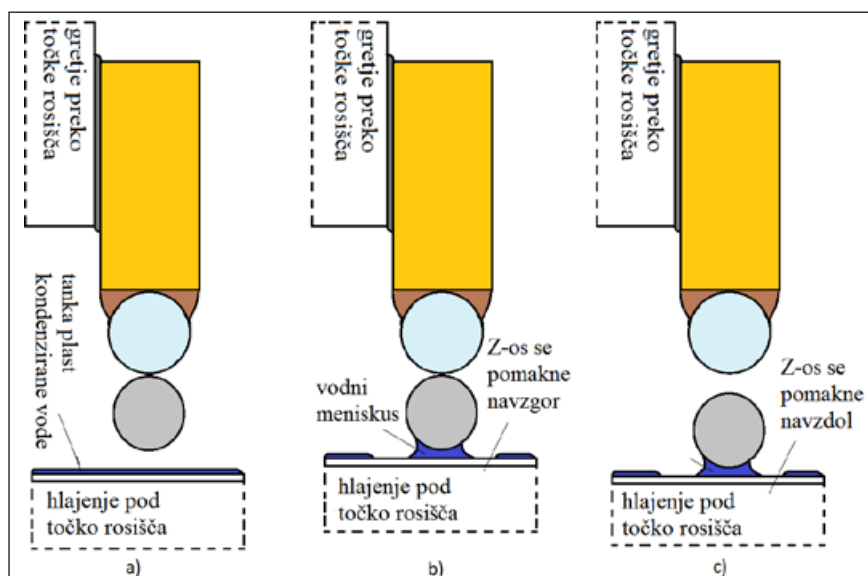
Postopek prijemanja je opisan v naslednjih korakih:

- Temperatura konice (Peltierjev element na vrhu X/Y-manipulatorja) se zniža pod temperaturo rosišča. To ustvari tanko plast kondenzirane vode na prijemalu in konici (kroglica) v približno 2–3 sekundah (slika 8 a).
- Konica s tanko plastjo vode se premakne nad mikroobjekt in se ga s konico dotakne. To povzroči tvorbo meniskusa vode in kapilarno silo med konico in mikroobjektom (slika 8 b). Spodnjo stran objekta (steklena odlagalna površina) smo segreti (Peltierjev element na Z-osi) do temperature, ki je nekoliko višja od rosišča, dokler voda pod mikroobjektom ne izhlapi in ostane le van der Waalsova sila med mikroobjektom in spodnjo stekleno odlagalno površino.
- Kapilarna sila med mikroobjektom in konico je tako večja od van der Waalsove sile med stekleno odlagalno površino in

mikroobjektom. To omogoča zanesljivo prijetje mikroobjekta na konico med premikom Z-osi navzdol (slika 8 c).

Postopek odlaganja je opisan v naslednjih korakih:

- Temperatura konice (Peltierjev element na vrhu X/Y-manipulatorja) se poveča tako, da je temperatura konice prijemala nad temperaturo rosišča. Voda meniskusa izhlapi v času 2–3 sekunde (slika 9 a). Pri tem ostane edina privlačna sila med mikroobjektom in konico le van der Waalsova sila.

