

Mjeriteljski zadaci u mikro i nano tehnologijama

Sosa, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2007

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:232936>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mjeriteljski zadaci u mikro i nano tehnologijama

DIPLOMSKI RAD

Mentor

prof. dr. sc. Sanjin Mahović

Josip Sosa

Zagreb, 2007.

mojoj kćerkici Luciji

SAŽETAK

Potrebe za dimenzijskim mikro i nanomjeriteljstvom očite su i javljaju se kao posljedica razvoja mikro i nanotehnologija u svim domenama, poglavito preciznog inženjerstva. Kako se apsolutne dimenzije smanjuju do mikrometarske ili čak nanometarske razine, a geometrijska kompleksnost i mjeriteljski zahtjevi sve više rastu, mjeriteljstvo postaje sve izazovnije, a postojeće tehnologije pokazuju se nedostatnima. Rad opisuje mogućnosti u području mikro i nanomjeriteljstva koje se očituju u razvoju preciznih i ultra preciznih obrada kao posljedicom sve većih mjeriteljskih zahtjeva, te minijaturizacije i složenosti proizvoda.

Najprije su općenito opisane mikro i nanotehnologija, kao i izradbeni postupci koji se koriste u tim tehnologijama. Zatim su opisani tipični mjeriteljski zahtjevi u mikro i nanomjeriteljstvu, s osnovnom podjelom mjernih zahtjeva na tri zasebna područja: mikrosustave, integrirane krugove i nanotehnologiju. Treći dio bavi se opisom mjernih metoda i uređaja, te njihovim mogućnostima, prednostima i ograničenjima. Poseban osvrt dan je u četvrtom dijelu ovog rada na problem mjernog jedinstva, umjeravanja i osiguranja sljedivosti, kao i na dozvoljena odstupanja u području mikro i nanomjeriteljstva. Konačno, peti se dio bavi procjenom mogućnosti *Laboratorija za precizno mjerenje dužina* Fakulteta strojarstva i brodogradnje na području mikro i nanomjeriteljstva duljine.

SADRŽAJ:

SAŽETAK	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	VI
1 UVOD	1
1.1 Mikrotehnologija	5
1.2 Nanotehnologija	10
2 PREGLED MJERNIH ZAHTJEVA U MIKRO I NANOMJERITELJSTVU	15
2.1 Mjeriteljski zahtjevi u vezi s mikrosustavima	19
2.2 Mjeriteljski zahtjevi tipični za integrirane krugove (poluvodiče)	22
2.3 Mjeriteljski zahtjevi u nanotehnologiji	24
3 OPIS MJERNIH METODA I UREĐAJA NA PODRUČJU MIKRO I NANOMJERITELJSTVA	29
3.1 Interferometrijske mogućnosti	29
3.2 Uređaji za ispitivanje mikrotopografije	34
3.3 SEM - skenirajući elektronski mikroskop; SEM tehnike	37
3.4 Mikro i nanokoordinatno mjeriteljstvo	41
3.5 Mikroskopske tehnike skeniranja pomoću ticala - SPM tehnike	44
3.6 Ostale tehnike	53
4 MJERNO JEDINSTVO	58
4.1 Dozvoljena odstupanja u mikro i nanomjeriteljstvu	62
4.2 Umjeravanje i sljedivost	64
5 MOGUĆNOSTI LABORATORIJA ZA PRECIZNA MJERENJA DUŽINA FAKULTETA STROJARSTVA I BRODOGRADNJE NA PODRUČJU MIKRO I NANOMJERITELJSTVA DULJINE	68
5.1 Stabilizirani laser NPL-a	68
5.2 Umjeravanje preciznih mjernih skala	69
5.2.1 Tehnički opis uređaja za umjeravanje preciznih mjernih skala	69
5.2.2 Eksperimentalna faza i ispitivanje	74
5.2.3 Potrebne djelatnosti do početka upotrebe	74
5.3 Područje ispitivanja hrapavosti površina	75
ZAKLJUČAK	79
LITERATURA	80

Popis slika

Slika 1. Prikaz minijaturne "gitare" izrađene postupkom nanolitografije	3
Slika 2. Koliko je što malo?	4
Slika 3. Vrste izradbenih postupaka u fotolitografiji [10]	6
Slika 4. Shematski prikaz LIGA postupka [4].....	7
Slika 5. Prikaz mikrozapčanika promjera 1,89 mm i mase 0,0008 g [4]	8
Slika 6. Razvoj mikrotehnike i mikroelektronike kroz godine [4]	9
Slika 7. Trendovi razvoja obrada prema Taniguchi-u, 1983. god. [5]	10
Slika 8. Usporedbeni prikaz veličina raznih materija i predmeta [9]	11
Slika 9. Ugljikova nano-cijev [10].....	13
Slika 10. Karakteristični primjeri mjernih zahtjeva u mikro i nanomjeriteljstvu	16
Slika 11. Mjeriteljski rasponi u mikro i nanotehnologiji [2].....	18
Slika 12. SEM slike mikroalata za glodanje [1].....	21
Slika 13. Prikaz bitnih značajki spajanja nekoliko tradicionalnih znanstvenih disciplina [1]	24
Slika 14. Izabrane komponente za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo [1]	27
Slika 15. Ciljevi dimenzijskog mjeriteljstva u raznim područjima tehnologija	28
Slika 16. Osnovno podešenje interferometarskog sustava pomaka [1].....	30
Slika 17. Primjer mjerenja mikroprovrt (Ø 80 µm) pomoću mikroticala [1].....	37
Slika 18. Princip mjerenja SEM-om [1].....	38
Slika 19. Volframski nano-vrh [1].....	39
Slika 20. Primjer 3D rekonstrukcije ISO tipa C etalona hrapavosti mjerenog SEM-om [1].....	40
Slika 21. Shematski prikaz STM uređaja.....	46
Slika 22. Osnovni princip rada STM-a	47
Slika 23. Idealizirani prikaz STM vrha iznad površine [9]	48
Slika 24. Osnovni princip rada AFM-a	48
Slika 25. Shema AFM uređaja – postrojenja	49
Slika 26. Idealizirani prikaz AFM vrha ticala [9]	50
Slika 27. Klasifikacija opreme i mjernih tehnika [1].....	55
Slika 28. Usporedba mjernih tehnika u dimenzijskom mikro i nanomjeriteljstvu [1].....	56
Slika 29. Primjer umjeravanja etalona za mjerenje visine stepenice upotrebljen na međunarodnoj usporedbi [1]	59
Slika 30. Umjeravanje etalona za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo [1]	60

Slika 31. Raspoloživi etaloni umjeravanja u mikro/nanotehnologijama [2]	61
Slika 32. Kombinirani prikaz raspoloživih etalona umjeravanja i mjeriteljskih zahtjeva [2]	62
Slika 33. Usporedba mjerenja jednodimenzijske rešetke [1]	66
Slika 34. Usporedba mjerenja visine stepenice [1]	67
Slika 35. NPL-ov jedno stabilizirani He-Ne laser u <i>Laboratoriju za precizna mjerenja</i> <i>dužina</i>	69
Slika 36. Uređaj za umjeravanje preciznih mjernih skala [7]	70
Slika 37. Kamera <i>Olympus DP 70</i> [7]	70
Slika 38. Laserski sustav <i>Reinshaw ML 10</i> [7]	71
Slika 39. Digitalni pokazivač pozicije <i>Iskra NP 30</i> [7]	72
Slika 40. Automatsko određivanje sredine vizirane linije [7]	73
Slika 41. Set referentnih etalona hrapavosti LFSB-a [3]	75
Slika 42. Uvećana slika brazdi referentnih etalona hrapavosti LFSB-a [3]	76
Slika 43. Referentni etalon hrapavosti LFSB-a [3]	76

Popis tablica

Tablica 1. Tipični mjerni zahtjevi u mikro i nanomjeriteljstvu [2]	17
Tablica 2. Usporedba mogućnosti 4 temeljna načina proizvodnje mikrosustava [1].....	20
Tablica 3. Ključne karakteristike proizvoda srodne litografiji [1]	23
Tablica 4. Izabrani zahtjevi mjeriteljstva za poluvodičke proizvode [1].....	24
Tablica 5. Primjeri dimenzijskih mjeriteljskih zahtjeva u nanomjeriteljstvu [2]	26
Tablica 6. Uređaji mikrotopografije površine i njihova upotreba [1]	36
Tablica 7. Pregled SPM tehnika i osnovne informacije [6].....	45
Tablica 8. i 9. Usporedbena mjerenja PTB-LFSB 1986. godine [3]	77

Popis oznaka i mjernih jedinica

c	m/s	brzina svjetlosti
d_b	μm	dubina brazde
d	μm	pomak
d_l	μm	lomno ograničenje (rezolucija)
$\Delta\varphi$	rad	fazna promjena
f	Hz	frekvencija
k		faktor pokrivanja
λ	μm	valna duljina
N		broj ponavljanja
n		indeks loma
$N.A.$		numerička apertura
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila
U	μm	mjerna nesigurnost

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći znanje stečeno tijekom studija i literaturu navedenu u radu, uz stručnu pomoć mentora prof. dr. sc. Sanjina Mahovića, na čemu mu se iskreno zahvaljujem.

1 UVOD

Jedno od izrazito prepoznatljivih svojstava suvremene tehnologije svakako je minijaturizacija.

Priča o povijesti ljudskog osvajanja mikro i nanosvijeta započinje u antičkoj Grčkoj. Tamošnji filozofi pokrenuli su je svojim raspravama o postojanju konačne granice u usitnjavanju materije, dok su o odgovoru mogli samo nagađati bez mogućnosti da svoja nagađanja i eksperimentalno provjere. Danas su znanost i tehnologija toliko odmakle da je moguće ne samo promatrati zbivanja u mikro i nano svijetu pomoću moćnih mikroskopa, nego i njima izravno i precizno upravljati. Uređaji koje smo do prije nekoliko godina nazivali "kompaktnima" u usporedbi s najnovijim izvedbama izgledaju smiješno nezgrapni.

Prvi molekularni strojevi nastali su vrlo davno – štoviše, neki od njih izravno su zaslužni za pokretanje biološke evolucije. Konstruktor istih bila je sama priroda: u oceanu koji je prekrivao velik dio mlade zemlje slobodno je plutalo mnoštvo raznovrsnih jednostavnih molekula. Tu i tamo, neke od njih našle bi se jedna blizu druge, te bi kemijskim reakcijama između njih nastale složenije molekule. Evolucijsku "industriju", koja traje i danas, pokrenuli su od strane prirode dizajnirani molekularni strojevi s vrlo jednostavnom funkcijom: na sebe su selektivno vezivali jednostavnije molekule i od njih slagali svoje vlastite kopije. Princip molekulske "samogradnje" govori o tome da razne, vrlo složene molekule spontano (tj. bez vanjskog utjecaja, a samo pod utjecajem fizikalnih zakona) međudjeluju na točno određen i uvijek isti način, tako da se spoje u neku veću strukturu. Uz to, ovaj je proces povratan, odnosno postoji obrnuti proces kojim se takva nova struktura rastavlja na molekule od kojih je nastala. Današnja se nanotehnologija uvelike koristi tim principom. Postoji čitav niz različitih makromolekula koje pri kontaktu sa svojim kopijama stvaraju strukture kaveza. Manje molekule koje se zateknu unutar takvih kaveza potpuno su kemijski izolirane od svoje okoline. Takav primjer imamo u farmaceutskoj industriji kada treba određene lijekove, koji su lako reaktivni i nestabilni, sprovesti kroz organizam do točno određenog mjesta (nekog organa ili stanica tumora) na kojem se želi primjeniti i tamo ga vanjskim signalom "otključati".

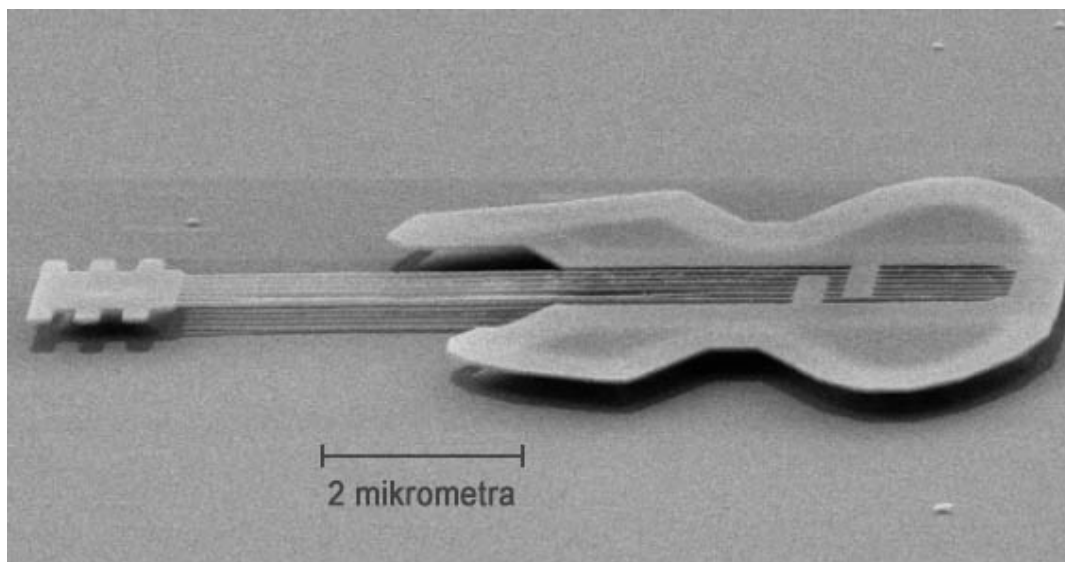
Sljedeći primjer molekularnog stroja ima veliki potencijal za primjenu u računarstvu i telekomunikaciji. Radi se molekulama čija je optička svojstva moguće kontrolirano mijenjati izlaganjem UV svjetlu. Kada nisu izložene djelovanju UV svjetla ove su molekule

prozirne za svjetlo u vidljivom dijelu spektra, no kada ih se izloži UV zračenju promjeni im se molekulska struktura, tako da za vidljivo svjetlo postanu neprozirne. Zbog "pali-gasi" svojstva, ove se molekule mogu upotrijebiti kao optički upravljani prekidači. Kako ulogu signala u optičkim sklopovima ima svjetlost koja se kreće mnogo brže od elektrona u mikroelektroničkim logičnim sklopovima, optička računala brzinom će višestruko nadmašivati najmoćnija postojeća super-računala.

Možda najupečatljiviji primjer upravljanja molekulskim sustavima predstavlja izgradnja mikroskopskih struktura "rezbarenjem" pojedinačnih atoma i molekula na pogodno pripremljene metalne ili polimerske podloge. Uređaji pomoću kojih danas možemo izravno promatrati svijet na ljestvici od samo nekoliko nanometara omogućava nam da vrlo precizno "klešemo" vrlo dobro zaglađene površine. Takav postupak "nanolitografije" naširoko se koristi pri izradi vrlo složenih minijaturnih sustava kao što su mikročipovi.