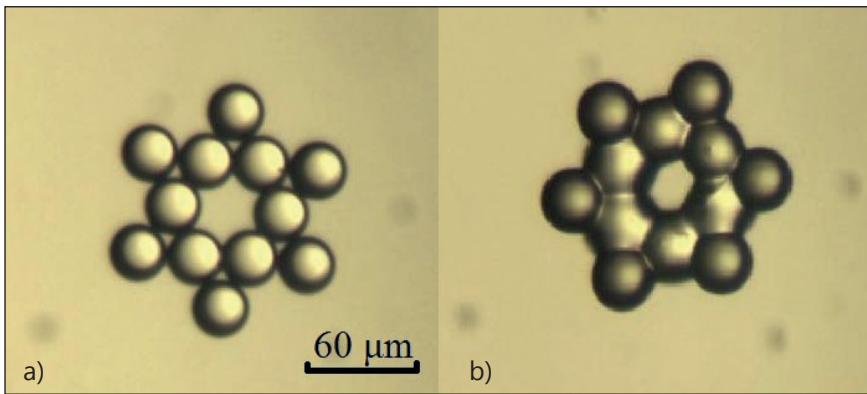


Slika 9. Postopek odlaganja s pomočjo kapilarne sile

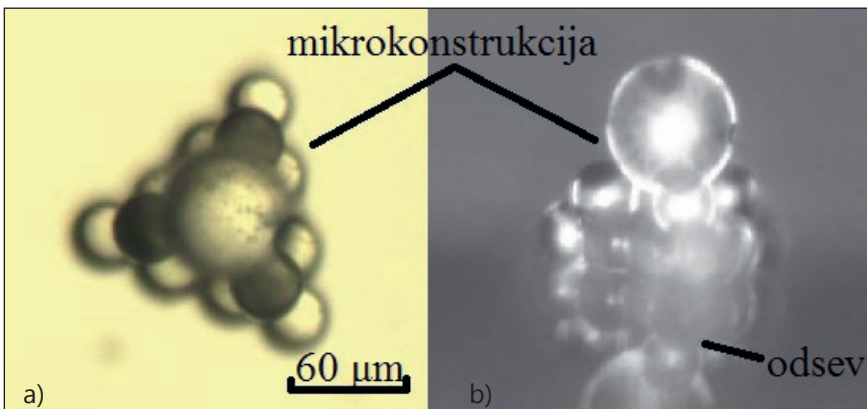
- Temperatura steklene odlagalne površine (Peltierjev element na vrhu Z-osi) se zmanjša pod temperaturo točke rosišča v času 2–3 sekunde, kar povzroči tvorbo tankega sloja kondenzirane vode iz okoliškega zraka pri tlaku 1 bar. Stekleno odlagalno površino s slojem vode premaknemo pod mikroobjekt. Nato z Z-osjo dvigujemo odlagalno površino, dokler se z odlagalno površino rahlo ne dotaknemo objekta, prijetega na konici. Ob stiku objekta in odlagalne površine se takoj ustvari meniskus vode med mikroobjektom in stekleno odlagalno površino (slika 9 b).
- Nato se steklena odlagalna površina (Z-os) premakne navzdol in mikroobjekt ostane na površini odlagalnega stekla (slika 9 c), ker je kapilarna sila med stekleno odlagalno površino in mikroobjektom večja kot van der Waalsova sila med konico prijemala in mikroobjektom.

■ 4 Primeri uporabe

V okviru razvoja enoprstega prijemala smo preizkušali postopka prijemanja/odlaganja z van der Waalovo in kapilarno silo ter kombinacije obeh. Prenašanje objektov večinoma ni bilo problematično pri nobeni metodi, razen v primeru nečistoč, površinskih deformacij mikroobjektov ali nepredvidljivih vplivov (parazitna elektrostatika).



Slika 10. Zobnik premera $150\ \mu\text{m}$, zgrajen iz polistirenskih kroglic premera $30\ \mu\text{m}$ s pomočjo enoprstega prijemala na osnovi kapilarne sile



Slika 11. Podnožje v dveh plasteh, zgrajeno iz polistirenskih kroglic premera $30\ \mu\text{m}$, na katerem leži steklena kroglica s premerom $60\ \mu\text{m}$, narejeno z enoprstim prijemalom na osnovi van der Waalsove sile: a) pogled od zgoraj; b) pogled od strani.

Običajno smo gradili mikrostrukture iz polistirenskih kroglic, ki so bile po končni gradnji sintrane v mikropeči. Postopek sintranja poteka 6–7 minut pri temperaturi zraka $190\ ^\circ\text{C}$. Občasno lahko nehomogeno temperaturno polje v notranjosti peči povzroči lokalno pregrevanje/podhlajevanje mikroobjekta in material je lahko preveč ali premalo sprjet. Nekaj aplikacij sestavljanja 3D-mikrostruktur je prikazanih na slikah 10, 11 in 12.