Nanolitografija odnosno litografija općenito, ubraja se u metode "odozgo-dolje" ("*top-down*" *approach*). Radi se o sintezama nanostrukturiranih materijala ili nanoskopskih čestica, nanokristala iz makroskopskog komada nestrukturiranog materijala. Nanolitografija rabi fotone, rendgenske zrake, kao i fokusirane elektrone i ione za izradu strukture. Uobičajene tehnike koje se koriste u ovu svrhu su osim litografije primjerice izotropno i anizotropno jetkanje (nagrizanje materijala), mehaničko drobljenje materijala i inženjering uz pomoć mikroskopa atomske sile koji se može koristiti tako da "grebe" površinu proizvodeći nanoskopske kanale i ostale strukture (vidi sliku 1).

Uz nanolitografiju koja se komercijalno koristi već niz godina, u nešto skorije vrijeme razvijena je i obrnuta procedura: izgradnja mikroskopske strukture na prigodno pripremljenoj podlozi pričvršćivanjem pojedinačnih atoma i molekula na nju s preciznošću od nekoliko nanometara, što predstavlja pristup "odozdo-gore" ("*bottom-up*" *approach*). Zasniva se na samoorganiziranom rastu kompleksnih atoma, molekulskih i bioloških sustava pomoću načelno nove generacije alata i postupaka. Rabljenjem takvog principa samoorganiziranja i samorazmještanja posljednjih se godina mogu gotovo spontano izvesti pravilno poredane nanostrukture (u prirodi bi to mogao biti primjer pješčanih dina).



Slika 1. Prikaz minijature "gitare" izrađene postupkom nanolitografije

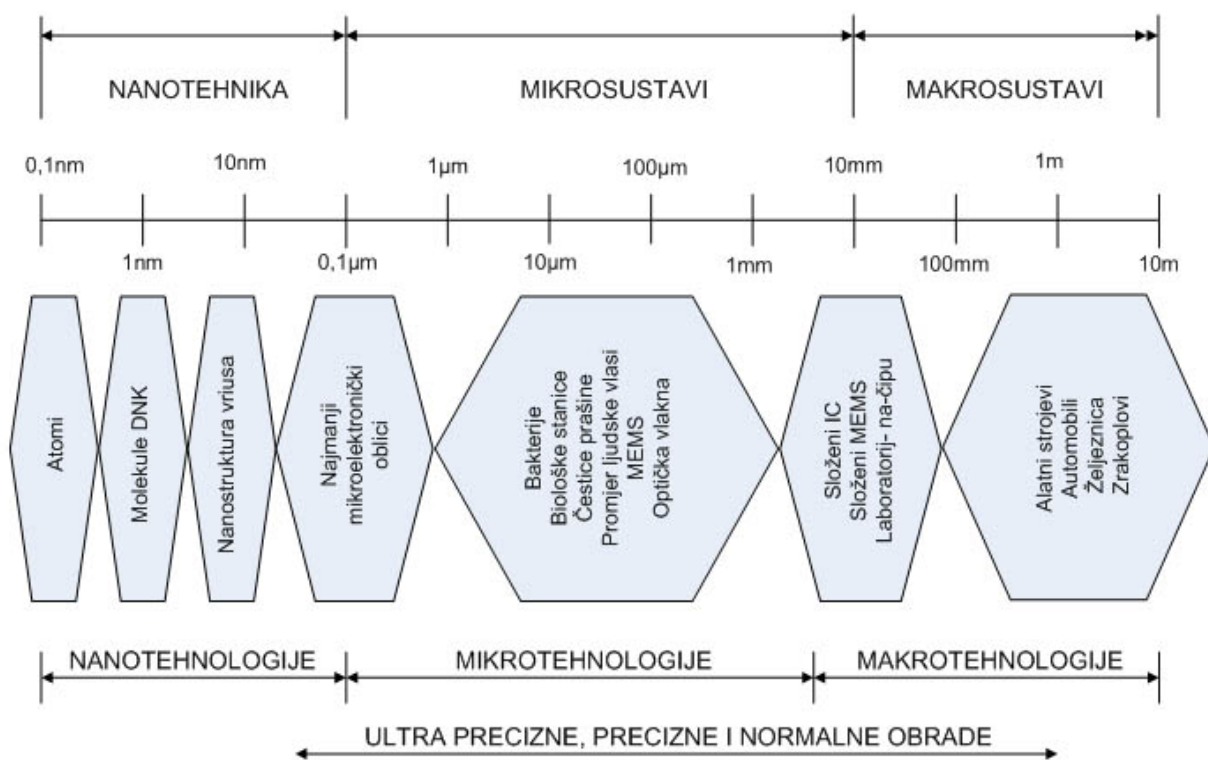
Potrebno je udovoljiti sve višim zahtjevima u pogledu kvalitete tako minijaturenih proizvoda. Smanjivanjem mjera na manje od tisućinke milimetra istovremeno rastu i zahtjevi na točnost i preciznost proizvodnih i obradnih sustava, te jedinica za montažu. Novim zahtjevima moraju se prilagoditi i alati i naprave. Za konačni uspjeh mnogih proizvoda na tržištu odlučujući utjecaj imaju materijal od kojeg je načinjen proizvod kao i njegova minijaturizacija.

Zašto je minijaturizacija tako uspješna? Puno je razloga, počevši od toga se štede resursi: sirovine, energija i prostor. Osim toga, minijaturizacija rezultira dramatičnim porastom učinka jer tisuće, milijuni ili milijarde pojedinačnih elemenata povezanih u sustav pružaju potpuno nove mogućnosti uz značajno povišenu pouzdanost takva sustava (primjerice mikročipovi). Međutim, ta se strategija osim na uspjeh mikroelektronike može prenijeti i u druga područja kao što su optika, mehanika, kemija i posebice medicina.

Zanimljivo je ovdje spomenuti opažanja Gordona E. Moore-a (suosnivača kompanije *Intel*) 1965. godine, da svaki novi krug integrirane memorije sadržava dvostruko više kapaciteta od svog prethodnika (*Moore-ov zakon*) i da se novi čipovi pojavljuju u razmacima od 18 – 24 mjeseci. To znači da se računalna snaga mijenja eksponencijalno s vremenom. Gustoća čipa po jedinici površine u tranzistorima udvostručuje se približno svake 3,3 godine. Kako karakteristične dimenzije na novim čipovima postaju sve manje, predviđa se da će novije generacije čipova morati biti

strukturirane na skalama nanometra. Do 2012. godine, karakteristična linearna dimenzija uzorka na čipu (žičica, tranzistor...) morala bi biti na skalama od 50 nanometara ako očekujemo da *Moore-ov* zakon vrijedi i za budućnost. Na tako velikim gustoćama pakiranja i malim dimenzijama, problemi s termalnom disipacijom u čipovima (zagrijavanje) mogli bi postati veliki problem.

Na slici 2 dan je prikaz gdje se što nalazi na dužinskoj skali u okvirima tehnologije. Područje ispod $0,1 \mu\text{m}$ promatra kao nanotehnika, dok mikrosustavi na dužinskoj skali zauzimaju raspon od $0,1 \mu\text{m}$ do 10mm . Slika prikazuje čitav niz veličina, počev od atoma, preko najmanjih mikroelektroničkih oblika, pa sve do zrakoplova radi što bolje ilustracije. Ovaj rad će razrađivati specifičnosti vezane uz područje mikro i nanosustava.



Slika 2. Koliko je što malo?

Na kraju, sasvim se izvjesno nameće pitanje: hoće li minijaturizacija napokon doseći "tvrdo dno" onog trenutka kada u potpunosti uspijemo ovladati manipulacijom pojedinačnih atoma. Jedno je sigurno: od atoma nikada nećemo moći sazdati stroj manji od atoma samih.

1.1 Mikrotehnologija

Nakon mikroelektronike, tehnika je otkrila nove svijetove, mikrotehnologiju i nanotehnologiju, odnosno mikro i nanotehniku. Zahvaljujući brzom razvoju gospodarski prihvatljivih postupaka velikoserijske izrade mikrodijelova, nastavljen je nezadrživi prijelaz iz područja precizne tehnike u područja mikrotehnike i mikrotehnologije. Ulažu se veliki naponi u razvoj područja mikromehanike i izradu heterogenih mikrosustava, kao i integraciju mikroproizvoda u makrosustave i razvoj proizvodnje biočipa. Potpuno je kriva predodžba da se mikroelementi primjenjuju isključivo u mikrosustavima, već treba uočiti da primjena mikroelemenata omogućava razvoj i izradu makroproizvoda, koji bez toga ne bi bili mogući, ali ovdje treba napomenuti da smanjivanjem izmjera elemenata iz makrosvijeta u mikrosvijet nastupaju ograničenja koja zahtijevaju korištenje drugih fizikalnih zakonitosti i nove postupke izrade.

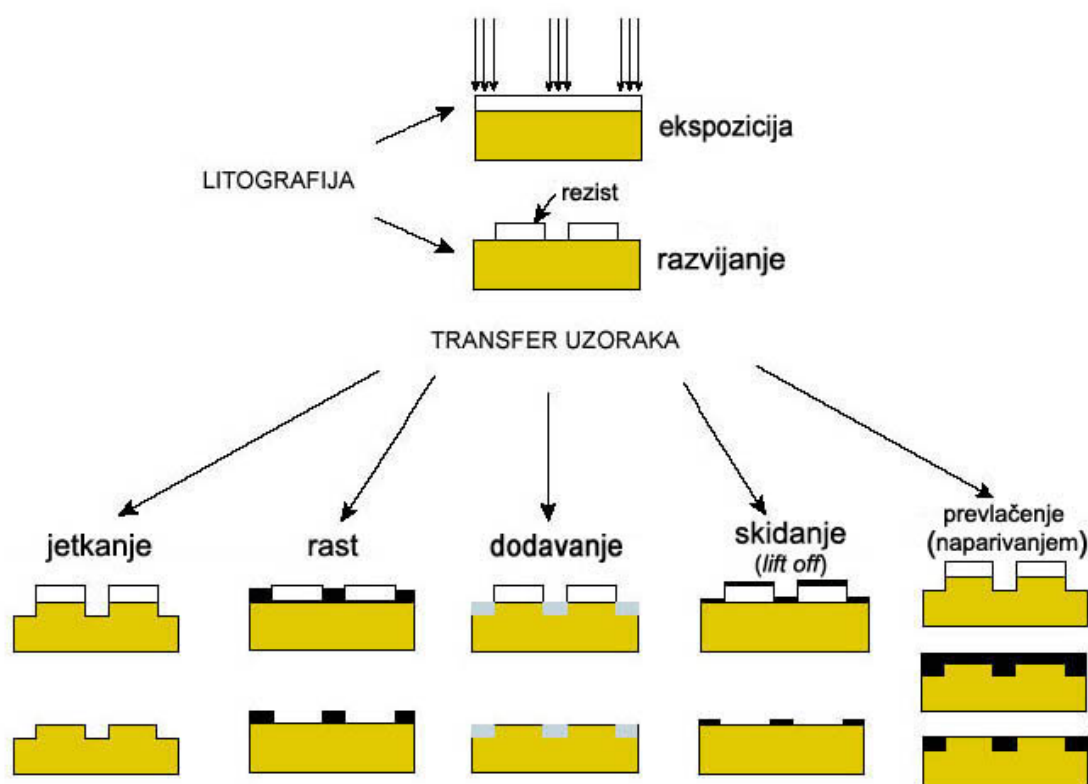
Korištenje klasičnih proizvodnih tehnologija na području minijaturizacije komponenata dovelo je do granica njenih sposobnosti. Posebno se je to odrazilo na područje osiguravanja i kontrole kvalitete u području mjeriteljstva, prvenstveno duljina, u osiguravanju pouzdanih rezultata mjerenja s definiranim mjernim nesigurnostima u području ispod mikrometra. Stoga se krenulo s uvođenjem nepoluvodičkih materijala kao što su polimeri i metali, što je dovelo do unapređenja tradicionalnih proizvodnih tehnologija i razvoja novih.

Znanost je vrlo brzo otkrila da se, kao i elektronički, mogu smanjivati i visokoserijski proizvoditi mehanički uređaji, te da oni obećavaju jednake prednosti mehaničkom svijetu, kao što to tehnologija integriranih krugova pruža elektroničkom svijetu.

Mikrotehnika se tako bavi konstruiranjem i izradbom mikroelektroničkih, mikromehaničkih i mikrooptičkih dijelova, sklopova i sustava, dakle riječ je o interdisciplinarnom znanstvenom području. Ti se dijelovi spajaju u integracijskom smislu, pa se time postižu potpuno nova svojstva. Posebno je naglašena njena veza s područjem elektrotehnike i informatike. Trenutno su najrazvijeniji, strukturno i tehnološki, mikroelektronički i mikrooptički elementi i sustavi.

Izradbeni postupci mikrotehnologije

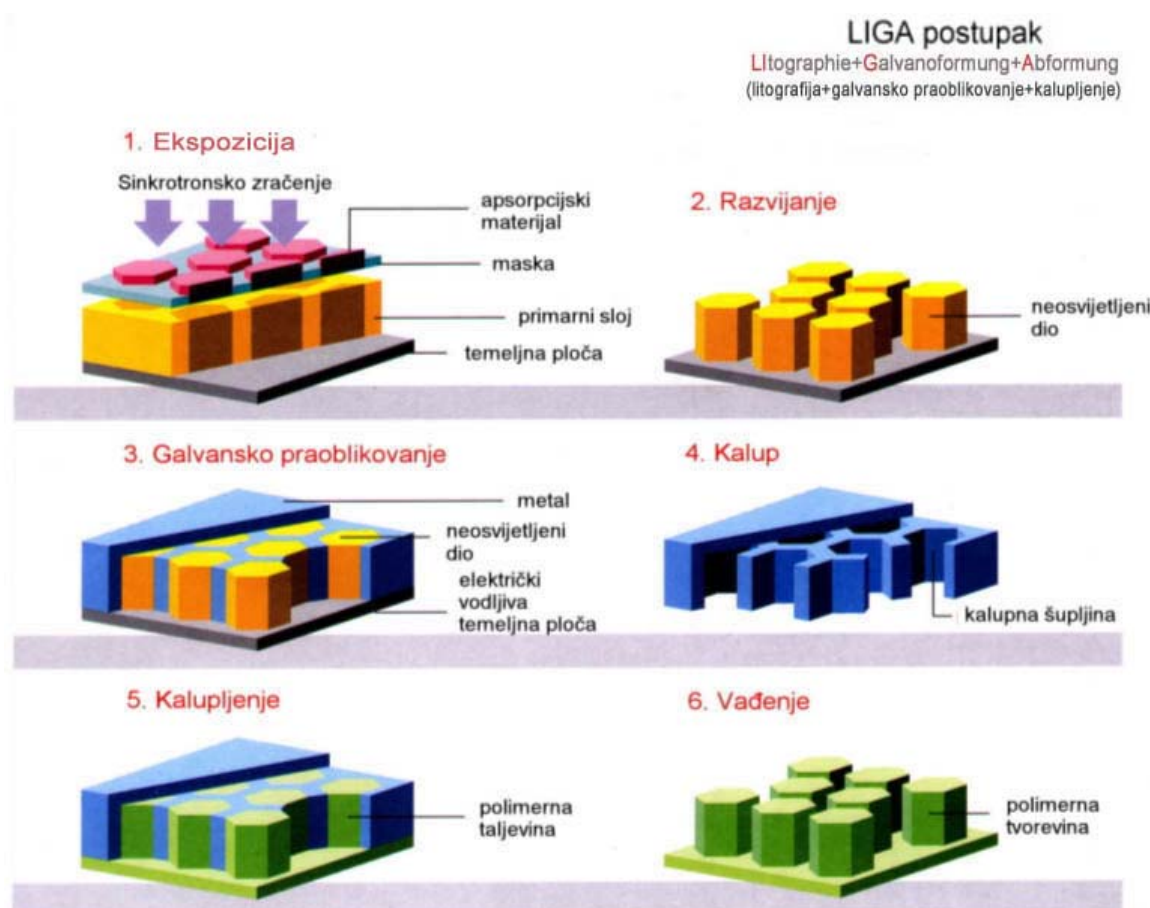
- Fotolitografija** - svjetlost se fokusira kroz "masku" na površinu i ukrućuje kemijski film na njoj. Mekani, neizloženi dijelovi filma se ispiru i na kraju se pomoću jetkala uklanja nezaštićeni materijal. Ovakvim površinskim postupkom fotolitografije dobivaju elektronički elementi primjerice otpornici, tranzistori, diode, senzori i kondenzatori. U strojarstvu se tim postupkom mogu izrađivati elektromotori, zupčanici, ležajevi, ventili, pumpe ili turbine. Na slici 3 prikazan je postupak fotolitografije, odnosno litografije.



Slika 3. Vrste izradbenih postupaka u fotolitografiji [10]

- LIGA postupak** - za izradu mikroproizvoda u okviru industrijskih potreba posebno pogodnim pokazao se LIGA postupak koji predstavlja spoj litografije, galvanskog oblikovanja i kalupljenja (prikazan je slikom 4). Postupak se obično provodi u nekoliko koraka: ozračivanje, razvijanje, galvansko praoblikovanje i kalupljenje. Za izradu kalupa obično se rabi određena vrsta zračenja (npr. rendgenske zrake, UV zračenje) tijekom litografije, te postupak galvanskog praoblikovanja kojim se dobije obličje mikrokalupa. Tim se postupkom mogu prerađivati različiti metali, legure,

polimerni materijali i keramike. Postupak je pogodan za velikoserijsku proizvodnju proizvoda podmikronskih dimenzija uz zadovoljavajuću točnost i preciznost. Tim se postupkom mogu izrađivati primjerice dijelovi različitih mikromotora i mikropogona, satnih mikromehanizama, mikrooptičkih uređaja, optičkih senzora itd. Veličina takvih izradaka kreće se od nekoliko mikrometara do nekoliko milimetara. Hrapavost površine iznosi oko 100 nm.



Slika 4. Shematski prikaz LIGA postupka [4]

- *Obrada skidanjem čestica* – u tu svrhu razvijeni su ultraprecizni strojevi koji se odlikuju točnošću i preciznošću rada u podmikrometarskom području izmjera što je postignuto izvanrednom krutošću konstrukcije obradnog sustava. Primjenjuju se postupci tokarenja, blanjanja, glodanja, bušenja, brušenja i erodiranja. Tim se postupcima mogu izrađivati i kompleksne geometrije obratka. Tipični proizvodi su primjerice optički dijelovi, precizni ležajevi ili ispitna tijela. Alati su obično načinjeni od prirodnog dijamanta, jer se njegova oštrica može obraditi u potrebnoj kvaliteti. Najmanja glodala pri tome imaju promjer vlasi kose. Razvoj teži k novim rješenjima

u pogledu pričvršćenja obratka i alata. Obradom skidanjem čestica postiže se preciznost izmjera od nekoliko mikrometara i hrapavost površine u području 1 μm .

- *Mikroinjekcijsko prešanje* – primjena tog postupka zahtijeva neke preinake standardne opreme, zbog malih izmjera otpresaka i zahtjeva na mikropreciznost. Tlakovi ubrizgavanja vrlo su visoki i kreću se između 500 i 2000 bar. Jedinica za pripremu i ubrizgavanje taljevine umanjena je da bi se spriječila degradacija materijala. Sustav za vađenje otpresaka također je modificiran. Tim se postupkom prerađuju svi polimerni materijali namijenjeni injekcijskom prešanju [npr. poliamid, poli(eter-eter-eton), poli(oksimetilen), polistiren, polikarbonat itd.]. Dijelovi koji se izrađuju mikroinjekcijskim prešanjem, primjerice mikrozupčanik (prikazan slikom 5), mogu imati masu od svega 0,0008 g, što znači da se u jednom kilogramu nalazi 1,25 milijuna komada mikrozupčanika.

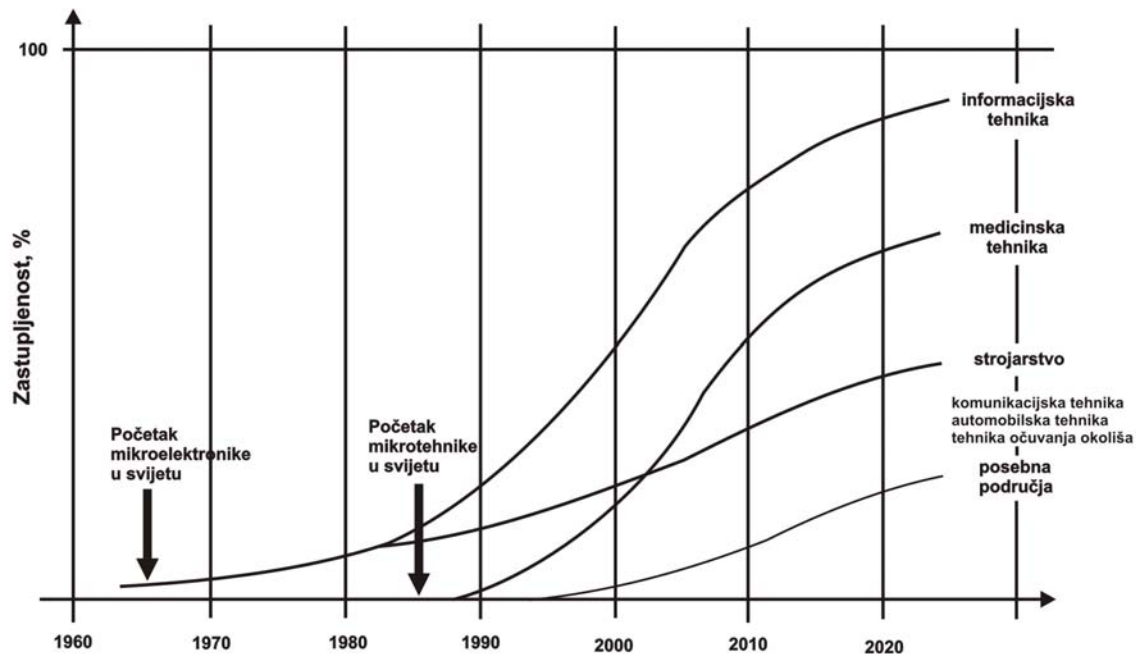


Slika 5. Prikaz mikrozupčanika promjera 1,89 mm i mase 0,0008 g [4]

Postoje i razni drugi izradbeni postupci, primjerice prostorno oblikovanje *wafer-a* jetkanjem ili spajanje (*wafer-a* na *wafer*, *wafer-a* na staklo i druge materijale), a mnogi od njih su još u fazi razvoja ili tek pripreme. Ovdje su nabrojani samo oni koji su najčešći i najuobičajeniji.

Primjenu mikroproizvoda nalazimo u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji (poglavito različiti senzori), informatičkoj i komunikacijskoj tehnici (glave za štampače koji tekst otiskuju mlazom tinte brzinom 10 m/s), medicini (invazivna kirurgija i liječenje

krvožilnog sustava upotrebom minijaturnih "podmornica"), kemiji, biologiji i još mnogim drugim djelatnostima i granama. Slikom 6 prikazan je razvoj mikrotehnike i mikroelektronike kroz godine.

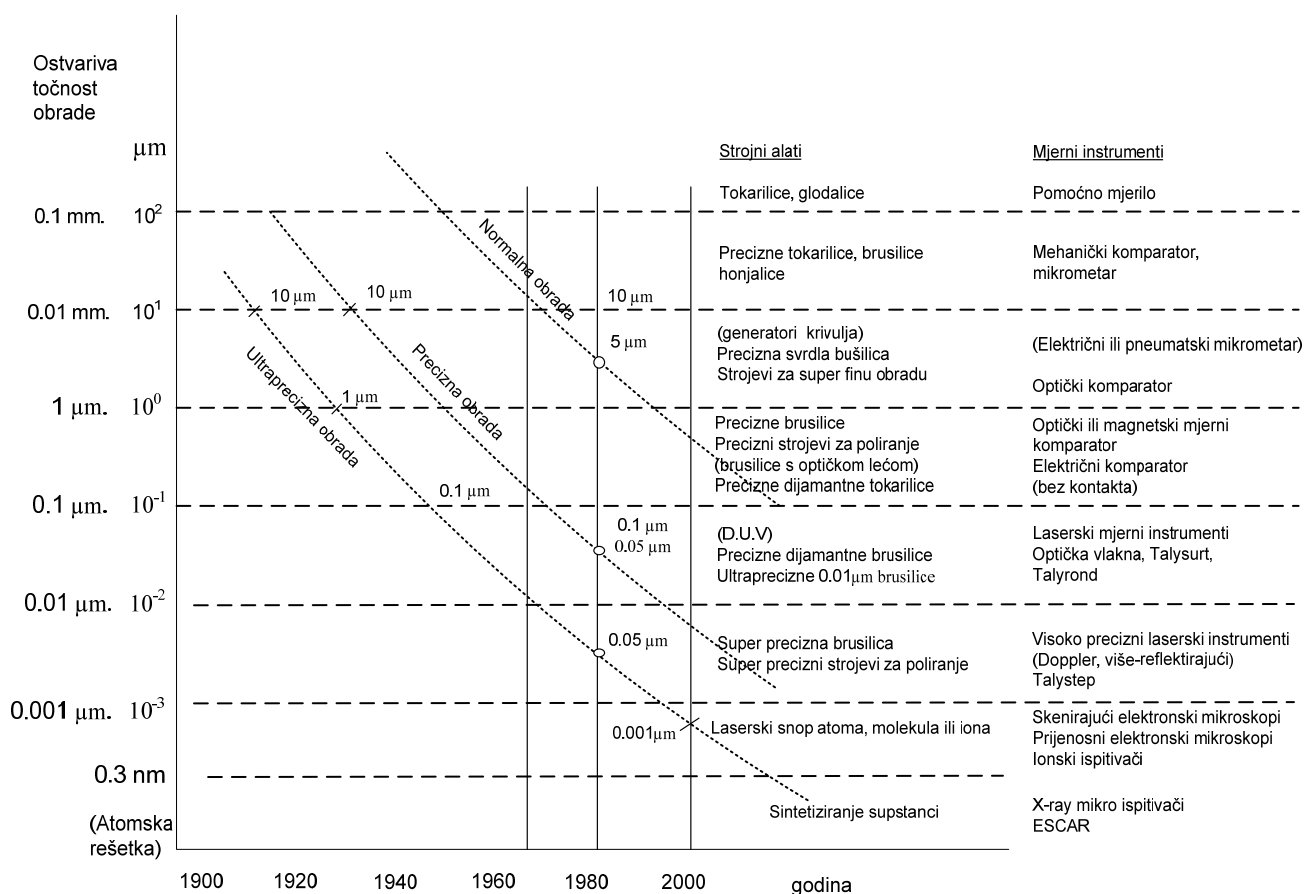


Slika 6. Razvoj mikrotehnike i mikroelektronike kroz godine [4]

1.2 Nanotehnologija

Nano dolazi od grčke riječi za patuljka. Nanotehnologija se obično definira kao proučavanje i manipuliranje tvarima manjima od 100 nm – što pripada redu veličine molekula i virusa.

Pojam "nanotehnologije" uveo je Norio Taniguchi 1974. godine na *University of Tokyo*. Pojam predstavlja mnoštvo naprednih i rapidno nadolazećih tehnologija, temeljenih na smanjenju veličina skale postojećih tehnologija na sljedeću, nižu stepenicu preciznosti i minijaturizacije. Taniguchi je pristupao nanotehnologiji s gledišta "odozgo-dolje", što je u skladu sa stanovištem preciznog inženjerstva (slika 7).