Zobniški prenosi so zanimivi za izdelavo mikrostrojev. Mikrostruktura zobnika in os kot elementa mehanskih prenosov omogočata gradnjo zahtevnih miniaturnih sistemov. Slika 10 a prikazuje zobnik, sestavljen s pomočjo prijemala, osnovanega na kapilarni sili, in primer sintranja zobnika na sliki 10 b.

Za potrebe testiranja trdnosti podpornih mikrokonstrukcij smo zgradili tristrano prodnožje iz 13 poli-

stirenskih kroglic, ki nosi veliko stekleno kroglico. Učinek kapilarne sile se uporablja tudi za poravnavo in stabilizacijo kroglic (Slika 11) v isti plasti med gradnjo, saj voda veže kroglice med sabo.

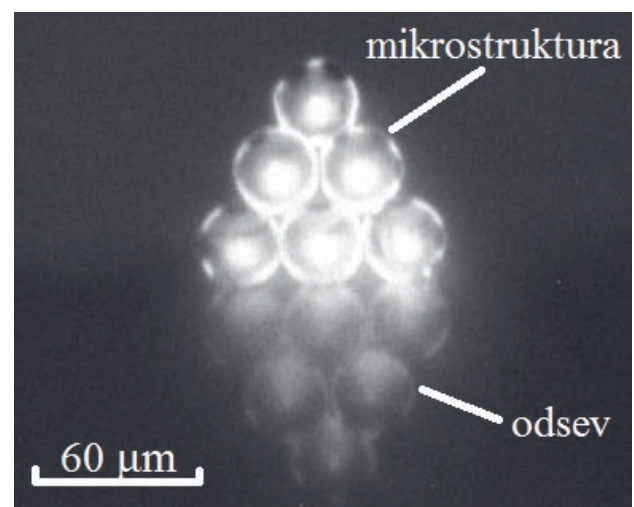
Primer gradnje v višino je na sliki 12, kjer je pokončni trikotnik sestavljen s prijemalom, osnovanim na kapilarni sili. Gradnja v višino brez vmesnega sintranja plasti je zaradi vodnih spojev v praksi izvedljiva le za nekaj nivojev. V tem primeru je potrebno uporabiti prijemalo in postopek, osnovan na van der Waalsovi sili, saj je privlačna sila zaradi Hama-

kerjeve konstante med materiali v vakuumu večja kot v vodi.

5 Zaključek

Članek prikazuje načrtovanje in zgradbo nanoprecizne robotske celice in delovanje dveh enoprstih prijemal (enoprsto prijemalo, osnovano na van der Waalsovi sili ali kapilarni sili) mikroobjektov. Obe prijemali sta plod originalnega raziskovalnega dela v Laboratoriju za kognitivne sisteme v mehatroniki na Univerzi v Mariboru. Razloženi so osnovni problemi prijemanja in odlaganja mikroobjektov z dimenzijami med $1\text{--}100\ \mu\text{m}$. V nekajletni praksi laboratorijskega prenašanja mikroobjektov in gradnje mikrostruktur iz teh objektov se je pokazalo, da imata obe v članku predstavljeni prijemali bistvene prednosti pred primerjanimi prijemali, kot so dvoprsta ali pnevmatska prijemala za mikroobjekte, ki uporabljajo gravitacijsko silo ali inercialno silo za odlaganje objekta.

Prednost van der Waalsove sile je v možnosti gradnje v višino, saj ostajajo spodnji sloji trdni, pri kapilarni sili pa zaradi vodnih meniskusov niso. Prednost prijemala, osnovanega na kapilarni sili, pa je v hitrosti, saj je tvorba tankega sloja vode pri atmosferskem tlaku 1 bar hitrejša kot tvorba ledu na konici prijemala (postopek, osnovan na van der Waalsovi sili) pri tlaku $100\ \mu\text{bar}$.