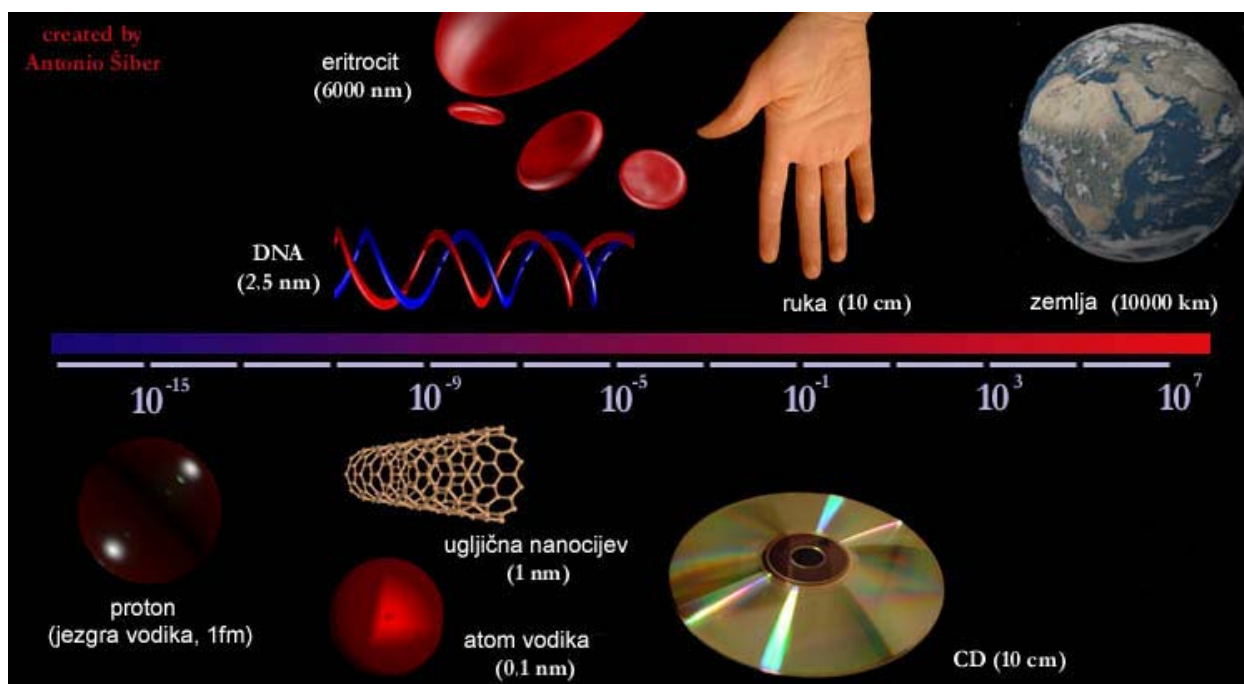


Slika 7. Trendovi razvoja obrada prema Taniguchi-u, 1983. god. [5]

K. Eric Drexler utemeljitelj je *Foresight Nanotech Institute*, a svoje gledište pojma "nanotehnologije" predstavio je svijetu 1986. godine upotrebom pristupa "odozdo-gore", što je ujedno točka gledišta fizičara. Pojam "nanotehnologije" dao je kao: "mehanička sinteza dugačkih skala temeljenih na pozicijskoj kontroli kemijski reaktivnih molekula".

Nanotehnologija je istraživanje i razvoj tehnologije na atomskoj, molekularnoj ili makromolekularnoj razini zbog fundamentalnog razumijevanja fenomena i materijala na nano-skali i zbog stvaranja i korištenja struktura, uređaja i sustava koji imaju nova svojstva i funkcije upravo zbog svoje male veličine. Nova i razlikovna svojstva i funkcije primjećuju se na kritičnoj skali dužine tipično ispod 100 nm. Istraživanje i razvoj nanotehnologije uključuje kontroliranu manipulaciju nanoskopskim strukturama i njihovu integraciju u veće komponente materijala, sustave i arhitekture. Nanotehnologija je dakle mogućnost djelovanja – mjerenja, uvida, predviđanja i stvaranja – na skali atoma i molekula i iskorištavanje novih svojstava na toj skali.

Dovoljno je reći da jedan metar sadrži jednu milijardu nanometara da bi imali predodžbu o koliko sitnim "stvarima" je ovdje riječ. Nanometar je primjerice 40000 puta manji od prosječne debljine ljudske vlasi. Ili iz druge perspektive; nanometar je širok otprilike kao šest spojenih atoma ugljika. Crvena krvna stanica primjerice ima 6000 nm u promjeru, bijela krvna stanica 10000 nm, virus je "veličine" 75 – 100 nm, DNA 2,5 nm, proteini 5 – 50 nm, a atom vodika 0,1 nm (za ilustraciju vidi sliku 8).



Slika 8. Usporedbeni prikaz veličina raznih materija i predmeta [9]

S jednog aspekta, nanotehnologija se bavi izgradnjom raznih mehanizama i sustava upotrebljavajući komponente nano-skalnih dimenzija, kao što su primjerice super mala računala (veličine bakterije), zatim super računala veličine kocke šećera koja imaju

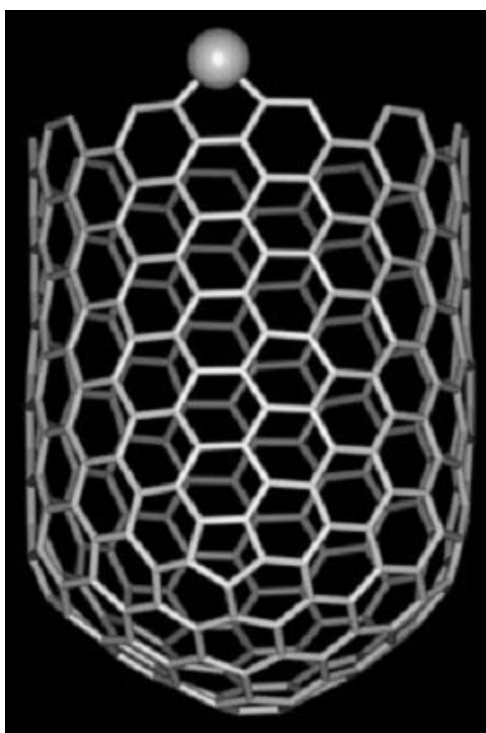
radnu moć kao milijarda današnjih prijenosnih računala ili prijenosnih računala veličine današnjih, ali s učinkom bilijuna (1000 milijardi) današnjeg osobnog računala. Za razliku od nanoelektronike, čije je težište primjena u informacijskim tehnikama, kod molekularnih koncepata težište primjene je u područjima kao što su medicina, kemija, biologija, znanost o materijalima, svemirski programi, inženjerstvo, te u potpuno novim tehnologijama. Drugi aspekt dijeli s postojećim tehnologijama koje sve više umanjuju vrijednosti na mjernoj skali, sve do nanoskale.

Valja naglasiti da je nanotehnologija prije svega puno više od puke minijaturizacije poznate mikrotehnike. Ona je rezultat istraživanja i razvoja molekularno-teorijskih koncepata izgradnje funkcijskih nanostrukture premještanjem atoma i molekula. U nanoskali, fizikalne, kemijske i biološke značajke materijala ponašaju se u suprotnosti s fundamentalnim zakonima u odnosu na značajke individualnih atoma i molekula ili materije cjelokupne mase. Znanstvenici su uspjeli razviti alate koji im omogućavaju stvaranje funkcijskih nanostrukture premještanjem pojedinačnih atoma ili molekula. Potpuno nove mogućnosti postižu se primjenom samoorganizirajućeg rasta kompleksnih molekularnih i bioloških sustava.

U bliskoj budućnosti očekuje se pojačani razvoj i izgradnja novih strojeva i mehanizama u nano-skalnim dimenzijama, koja se danas odnosi na molekularnu nanotehnologiju. Obecavajući napredak nanotehnologije postoji zahvaljujući zakonima kvantne fizike, koja u tim veličinama skale omogućava primjene u optici, elektronici, magnetskoj pohrani, katalizi i drugim područjima. Trenutno postoje mnoga dobrodošla i praktična otkrića u domeni nanotehnologije: hlače otporne na mrlje, prozori koji odbijaju prljavštinu, samočisteće WC školjke (školjka je premazana superglatkom glazurom koja ima rupice od oko 30 nm koje su manje od bakterija i čestica plijesni, te se one ne mogu hvatati na takvu površinu), teniske loptice koje zadržavaju svoju elastičnost, loptice za golf koje ispravljaju vlastitu putanju itd.

Jedna od svakako vrlo zanimljivih stvari u nano-području su ugljikove nano-cijevi (engl. *carbon nanotubes* ili kraće *CNT*). One su svojevrsna reklama za nanotehnologiju. Općenito se zna da je grafit vrlo mek i lomljiv, primjerice u olovci. No, ugljikova cijev (slika 9) puno je čvršća od čelika. To je vrlo tanka pločica grafita oblikovana u cijevčicu. Takvi sićušni cilindri nalik su na slamku i mali su oko pola nm, ali su sto puta čvršći od čelika i šest puta lakši, a *Young*-ov modul elastičnosti iznosi više od 1 TPa. To je najlakši, najkrući i najčvršći poznati materijal i među najboljim je vodičima topline i elektriciteta. Takav materijal može prenositi oko 1000 puta više električne energije od bakrene žice.

Naravno da je potražnja za takvim materijalom golema, no donedavno je bio teško dostupan i vrlo skup, a trenutna situacija je nešto bolja, jer se svjetska proizvodnja neprestano multiplicira. Trenutna svjetska godišnja proizvodnja ugljikovih nano-cijevi iznosi svega oko 300 kg, po cijeni od 780€ za gram, dakle 50 puta više od zlata. Kada je riječ o pronalaženju primjena za ugljikove nanocijevi, raspon je golem; počevši od brojnih građevinskih tvrtki, tvrtke *Boeing* koja ih želi kao izvor budućih poboljšanja za svoje visokonapredne zrakoplove budućnosti, svemirskoj tehnici i brojnim drugim.



Slika 9. Ugljikova nano-cijev [10]

Izradbeni postupci nanotehnologije

Nanolitografija je proces proizvodnje uzoraka na površinama s nanometarskom točnošću. Osnovna ideja litografije vrlo je stara. Međutim, kada se atomi ili molekule žele točno pozicionirati na površinama pojavljuju se mnogi problemi od kojih su neki vezani uz kvantnu prirodu atoma. Trenutno postoje mnoge, međusobno različite tehnologije koje se nazivaju litografijama. Primjerice, vrh mikroskopa atomske sile (AFM) može se koristiti kao "pero". Vrh se obloži tankim filmom tiolnih molekula (takve molekule čine složene monoslojeve). Pokretanjem vrha, molekule prelaze s vrha prema površini stvarajući nanometarske uzorke na površini. Takva litografija naziva se *dip-pen* litografija.

Druga vrsta litografije temelji se na utiskujućim tehnikama. Ideja ove litografije je u stvaranju otiska na površinama koristeći prije pripremljene dijelove nanostrukturiranog materijala, koji se kao žig pritisne na površinu ostavljajući karakterističan uzorak. Ta se tehnika koristi ponekad u kombinaciji s izlaganjem materijala UV svjetlu koje stabilizira otisak. U tom slučaju, koristi se tanki polimerni film koji se strukturira.

Litografija elektronskim snopom koristi skenirajući elektronski mikroskop (SEM) za "pisanje" po površinama. Zbog ozračenja elektronima, materijal lokalno mijenja svojstva što se može iskoristiti da se takav ozračeni materijal selektivno jetka. *Litografija X-zrakama* funkcionira na sličnom principu, a X-zrake se koriste umjesto elektrona.

Vrlo interesantan tip litografije je *laserom fokusirana litografija* ili *interferentna litografija*. U ovoj tehnici se pomoću lasera iznad površine stvara stojni svjetlosni val koji preuzima ulogu foto-litografske maske. Atomi se isparavaju iz nekog izvora iznad površine i na svom putu prema površini međudjeluju sa svjetlosnim stojnim valom koji ih navodi na određena mjesta. Prema tome, svjetlosni val funkcionira poput leće za atome, vodeći ih na određene položaje i time stvarajući uzorke na površini. Ova se tehnika može kombinirati i s mehaničkom maskom ispred polja svjetlosne sile koja onda dodatno usmjerava atome. Za najbolje rezultate, atomski snop koji se "naparava" na površinu treba biti monokromatski (tj. svi atomi moraju imati istu brzinu, energiju...). Ovo predstavlja bitnu tehnološku poteškoću i povećava troškove takve vrste litografije.

Upotreba nanolitografije vjerojatno će dominirati u proizvodnji elektroničkih komponenti (čipova) strukturiranih na nanometarskoj skali. To bi mogao biti način da se valjanost *Moore*-ovog zakona produži i u budućnosti.

Bez obzira na različita stajališta i procjene gdje bi se nanotehnologija mogla primjeniti i kako bi se mogla razvijati, jedno je neosporno: ta je tehnologija u samom začetku, a ima potencijal promijeniti gotovo sve.

2 PREGLED MJERNIH ZAHTJEVA U MIKRO I NANOMJERITELJSTVU

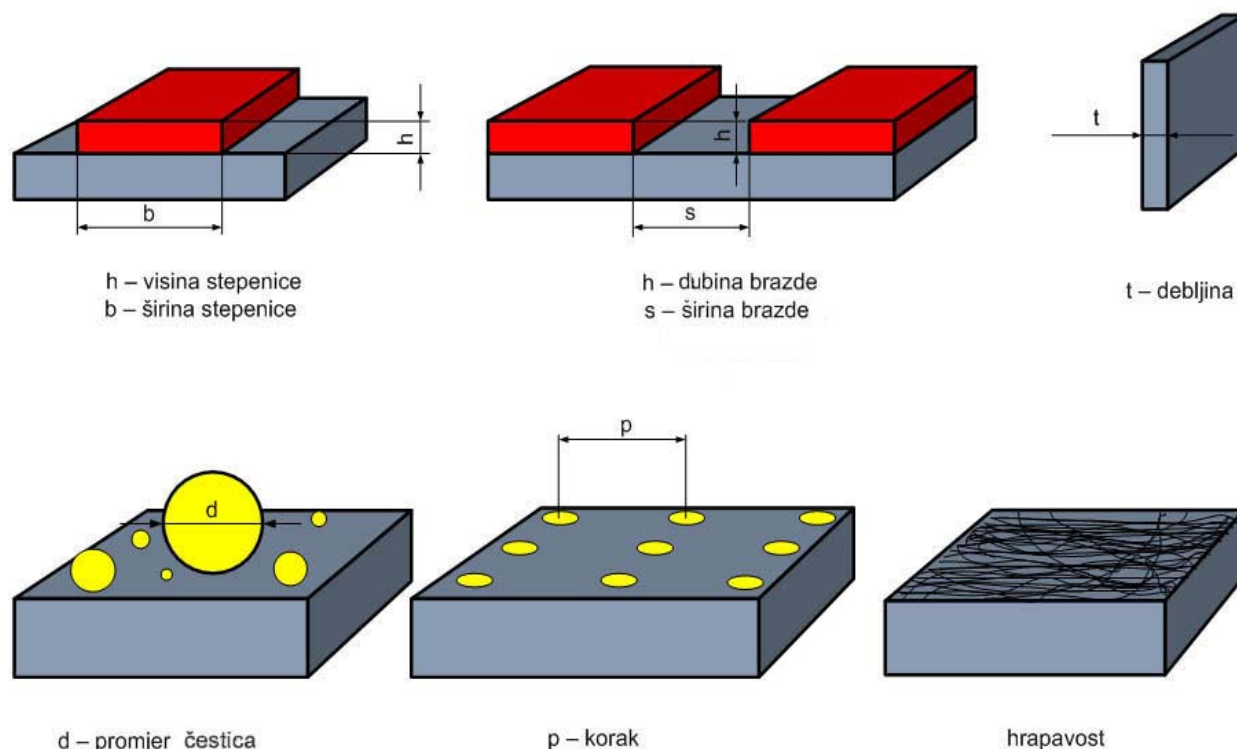
Rasprava o različitim mjernim zahtjevima u mikro i nanomjeriteljstvu neizbježno sadržava elemente klasifikacije. Najjednostavnija klasifikacija temelji se samo na dimenzijama i najčešće se upotrebljava kada se upućuje na nanotehnologiju kao na istraživanje i tehnološko otkrivanje na atomskoj, molekularnoj ili makromolekularnoj razini, u razmjerima dužine skale od otprilike 1-100 nm.