Slika 12. Pokončni trikotnik iz polistirenskih kroglic dimenzije $30\ \mu\text{m}$, narejen z enoprstim prijemalom, osnovanim na kapilarni sili

Literatura

- [1] Eigler Donald, M. in Schweizer, E. K. 1990 Positioning single atoms with scanning tunnelling microscope, *Nature*, št. 344, str. 524–526.
- [2] Custance, Oscar et al. 2009. Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation, *Nature nanotechnology*, št. 4, str. 803–810.
- [3] Fukuda, Toshio et al. 2003. Assembly of nanodevices with carbon nanotubes through nanorobotic manipulations, *Proc. of the IEEE, Special Issue on Nanoelectronics and Nanoprocessing*, št. 91, pp. 1803–1818.
- [4] Wich, Thomas in Huslen, Helge. 2008. Robot-based Automated Nanohandling. In Fatikow, S., Editor, *Automated Nanohandling by Microrobots*, Springer-Verlag, str. 23–54.
- [5] Weir, Nathan A., et al. 2005. Review of Research in the Field of Nanorobotics, Sandia report, SAND2005-6808.
- [6] Dejeu, Jerome et al. 2011. Adhesion Control for Micro- and Nanomanipulation, *ACS Nano*, št. 5, str. 4648–4657.
- [7] Lambert, Pierre. 2007. *Capillary Forces in Microassembly*, Springer, str. 121.
- [8] López-Walle, Beatriz et al. 2010. Dynamic modelling for a submerged freeze microgripper using thermal networks, *J. Micromech. Microeng.*, št. 20, str. 237–246.
- [9] Liu, Jing et al. 2004. Freeze tweezer to manipulate mini/micro objects, *J. Micromech. Microeng.*, št. 14, str. 269–276.
- [10] Fan, Zenghua et al. 2015. A single-probe capillary microgripper induced by dropwise condensation and inertial release, *J. Micromech. Microeng.*, št. 25, 115011.
- [11] Fan, Zenghua et al. 2015. Dropwise condensation on a hydrophobic probe-tip for manipulating micro-objects, *Appl. Phys. Lett.*, št. 106, 084105.
- [12] Rong, Weibin et al. 2014. A vacuum microgripping tool with integrated vibration releasing capability, *Rev. Scient. Instr.*, št. 85, 085002.
- [13] Šafarič, Riko in Lukman, David. 2014. One-finger gripper based on the variable van der Waals force used for a single nano/micro-sized object, *J. Micromech. Microeng.*, št. 24, 085012.
- [14] Škorc, Gregor in Šafarič, Riko. 2012. Adaptive Positioning Of MemS Production System With Nano-Resolution, *Intell. Autom. Soft Comp.*, št. 18, str. 381–398.
- [15] Kulawik, M, et al. 2003. A double lamellae dropoff etching procedure for tungsten tips attached to tuning fork atomic force microscopy/scanning tunneling microscopy sensors, *Review of Scientific Instruments*, št. 74, str. 1027–1030.
- [16] Sears, Mark W. in Zemansky, Francis W. 1963. *University Physics, Third Edition-Complete*, Addison-Wesley Publishing Company, Hannover and New York, str. 398–401.

Building of microstructure with nano-precision robot cell

Abstract: A development and a structure of a nano-precision robot cell with positional accuracy of a robot tip $\pm 3,9$ nm in a positional open-loop, or ± 61 nm in a positional closed-loop is presented. Used piezo-electric motors provides the volume of the robot work space of $1,5$ cm³. Two different procedures of gripping, transferring and releasing of micro-objects (spherical glass or polystyrene objects with diameter between 1 – 100 μ m) are presented: one-finger gripper based on van der Waals force and one-finger gripper based on capillary force. Applications of building simpler microstructures (an up-right triangle and 3D pyramid) and more complicated building of micro-structure – gear wheel with diameter of 150 μ m are shown.

Keywords: nano-precision robot, microstructures assembly and building, grippers for microobjects



NEPOGREŠLJIV
VIR INFORMACIJ
ZA STROKO

VSAKA DVA
MESECA NA VEČ
KOT 240 STRANEH

UGODNOSTI ZA
NAROČNIKE REVIJE

PROIZVODNJA IN LOGISTIKA · ORODJARSTVO IN STROJEGRADNJA
NEKOVINE · SPAJANJE, MATERIALI IN TEHNOLOGIJE
NAPREDNE TEHNOLOGIJE · VZDRŽEVANJE IN TEHNIČNA DIAGNOSTIKA