Druge definicije su ponešto šire i opsežnije, kao i integracija u velike sustave ("proizvodnja i primjena fizikalnih, kemijskih i bioloških sistema kod skala rangiranih od individualnih atoma ili molekula do podmikrometarskih dimenzija, kao i integracija dobivenih nanostrukture u velike sustave"). Kroz veliku različitost komponenti i mjera preko nekoliko dekada dužina skale, "predviđamo" da definicija temeljena samo na dimenzijama u nekim slučajevima može biti neadekvatna.

U mikrorežimu se klasifikacija podudara s proizvodnim grupama i može biti kao nadopuna pri dodatnim informacijama oko specifičnih tipova komponenti koje se mogu okarakterizirati po veličini u 3D, kao i geometrijom.

Srodne vrste mjeriteljskih zahtjeva izvedive u mikro i nanomjeriteljstvu (prikazane slikom 10) su :

- Udaljenost određena između dvije površine orijentirane u istom smjeru (primjer - udaljenost između linije umreženja ili dvije ravnine u mikrostrukturi);
- Širina određena udaljenošću između dvije suprotne površine (primjer - širina brazde);
- Visina određena udaljenošću između dvije površine iste orijentacije, ali postavljene u vertikalnom smjeru (primjer - dubina mikrofluidne brazde);
- Geometrija ili oblik određeni udaljenošću između dvije površine predmeta i prethodno određenim referencama (primjer - ravnoća *wafer-a*);
- Uzorak i hrapavost određeni kao geometrija strukture ravnine čije su dimenzije male uspoređujući ga s predmetom ispitivanja; takav pristup je djelomičan izazov za mikro i nano veličine predmeta, budući da površine postaju dominantne poštujući volumen predmeta;
- Debljina nanosa;
- Odnos omjera (*aspect ratio*) određen kao dubina strukture podijeljena s njezinom širinom.



Slika 10. Karakteristični primjeri mjernih zahtjeva u mikro i nanomjeriteljstvu

Potrebno je izdvojiti dvije značajke mikro i nano komponenata koje imaju velik utjecaj na mjeriteljske zahtjeve. Prva je razina minijaturizacije, što znači da manja apsolutna skala pruža veći izazov za mjerne zahtjeve, a druga je složenost struktura, gdje mjeriteljski zahtjevi rastu kada prelazimo s 2D na 2½D i dalje na 3D mjerne postupke.

2D postupak možemo opisati kao površinsko mjeriteljstvo, gdje je odnos dubine strukture u odnosu na njenu širinu (*aspect ratio*) manji od 1. Ukoliko je taj odnos veći od 1, riječ je o 2½D mjernim postupcima; primjerice, takvi mjerni zahtjevi dati su kod visokog odnosa omjera *SU8 MEMS* struktura. Mjerenja unutrašnjih presjeka, slobodnih oblika i obilježja unutar šupljina biti će navedena kao 3D mjerni zahtjevi.

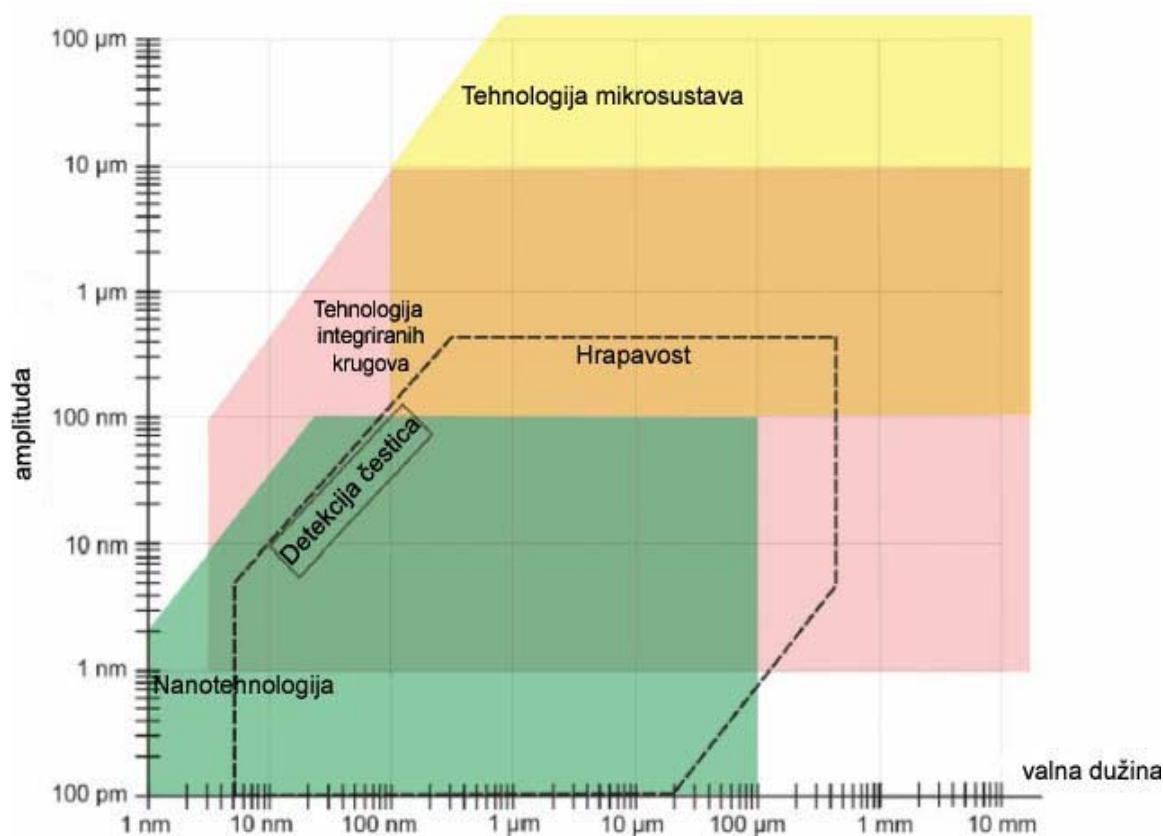
Složenost u ispunjavanju mjeriteljskih zahtjeva nadalje povećava činjenica da postoji potreba za mjerenjem dugih raspona, ali s nanometarskom rezolucijom, što proteže dimenzijska mjerenje na nekoliko razina mjernih skala. Taj je problem usko vezan uz metode mjerenja, kao i rezoluciju i mjerni opseg uređaja.

U tablici 1 dan je prikaz tipičnih mjernih zahtjeva u mikro i nanomjeriteljstvu, s osnovnom podjelom na tri tipična područja: mikrosustave, integrirane krugove i nanotehnologije. U tablici su primjerice navedene značajke, materijali, tipovi mjerenja, mjerni rasponi, očekivane točnosti i ostali važni podaci za ta područja mjeriteljstva.

Tablica 1. Tipični mjerni zahtjevi u mikro i nanomjeriteljstvu [2]

	MIKROSUSTAVI		INTEGRIRANI KRUGOVI (POLUVODIČI)		NANOTEHNOLOGIJA	
Značajke	struktura na maskama, <i>waferi</i> ili drugi supstrati; zasebni dijelovi; različiti materijali i veličine		strukture na <i>waferima</i> i maskama		strukture na <i>waferima</i> i drugim supstratima; pojedinačne strukture na supstratima (apsorbirane)	
Okolina	zrak; vakuum		zrak		zrak; vakuum; UHV; tekućine	
Materijal	Si i drugi poluvodiči; supstrati maski; metalni fotorezisti		Si; keramika; staklo; metal; plastika; supstrati maski; fotorezisti i dr.		Si i drugi poluvodiči; keramika; metali; pojedinačne molekule; organski i biološki materijali	
Veličina uzorka	maske i <i>waferi</i> od 6" (ili više); pojedinačne strukture do 50mm x 50 mm, debljine do 25 mm		sve maske ili <i>waferi</i> (7"...12"...)		<i>waferi</i> i drugi supstrati do 4"; posebne strukture do približno 10mm x 10 mm; debljine do nekoliko mm	
Tip mjerenja	2 ½ - 3D; očekivani odnos omjera do 50 ili više		2D; očekivani odnos omjera <1		2 ½ (...3)D; očekivani odnos omjera <1	
Raspon pozicioniranja	do 150mm x 50 mm x 25 mm		175 mm x 175 mm do 300 mm x 300 mm (x neke 100 µm)		do 100 mm x 100 mm x < 5 mm; često 10 mm x 10 mm x 1 mm	
Mjerni raspon	do 50 mm x 50 mm x 25 mm		175 mm x 75 mm za maske; 25 mm x 32 mm za matricu (x neke 10 µm)		100 µm x 100 µm x 10 µm	
MJERNI ZAHTJEVI						
Razmak	< 50 mm	+ mehanička svojstva	< 175 mm	+ električna svojstva	< 100 µm	+ mehanička, optička, električna, magnetska, kemijska, molekularna svojstva
Širina	> 1 µm		> 80 µm		< 1 µm	
Visina	< 1 mm		< 10 µm		< 250 nm	
Debljina sloja	< 1 µm		> 2 nm		< 50 nm	
Hrapavost povr.	< 1 µm rm		< 10 nm rm		< 50 nm rm	
Točnost	nekoliko 100 nm		nekoliko nm		nm i ispod	

Na slici 11 pokazani su rasponi tehnologija u ovisnosti valna dužina/amplituda. Tehnologija integriranih krugova preklapa se velikim dijelom s tehnologijama mikrosustava i nanotehnologija, ali uočavamo da niti to nije dovoljno, odnosno da postoje ograničenja da bi se odgovorilo na neke potrebe u najzahtjevnijem području nanotehnologija. U svemu tome, vrlo je bitno poznavati stanje površine, kao što je primjerice hrapavost i detekcija čestica.



Slika 11. Mjeriteljski rasponi u mikro i nanotehnologiji [2]

U sljedećim poglavljima opisani su tipični mjeriteljski zahtjevi temeljem tablice 1, slike 11 i primjera u sljedećim područjima:

- mikrosustavi
- integrirani krugovi (poluvodiči)
- nanotehnologija

2.1 Mjeriteljski zahtjevi u vezi s mikrosustavima

Mikroelektromehanički sustavi (MEMS)

MEMS se mogu definirati kao male komponente koje posjeduju obje funkcionalnosti, mehaničku i električnu. Tradicionalni MEMS oblikovani su na temelju osnova poluvodičke proizvodnje. Tijekom posljednjeg desetljeća pojavljuju se novi proizvodi opremljeni MEMS-om u nekom obliku. Ovo poglavlje sadrži prikaz različitih mikroproizvoda uključujući tradicionalni MEMS i raspravu o povezanosti dimenzijskog mjeriteljstva s tim proizvodima.

Tradicionalni MEMS proizvodi obično su okarakterizirani višim odnosom omjera nego uobičajni integrirani krugovi. Zbog svoje relativno male apsolutne dimenzije, viši odnosi omjera postavljaju veće mjeriteljske izazove. Nadalje, prisutnost mehaničkih i pokretnih dijelova povećava osjetljivost uslijed mehaničkih deformacija kroz mjerenje. Tipične mjere su dimenzije i visina stepenice kao i uzorak površine. Geometrija koja se razmatra je bitno $2\frac{1}{2}D$.

Mikrofluidi

Proizvodi za kemijsku i biokemijsku analizu fluida postali su predmetom glavnih istraživanja tijekom zadnjeg desetljeća. Te tzv. laboratorij-na-čipu komponente proizvedene su istodobno od silicijskog i polimernog materijala. Trend je usmjeren k proizvodima temeljenim na polimeru i stoga se razvijaju novi proizvodni planovi. Proizvodnja alata za mikroinjekcijsko kalupljenje i vruće utiskivanje mikrofluidnih sustava može se realizirati kroz različite pojedinačne procese. Klasifikacija se vrši prema osnovnom materijalu bez obzira da li su uzorci dobiveni dogradnjom ili oduzimanjem materijala, indetificirana su četiri proizvodna procesa. Tri se temelje na kombinaciji fotolitografije, jetkanja i elektrodepozicije, dok četvrta upotrebljava toplinske i mehaničke procese za uklanjanje materijala. Kao što je ranije navedeno, najvažniji standardni procesi u proizvodnji poluvodiča su 2 i $2\frac{1}{2}D$. Uvođenjem procesa s područja preciznog inženjerstva, realni 3D zahtjevi mogu se generirati uklanjajući glavna ograničenja s drugih proizvodnih shema. Tablica 2 sadrži pregled postignutih oblika s različitim načinima proizvodnje, s time da jednako tako sadrži i mjeriteljske zahtjeve za osiguranje kvalitete.

Tablica 2. Usporedba mogućnosti 4 temeljna načina proizvodnje mikrosustava [1]

osnovni materijal	metal		silicij			metal ili polimer		
metoda	fotorezist			napredno Si jetkanje		glodanje ili laser		
tvornička shema	1	2a	2b	3a	3b	4a	4b	4c
geometrija	2 ½ D	2 ½ D	2 ½ D	2 ½ D	2 ½ D	3D	2D	3D
broj slojeva koje je moguće nanijeti	1-3	1-3	1	1-3	1-3	∞		∞
točnost oblika Xy u μm i poravnanja Z u μm	2 1-5	2 1-5	2 1-5	5 1-5	5 1-5	1-10* 3-10	1-20* 3-10	1-10* 3-10
min.širina kanala u μm	5	5	5	10	10	20-200	20-200	20-200
max.dubina kanala u μm	200	200	200	500	500	∞**	∞**	∞**
max.omjer širine i duljine	20	20	20	10	10	7.5	7.5	7.5
raspon u ° bočni kut				0-20	0-20	0-90	0-90	0-90
točnost u °	1-5	1-5	1-5	1-2	1-2	0.3	0.3	0.3
hrapavost površine S _q Rms u nm							200-300	

* za mikroglodanje vrijednosti jako ovise o vrsti materijala i obliku (konkavni ili konveksni)

** za mikroglodanje vrijednosti ovise o promjeru alata

Mikrooptika

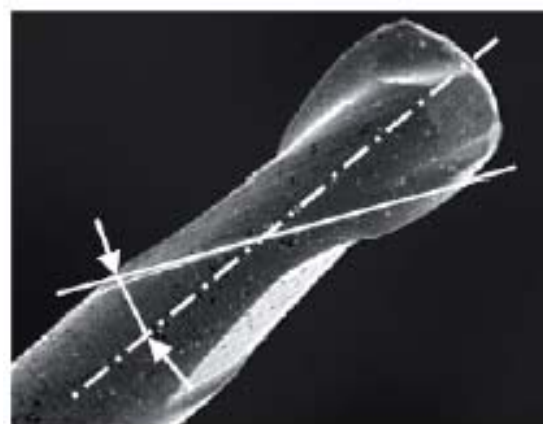
Mjerni raspon mikrooptike iznosi od nekoliko desetaka do nekoliko stotina μm. Za optiku je najvažnija trodimenzijska preciznost oblika i zbog toga je precizna montaža kritična za izvedbu komponenti. U proizvodnji mikrooptike do sada su prevladavale metode temeljene na litografiji, koje daju dvodimenzijske strukture. Druge proizvodne metode, kao primjerice ultraprecizna strojna obrada, omogućuju proizvodnju trodimenzijskih struktura za optičke primjene. Ultraprecizna strojna obrada se zbog smanjenja troškova izvodi s nekim paralelnim procesima kao npr. modeliranjem ili stakla ili polimera na visokim temperaturama. Neke karakteristične veličine koje se mjere mikrooptikom su hrapavost površine (R_a manji od 5 nm), karakteristične udaljenosti, točnost položaja (vlakana) itd.

Mikroalati

Stvarni 3D mikromjeriteljski problemi pojavljuju se npr. kod provjere mikroalata za strojnu obradu. Apsolutne vrijednosti promjenjivosti geometrijskih parametara alata imaju direktan utjecaj na učinkovitost procesa glodanja. Već kod uobičajenih veličina alata za glodanje postoje jaka ograničenja konvencionalnih mjernih metoda. Smanjenje veličine alata samo još više povećava probleme u mjerenju dimenzija alata. Na slici 12 prikazana su neka važna svojstva mikroalata za glodanje. Ona uključuju efektivni promjer alata, polumjer rezne oštrice, kut spirale i hrapavost natražne površine. Slika 12 prikazuje tipičnu SEM sliku $\varnothing 200 \mu\text{m}$ okruglog brida vrha glodala. Dimenzijsko mjeriteljstvo mora se jednako tako razvijati u vezi s otkrivanjem i kvantifikacijom trošenja ovakvog alata.



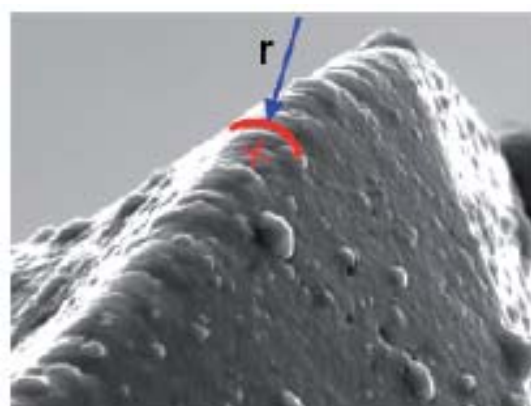
polumjer alata na sferičnom vrhu



kut spirale



hrapavost natražne površine



polumjer rezne oštrice

Slika 12. SEM slike mikroalata za glodanje [1]

Suspenzija pogona čvrstog diska

Evolucija montaže suspenzije za pogon čvrstog diska pokazuje mnoge promjene kroz konstantna poboljšanja u oblikovanju pogona u cilju konstantnog porasta izdržljivosti. Mjeriteljstvo u pohrani podataka industrije čvrstog diska napravilo je ključnu preobrazbu od laboratorijski temeljenih uređaja do *in-line* kontrole proizvodnje: današnji trend upotrebljava do 100% *in-line* mjeriteljskih testiranja, gdje su proizvodni parametri kao što su korak i nagib, donijeli uska dozvoljena odstupanja. Integrirani sustavi sposobni su mjeriti visinu, debljinu, profil, korak, nagib itd. u službi provjere suspenzije pogona čvrstog diska.

2.2 Mjeriteljski zahtjevi tipični za integrirane krugove (poluvodiče)

U mikroelektronici je poluvodička tehnika postigla izvanredne rezultate zahvaljujući jedinstvenoj tehnologiji, odnosno kombinaciji jednog materijala, silicija i jednog izradbenog postupka, planarne tehnologije. Kod integriranih se krugova svi procesi odvijaju unutar površine *wafera*. Međunarodna tehnološka mapa za poluvodiče opisuje očekivane razvojne trendove u ovom odvojenom području u sljedećih 15-20 godina.

Osnovni proizvodni slijed za integrirane krugove sadrži ogledne modele i procesne korake. Korak uzoraka uobičajeno se temelji na fotolitografiji gdje se maska projicira na fotorezist na silicijski *wafel* koji je projektiran za navedeni uzorak. *Wafer stepper* ili skener uobičajeno su primjenjivi unutar površine *wafel*-a. Procesni koraci uključuju rasprostiranje fotorezista i pečenje, jetkanje, očvršćenje, deponiranje i planarizaciju. Primjenom različitih kombinacija fotolitografije i procesnih koraka, integrirani krugovi tvore se metodom sloj po sloj. Rezolucija koja se može postići fotolitografijom određena je, a time i ograničena, tipom valne duljine svjetlosti, numeričke aperture optike i lokalnih postavki procesnih uvjeta. Dimenzijsko mjeriteljstvo u odnosu na takav tip proizvodnje, obzirom na činjenicu da su dimenzije u nanometarskim razmjerima, dodatno je komplicirano činjenicom da mjeriteljstvo treba biti *in-process*.

Parametri interesantni za dimenzijsko mjeriteljstvo u poluvodičkim poljima su sljedeći:

- kritične dimenzije (*CD – critical dimensions*) koje se odnose na širinu najmanjih struktura na integriranim krugovima;
- pokrivenost pripisana preciznosti maske kod polaganja;

- debljina filma i profil;
- širina linija hrapavosti.

Temeljeći prije navedeno na dimenzijsko mjeriteljstvo, područja kao što su materijali, analiza nečistoća, sastav primjesa, pogodnost senzora za proizvodnu kontrolu i referentni materijali u korelaciji s fizikalnim i kemijskim svojstvima daju sveukupni plan mjeriteljstva. Osim toga ponovljivost i stabilnost procesa na *wafere* ovisni su o kritičnim kvalitativnim parametrima za koje je potrebno osigurati sve tipove mjerenja.

Plan mjeriteljstva pokazuje razvojne trendove za specifične proizvode, prikazane tablicom 3. Jasno je da su kritične dimenzije mjera predvidivo smanjene kroz sljedećih 15 godina. Na temelju toga, prepoznate su izvedbene potrebe za dimenzijskim mjeriteljskim sposobnostima (izabrani zahtjevi dani su u tablici 4). Nije moguće ići u detaljan opis svih potrebnih zahtjeva. Preciznost vrijednosti u planu mjeriteljstva obično je navedena kao 3σ standardnog odstupanja i uključuje mjeriteljstvo pripisujući utjecaj od alata do alata. Nadalje, materijali, oblici i otpornost nisu specifično određeni, a provođenje mjernih tehnika mora biti izraženo neovisno o izvoru svojih grešaka. Ta činjenica nadalje povećava zahtjeve za mjeriteljskim sposobnostima. Unatoč tome, tablica 4 daje indikacije za zahtjevima određenim predviđenim razvojem. Općenito, trenutno ne postoji nijedno rješenje za zahtjeve nakon 2010. godine.

Tablica 3. Ključne karakteristike proizvoda srodne litografiji [1]

veličina u nm	2005.	2007.	2010.	2015.	2020.
DRAM ½ koraka	80	65	45	25	14
MPU/ASIC ½ koraka	90	68	45	25	14
FLUSH nekontaktni PolySi ½ koraka	76	57	40	23	13
MPU printana duljina staze	54	42	30	17	9
MPU fizikalna duljina staze	32	25	18	10	6

DRAM = dynamic random access memory (dinamička memorija slučajnog pristupa),

MPU = micro processor unit (mikroprocesorska jedinica)

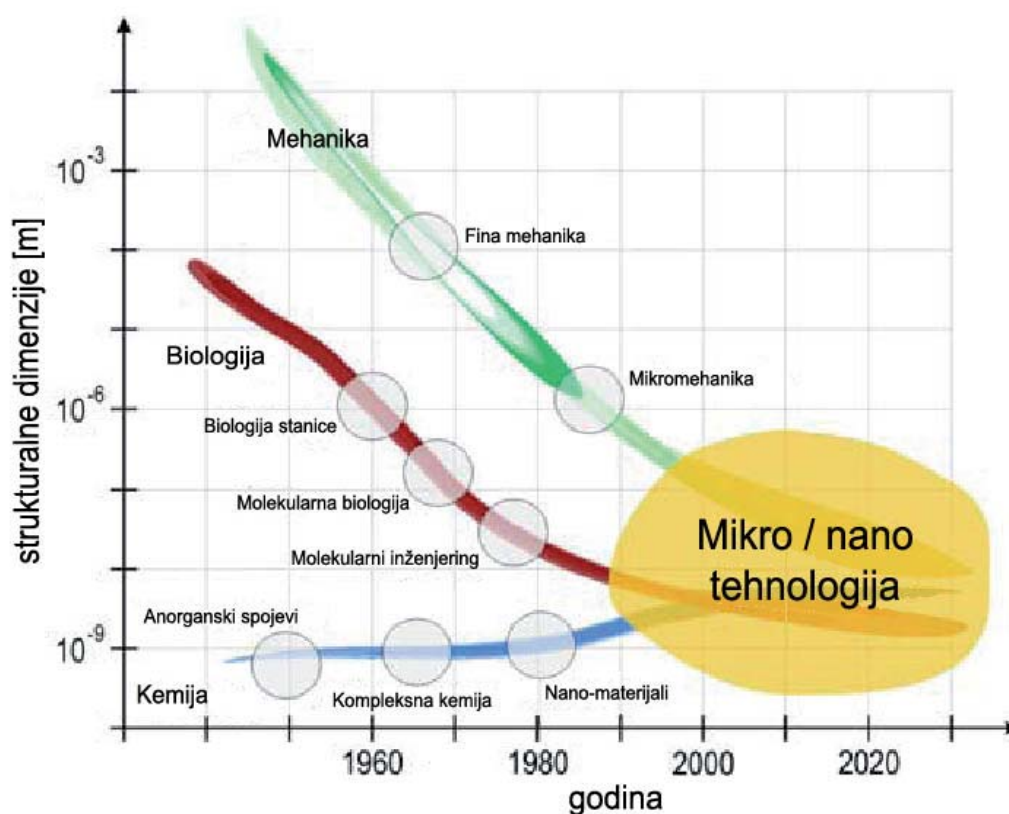
ASIC = application specific integrated circuit (integrirani krug specifične namjene)

Tablica 4. Izabrani zahtjevi mjeriteljstva za poluvodičke proizvode temeljene na mjeriteljskoj tehnologiji litografskih *wafera* [1]

veličina u nm	2005.	2007.	2010.	2015.	2020.
kontrola kritične dimenzije (gustoće linije brazdi)	8.8	6.6	4.7	2.6	1.5
<i>wafer</i> kritične dimenzije alata preciznog mjeriteljstva (izolirane linije)	0.67	0.52	0.37	0.21	0.12
širina linija hrapavosti	2.6	2.0	1.4	0.8	0.5
<i>wafer</i> prevlaka	15	11	8	4.5	2.5

2.3 Mjeriteljski zahtjevi u nanotehnologiji

Sve do nedavno definicija nanotehnologije bila je površna. Međutim, nanotehnologija proizlazi iz širokog niza znanstvenih područja koja konvergiraju zbog stalne minijaturizacije. Slika 13 prikazuje neke od bitnih značajki spajanja nekoliko tradicionalnih znanstvenih disciplina, ponajviše mehanike, biologije i kemije, u nanotehnologiju.



Slika 13. Prikaz bitnih značajki spajanja nekoliko tradicionalnih znanstvenih disciplina [1]

Prateći trend minijaturizacije, mehanika je 1960-tih godina prešla u finu mehaniku kada su kritične dimenzije dosegle 100 μm , a 20-tak godina kasnije, mikromehanika doseže do 1 μm . Tijekom ovog razvoja alati za proizvodnju značajno su se promijenili, a principi razumijevanja razvili su sve finije detalje. Temeljno razumijevanje temeljilo se na mehanici kontinuuma, gdje je atomska struktura tvari većinom zanemarena ili implicitno ugrađena u teoretske modele. Kada su kritične dimenzije dosegle razinu od 100 nm oko 2000. godine, tradicionalna strojna obrada postala je tehnički problematična. Koncept mehanike kontinuuma više nije primjenjiv jer atomska struktura materijala postaje direktno važna za mehanička svojstva materijala. To je znanstveni izazov za nanotehnologiju: tradicionalni koncepti više ne vrijede, a samim time i nazivi i parametri koji su se do tada koristili. Potrebno je razvijati nove koncepte i terminologiju koji će gotovo sigurno biti znatno kompleksniji za opis pojava nego oni na koje smo navikli.

Nanotehnologija uključuje istraživanje i proizvodnju bilo kojeg mehaničkog, električnog, kemijskog ili biološkog sustava s molekularnom montažom, tzv. "odozdogore" ili "odozgo-dolje" pristupa u minijaturizaciji procesa i proizvoda. To su strojna obrada i procesi u više koraka kod masivnog materijala (*bulk material*), npr. optičke komponente nanometarske ili podnanometarske točnosti koje se koriste za ultraljubičastu ili proširenu ultraljubičastu litografiju.

Kritična dimenzija u nanotehnologiji je dimenzija koja je važna za funkciju uzorka, a ona ne mora nužno biti jako mala. Nekoliko primjera kritičnih dimenzija:

- hrapavost ploče lima koja se koristi za proizvodnju karoserije automobila gdje je kritična sposobnost nanošenja boje (obojivost);
- rub u optičkom filteru za telekomunikaciju, gdje rub može biti velik nekoliko μm ;
- poroznost polimernih molekularnih membrana za naprednu isporuku lijekova;
- udaljenosti u molekulama gdje je funkcija povezana s određenom konfiguracijom.

Danas se nanotehnološki proizvodi mogu naći u farmaceutskoj industriji, mikroelektronici i preciznom strojarstvu. Nanotehnologija nije jednostavan sljedbenik mikrotehnologije. Ona označava nužan kraj znanosti o materijalu, prvenstveno zbog prelaska značajki materijala u značajke molekula. Moglo bi se reći da je nanotehnologija mjesto susreta svojstava molekula (uključujući atome) i svojstava materijala. Međutim, važnost molekularnih svojstava često je implicitna.

Mnogi mjerni zahtjevi u nanotehnologiji povezani su s površinama. Ovo se tiče ne samo dimenzijskih i geometrijskih, nego i kemijskih značajki. Tablica 5 daje primjere mjernih zahtjeva u nanomjeriteljstvu i prikazuje dimenzijske mjeriteljske zahtjeve i tipične probleme. Obuhvatniji pregled jako je složen zbog same prirode nanotehnologije kao što je već navedeno. Geometrija, kao i raspored nanostrukture, određene su upotrebom topološkog optimiranja.

Tablica 5. Primjeri dimenzijskih mjeriteljskih zahtjeva u nanomjeriteljstvu [2]

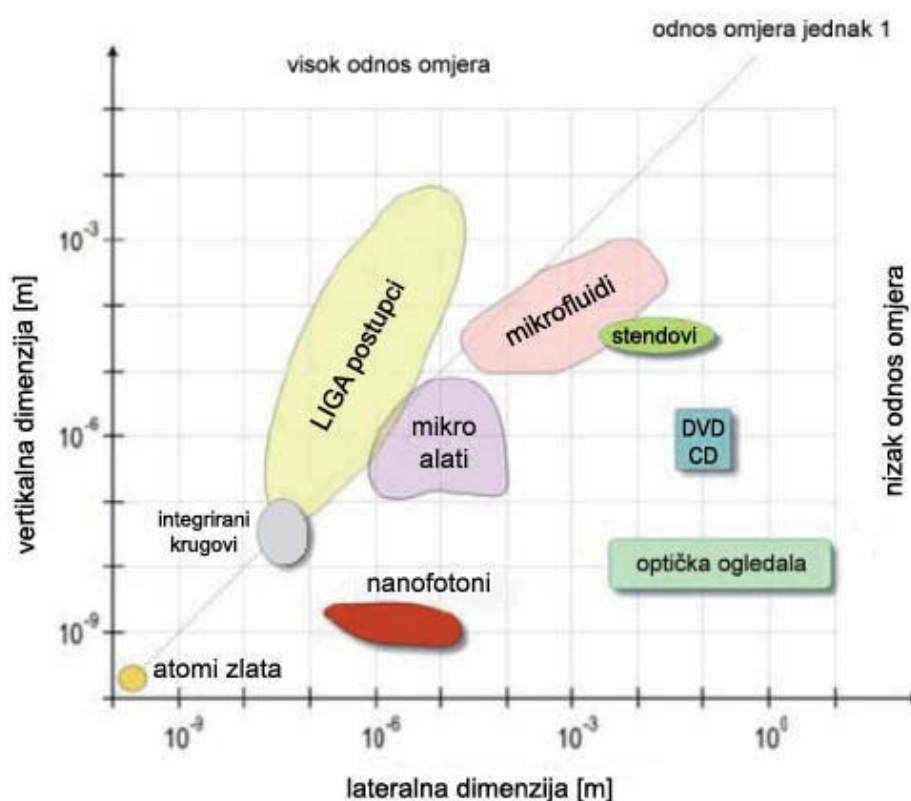
STRUKTURA	MATERIJAL	MJERNI ZAHTJEVI	MJERNI RASPON	DOZVOLJENA ODSTUPANJA/ MJERNA NESIGURNOST
slojevi na čvrstom disku	organski i anorganski	debljina sloja; hrapavost; mehanička svojstva	100mm x 100mm x nekoliko 10 nm	/ $<$ 1 nm
višeslojni x-ray reflektori	anorganski	debljina pojedinih slojeva	nekoliko cm^2 do m^2	/ $<$ 0,1 nm
supstrati za x-ray reflektore	ULE keramika; kvarc	oblik hrapavost	nekoliko cm^2 do m^2	1 nm / $<$ 0,1 nm rms
magnetska struktura na čvrstom disku	metal, organski slojevi	oblik i dimenzije; magnetska svojstva	100 μm x 100 μm x nekoliko 10 nm	nekoliko nm
kvantne točke	poluvodiči	oblik i dimenzije; optička svojstva	100 μm x 100 μm x nekoliko 10 nm	/ nekoliko nm
nanomotor	ugljik, oksidi, metali	oblik i dimenzije; hrapavost	100 μm x 100 μm x 100 nm	/ ~ nm / 1 nm rms
rešetka za komunikacijska vlakna	staklo; organsko	(gradijent) konstante rešetke; razmak pojedinačnih linija	nekoliko 100 μm x 100 μm x nekoliko 10 nm	$<$ 1 nm $<$ 1 nm

Zaljučak je ovog poglavlja da integracija nekoliko zahtjeva povećanja u dužinskoj skali u komponentu povećava složenost dimenzijskog mjeriteljstva.

Razmatrajući primjerice mikrofluidni sustav koji se temelji na analizi upotrebe vrsta brazde (dimenzije u nanometarskom opsegu). Širina i dubina kanalića fluida mogu biti nekoliko stotinki μm , a ukupna veličina polimernog čipa s uređajima za priključivanje fluida je nekoliko mm. Da bi se osigurala prikladna funkcionalnost takvog sklopa potrebno

je izvršiti dimenzijska mjerenja koja se protežu 4-6 razina mjernih skala. Očito je da to ne može zadovoljiti niti jedan mjerni uređaj.

Slika 14 daje predloženi prikaz mjeriteljskih zahtjeva koji se temelji na principu tipičnog *Stedman*-dijagrama, te zbog toga ne sadrži informaciju o geometrijskoj složenosti.



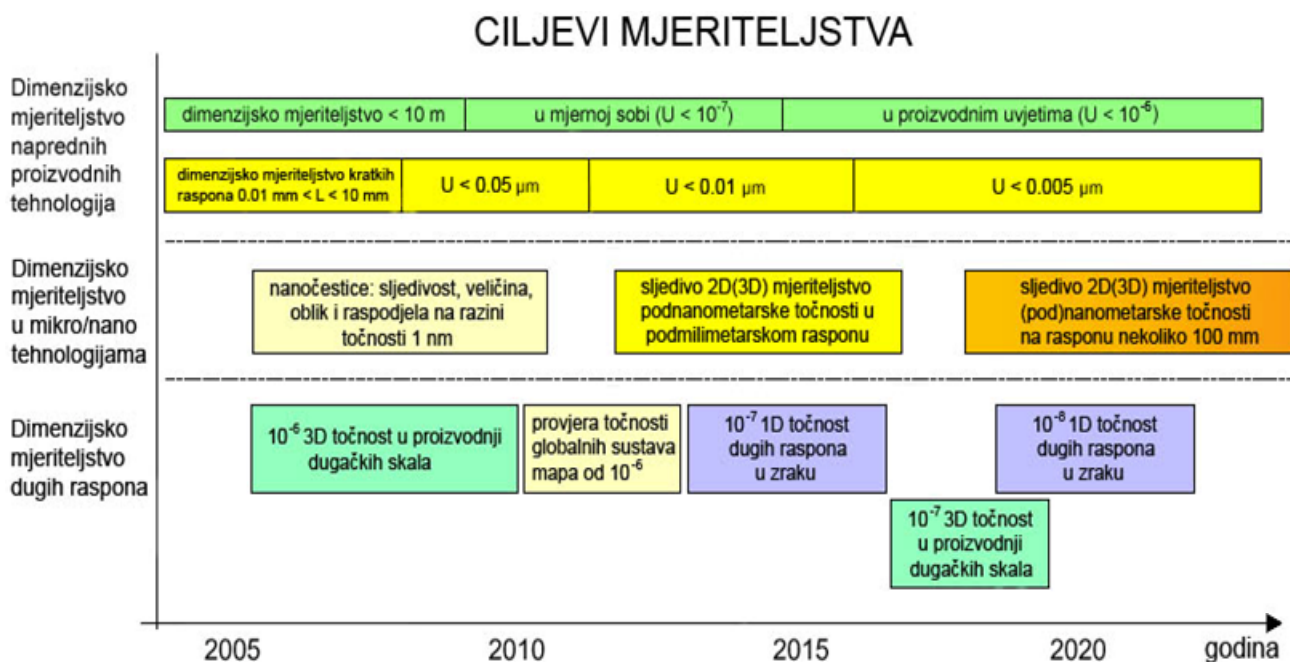
Slika 14. Izabrane komponente za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo [1]

Potrebe koje se iskazuju kod mjeriteljskih zahtjeva u mikro/nano režimu:

- Mikro i nano veličine komponenti tvore vrlo heterogeni skup uključujući veliko područje različitih materijala, različita mjerenja i naravno velike dimenzijske raspone. To ukazuje da raspon mjernih tehnika mora biti velik, a također vrlo velike trebaju biti i odrednice u pronalaženju najprikladnije metode,
- Primjena visokog odnosa omjera postoji, ali mnoge su primjene još uvijek s odnosom omjera ispod 2. Ipak, male apsolutne dimenzije ($< 1 \mu\text{m}$) postavljaju teškoće za dimenzijsko mjeriteljstvo s odnosom omjera oko 1,

- Potrebe za 3D analizom postoje, ali se očekuje njihov rast pogotovo za apsolutne dimenzije ispod 100 nm,
- Tipično je da se specifikacije za dimenzije i/ili geometriju proizvoda ili komponenti u tom zasebnom režimu zapravo protežu kroz nekoliko redova veličina,
- Za mnoge komponente i proizvode u ovom režimu upotreba dozvoljenih odstupanja je vrlo slaba, ako uopće i postoji.

Projekt *IMERA (Implementing Metrology in the European Research Area)* u svojim tehnološkim mapama predviđa postizanje određenih ciljeva do 2020. godine i kasnije, na područjima kao što su dimenzijsko mjeriteljstvo za napredne proizvodne tehnologije, dimenzijsko mjeriteljstvo u mikro/nanotehnologijama i dimenzijsko mjeriteljstvo dugih raspona. Takvi ciljevi dimenzijskog mjeriteljstva u nadolazećim godinama prikazani su slikom 15.



Slika 15. Ciljevi dimenzijskog mjeriteljstva u raznim područjima tehnologija

3 OPIS MJERNIH METODA I UREĐAJA NA PODRUČJU MIKRO I NANOMJERITELJSTVA

Opis mogućih metoda i tehnologija za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo dan je u sljedećem poglavlju. Te će metode i tehnologije biti opisane uzimajući u obzir principe rada, raspone, rezoluciju, stupnjeve industrijske primjene, primjere primjene itd. Opis je podijeljen u sljedeća poglavlja ovisno o mjernim principima:

- tehnologije koje se temelje na interferometrijskim mogućnostima,
- uređaji mikrotopografskog mjerenja,
- skenirajući elektronski mikroskop (SEM),
- mikro i nanokoordinatno mjeriteljstvo,
- mikroskopske tehnike skeniranja pomoću ticala (*scanning probe microscopy* – SPM tehnike),
- ostale tehnike.

3.1 Interferometrijske mogućnosti

Primarni etalon duljine koristi stabilizirani laser koji proizvodi stabilnu optičku frekvenciju koja se može koristiti za interferometar. Laserska cijev se sastoji od dva visoko reflektirajuća ogledala, tako da laser osigurava njegovu stabilnost frekvencije prema *Fabry-Perot* cijevi. To pokazuje da se interferometrija pojavljuje u svemu što se odnosi na točnost i sljedivost mjerenja pomaka i dimenzija. Kapacitativni i induktivni senzori mogu isto tako ostvariti podnanometarsku rezoluciju na malim rasponima, a na linearnim skalama konkuriraju interferometrijskim tehnikama na velikim rasponima; ipak, kada dođe do pojave nesigurnosti i sljedivosti ti se senzori trebaju umjeravati interferometrijskom tehnikom. Međutim, i u interferometrijskim tehnikama postoje izvori sustavnih odstupanja koje mogu dati neočekivana odstupanja u mjerenju koje se odnosi na nesigurnost na nanometarskoj razini. U ovom poglavlju raspravljat će se o najčešće korištenim interferometrijskim mjernim tehnikama, interferometriji pomaka i površina, te raspravljati o njihovim glavnim izvorima grešaka.

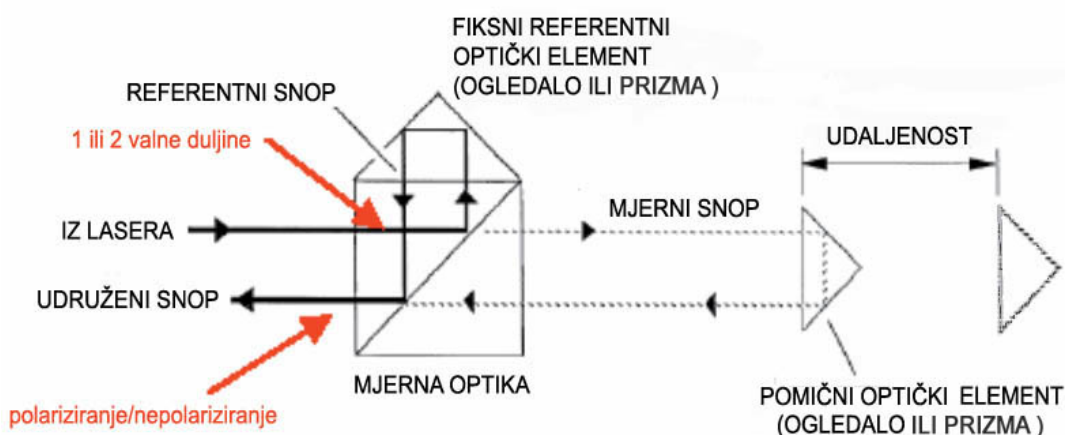
Interferometrija pomaka

Interferometar pomaka baziran je na svjetlo–tamnim prugama dobivenim klasičnim *Michelson*-ovim interferometrom, gdje se plansko ogledalo premješta kao reflektor. Na slici 16 prikazano je podešenje zajedno s čestom varijacijom koja se koristi. Optika može biti polarizirajuća i nepolarizirajuća, a uglavnom je riječ o polariziranoj. Prema tome, glavna razlika je da li sustav radi s jednom frekvencijom – to je homodini interferometar ili s dvije frekvencije koji nazivamo heterodini interferometar. Proizvođači nude velike argumente oko prednosti nekog sustava u odnosu na neki drugi, ali ovdje je važno napomenuti da oba sustava u konačnici mjere pomak d koji se računa kao broj N polovice valnih duljina λ plus razlomak koji se obično naziva faznom promjenom $\Delta\varphi$. Pomak d računa se kao:

$$d = \frac{\lambda}{2} \cdot \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right)$$

Ova jednadžba pokazuje ujedno i glavni izvor grešaka: valnu duljinu, zbroj i faznu razliku. U modernim sustavima, rezolucija iznosi između 10 i 0.1 nm.

Ta rezolucija ne znači odmah da se nanomjeriteljstvo može provesti s tim sustavima. Snopovi koji se odnose na sliku 16 su u milimetrima u promjeru, prema tome makroskopski. Nanometarska rezolucija postiže se samo u smjeru propagacije snopa. Zbog toga je laserska interferometrija pomaka 1D tehnika. Za završno mjerenje i detekciju mikro i nano oblika, laserska se interferometrija mora uvijek kombinirati s mehanizmima i tehnikama ispitivanja i detekcije.



Slika 16. Osnovno podešenje interferometarskog sustava pomaka [1]

Raspon ovisi o koherenciji duljine izvora koji se upotrebljava i može biti reda veličine 300 nm za bijelu svjetlost, u centimetrima za spektralno svijetlo, jedan do deset metara za komercijalno dostupne laserske interferometre i krajnje: npr. u kilometrima za interferometrijsku valnu detekciju po markiranim ciljevima.

Utjecaj okoliša

Valna duljina ovisi λ o frekvenciji f i indeksu loma zraka n kao:

$$\lambda = c / n \cdot f$$

gdje je c brzina svjetlosti. Indeks loma zraka ovisi o tlaku zraka, temperaturi, vlažnosti i sadržaju CO₂. Ako je jedan od tih podataka poznat, postoje standardne jednadžbe za izračunavanje indeksa loma s nesigurnošću od nekoliko 10⁻⁸. Odstupanja u svakom parametru okruženja za dobivanje odstupanja od 10⁻⁶ na duljinu iznose za tlak 4 hPa, za temperaturu zraka 1.1 °C, za vlažnost 100% i za CO₂ sadržaj 0.6%. Posljednje dvije su nerealne vrijednosti; ti faktori postaju važni samo za relativnu nesigurnost ispod 10⁻⁶. Na tom području, direktno mjerenje loma svjetlosti može biti korisno; to područje obično se odnosi na lom zraka.

Frekvencija f postiže se obično sa stabilizirajućim He-Ne (helij-neon) laserskim izvorom sa stabilnošću ispod 10⁻⁸, koji obično upotrebljava tehniku stabilizacije koja je uspješno riješena i rijetko kada uzrokuje probleme. Ako je izvor laserska dioda, ona može biti izvor problema.

Periodičke pogreške

Periodičke pogreške su pogreške odlučujuće u lomu valnih duljina; faze $\Delta\varphi$, koje su periodičke kao ponavljajuće za svaku vrijednost N s istom fazom $\Delta\varphi$. Takve pogreške zovu se još i nelinearne. Uobičajeno, faza se određuje uzimanjem unutrašnje i vanjske faze mjerenja mjernog signala u faznoj kvadraturi. U heterodinom interferometru to se svodi na mjerenje elektroničke faze. U homodinom interferometru, intenzitet je mjeren u isto vrijeme kada je mjeren s faznim pomakom 90°. Greške se javljaju kada kontrast interferometrijskog signala nije savršen i isto tako kada fazni pomak signala nije pomaknut

za točno 90° . Generalno, homodini interferometri su ponešto osjetljiviji na taj efekt. U drugu ruku, korekcija je lakša za homodini interferometar. Općeniti model greške i kompenzacijske metode koje se većinom upotrebljavaju dane su prema *Heydemann*-u. Ostali izvori grešaka koji daju takva periodička odstupanja su nesavršena polarizacija usmjerivača snopa i usporivača, kao i nesavršena polarizacija ulaznih snopova u slučaju heterodine interferometrije. Bez mjera, one mogu davati odstupanja počevši od nekoliko desetaka nanometara za homodine do nekoliko nanometara za heterodine sustave. Proširena istraživanja u modeliranju i ispravljanju tih efekata već su iznešena u stručnoj literaturi.

Problem kod tih metoda je taj da one koriste "*Heydemann*-elipsu" kao cjelokupan model i daju takvu sljedivost "u sebi" koja odgovara, ali je teška za provjeru neovisnosti i može biti nepotpuna i javlja se npr. kod sjene refleksije.

Zbog toga se isto tako iskorištavaju i alternativni putevi za određivanje i umjeravanje faznog kuta $\Delta\phi$, kao što su izoštravanje interferencijskog vrha upotrebom *Fabry-Perot* interferometra i kapacitativnog pretvarača ili frekvencijskog pomaka laserskog izvora.

Sljedeće područje interferometrije s podnanometarskom rezolucijom je interferometrija X-zraka. Ovdje je skraćena efektivna duljina valne duljine na 0,2 nm upotrebom interferometra s X-zrakama, postizanjem pikometarske rezolucije. Raspon ovog vrlo osjetljivog i nježnog uređaja obično je ograničen na nekoliko stotina mikrometara, pa se zbog toga često kombinira s ostalim tehnikama npr. prije spomenutom laserskom interferometrijom.

Primjena interferometrije pomaka

Laserski interferometri upotrebljavaju se u numeričkoj primjeni gdje se traži smanjenje nesigurnosti do podnanometarskog područja. Njegova izravna primjena u nanomjeriteljstvu je umjeravanje jednodimenzijske skale (1D). To se događa na mikroskopskoj skali s podnanometarskom rezolucijom, ali isto tako i na većim skalama duljine u nanometarskoj rezoluciji gdje se može dobiti nesigurnost. U *wafer* stepperu i skeneru, laserski su interferometri masovno zastupljeni u nanomjeriteljstvu u tehnologiji kao mjeriteljska baza u proizvodnji čipova. Ako se nanometarska nesigurnost mora održavati na brzinama skeniranja u metrima u sekundi, tada čak i relativan efekt može

postati značajan. U mikro i nanokoordinatnom mjeriteljstvu oni mogu isporučiti direktnu sljedivost pri detekciji pomaka osi. Kada je riječ o sljedivosti prema međunarodnim etalonima, laserski interferometrički sustavi su gotovo uvijek povezani s primarnim (laserskim) etalonima. U određenom članku opisan je i XYΘz površinski enkoder s 20 nm rezolucijom temeljen na interferometriji pomaka.

Interferometrija površine

Interferometrija površine može se smatrati kao vrsta inerferometrije pomaka i koristi se upravo u slučaju čitave sile fotodetektora npr. CCD-kamera. Fazna (statička) razlika između nekoliko područja na površini smatra se reprezentativnom za oblik površine. Površinska inerferometrija može biti prikazana u klasičnom *Michelson* i *Fizeau* podešenju. Jednadžba vrijedi za udaljenost između referentne površine i površine koja se mjeri. Za najpovoljniji kontrast intenzitet je proporcionalan:

$$I \propto 1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta z); \quad I(x, y) \propto 1 + \cos[\varphi(x, y)]$$

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi z(x, y)}{\lambda}$$

Kao i u interferometriji pomaka, z koordinata u smjeru snopa može biti detektirana s podmikrometarskom rezolucijom sve do podnanometarske. Ovdje su spomenuti neki aspekti koji se odnose na mikro i nanomjeriteljstvo.

U slučaju makroskopskog ogledala (promjera 100 mm do metra) čiji oblik odstupa (od ravnoće, sferičnosti, parabolčnosti itd.) i umjerava se s nanometarskim odstupanjem, može se postaviti pitanje treba li to nazivati nanomjeriteljstvom. Jedan parametar, oblik odstupanja, može biti korisno izražen u nanomjeriteljstvu, ali lateralna rezolucija mogla bi biti u puno milimetara u takvim slučajevima. Zato se to područje marljivo istražuje; također u odnosu prema mjerenju oledala za dubinske UV primjene, gdje se zahtjeva podnanometarsko odstupanje od idealnog oblika; to se mora umjeravati na granici tehnoloških mogućnosti, ali su makroskopske veličine još uvijek uključene s lateralnim rezolucijama od puno mikrometara.

U slučaju kada se radi o interferometrijskoj mikroskopiji, podnanometarska rezolucija može se postići u smjeru širenja snopa, međutim ako je potrebna podmikrometerska i podnanometarska rezolucija u x i y lateralnom smjeru, direktne optičke metode manjkave su radi postojanja lomnih (difrakcijskih) ograničenja. Lomno (difrakcijsko) ograničenje dato je izrazom:

$$d_l \approx \lambda / 2 \cdot N.A.$$

s d_l kao rezolucijom, λ valnom duljinom i $N.A.$ numeričkom aperturom objektivu. To ilustrira da se u vidljivoj svjetlosti, gdje je potrebna lateralna rezolucija, optički mikroskop može koristiti upravo u mikromjeriteljstvu, ali svakako ne i u nanomjeriteljstvu. Suprotno interferometriji pomaka, ovdje je raspon mali zbog ograničene fokusne dubine. Taj raspon može biti smanjen u primjeru kada se želi postići viša i nedvosmislenija (točno određena) rezolucija u podnanometarskom području pomoću širenja raspona valne duljine: to se naziva bijelosvjetlosna interferometrija. Kada se površina pomiče relativno prema objektivu u smjeru duž širenja snopa, cjelokupni površinski profil može se dobiti snimanjem položaja bijelosvjetlosne interferencije za svaki piksel; na taj način proširuje se raspon. To je, uz konfokalnu mikroskopiju, najčešća i uobičajena tehnika korištena u optičkom profiliranju površine.

3.2 Uređaji za ispitivanje mikrotopografije

Uz spomenute obične mikroskopske tehnike, principijelne metode topografskog mjerenja površine su profilometrija ticalima, tehnike optičkog skeniranja i mikroskopske tehnike skeniranja pomoću ticala (SPM tehnike). Te metode, temeljene na snimanju tečevina topografskih podataka točku po točku, daju kvantitativnu informaciju o visinama (razinama) s obzirom na poziciju. Svi ti tipovi uređaja dobro su poznati i zato će biti prikazan samo kratki opis prema primjerima primjene za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo.

Kod uređaja s ticalom, ticalo pomiče iglu konstantnom brzinom po površini i pretvara u električni signal pomoću pretvornika. Ta vrsta uređaja može proizvesti vrlo precizna mjerenja u laboratoriju kao i u industrijskom okruženju, pokrivajući vertikalni raspon do nekoliko mm nanometarskom rezolucijom, s mogućim lateralnim snimanjima

do stotinke mm. Ticalo je tipično opremljeno dijamantnim vrhom s kutem stošca (potpuno uključen kut) od 60° do 90° i vrhom polumjera u rasponu 1-10 μm . Maksimalne detektabilne nagibe koje koristi uređaj s ticalom su kako slijedi, 60° i 45° . Prostorna rezolucija koja se može postići tom metodom, općenito u rasponu od 2-20 μm , ograničena je geometrijom i ovisi o trenutnoj površini nagiba i visine (razine) u blizini točke kontakta. Štoviše, sila koja se primjenjuje na površinu kod ticala, može proizvesti plastičnu deformaciju površine, čineći tu metodu neprimjenjivom za površine koje su meke ili gdje je moguće oštećenje (pojava ogrebotina).

Optičke tehnike skeniranja sadrže većinom tipične optičke profilometre, konfokalne mikroskope i interferometre. Optičke metode su nekontaktne što omogućuje mjerenja na mekim površinama. Bilo kako bilo, ta vrsta uređaja predmet je mjerenja grešaka u odnosu na dostizanje korisnog signala refleksije od površina koje su sjajne ili prozirne izvoru svjetlosti. Optička sonda za profilometriju može se temeljiti na autofokusu signala laserskog svjetlosnog detektora. Snop ima promjer oko 1 μm i taj se tip uređaja koristi isto kao i konvencionalni uređaji s ticalom, s vertikalnom rezolucijom približno 5 nm. Maksimalni registrirajući nagib površine ili površinskih oblika koristeći autofokusirajuće uređaje s ticalima je otprilike 15° . Laserski skenirajući konfokalni mikroskopi su druga optička tehnika koja se temelji na principu detekcije fokusa gdje je jedan element površinske slike (piksel) prikazan u vremenu. Topografija se rekonstruira kao slijed vertikalnih optičkih presjeka, vrlo slično kao računalna tomografija. Konfokalni mikroskopi omogućuju odrediti strme površinske detalje, maksimalnim detekcijskim nagibom ispod 75° . Konfokalni mikroskopi imaju ograničenu lateralnu rezoluciju, a neki komercijalno dostupni uređaji čak i vertikalnu rezoluciju. Interferencijska mikroskopija kombinira optički mikroskop i interferometarski objektiv kao jedan uređaj. Te optičke metode dozvoljavaju nekontaktna mjerenja na osnovnoj ravnoj površini. Interferometrijske metode nude podnanometarsku vertikalnu rezoluciju, razvijene su za površinu s prosječnom hrapavosti ispod 0.1nm i visine vrha i dola sve do nekoliko mm. Interferometrijski mikroskopi ograničeni su u odnosu na nagib površine od konačne numeričke aperture. Štoviše, lateralna rezolucija je ograničena difrakcijom. Maksimalni registrirajući nagib koristi interferometriju do iznosa kuta od 30° .

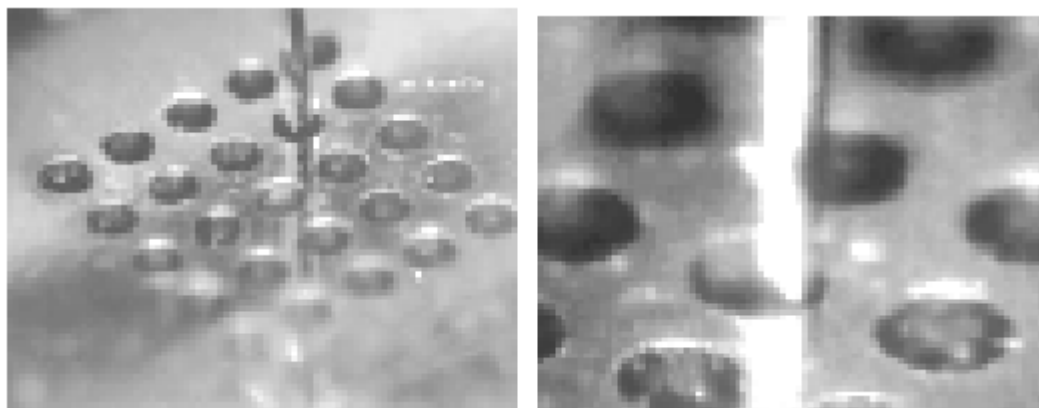
Općenita razmišljanja o mjernim sposobnostima tih tipova uređaja mogu se primjerice sumirati kao u tablici 6. Za sve optičke uređaje nekontaktna priroda je jasna odlika. Za isti tip uređaja prisutni su nedostaci sljedivog oglednog umjeravanja i procedure. Nekoliko je primjera nađeno gdje su različiti uređaji uspoređeni na temelju

mjerenja mikrokomponentata. Takva usporedba predočena je uključujući fokusnu detekciju laserskog skenirajućeg uređaja za ispitivanje profila, konfokalnog skenirajućeg laserskog mikroskopa i bijelosvjetlosnog interferometra za mjerenje plastičnih površina. Opisana je laserska konfokalna mikroskopija za 3D analizu mikrostruktura, kao što su dijelovi za mikroinjekcijsko kalupljenje, strukture laboratorij-na-čipu, mikroršetke itd. Dvojba o visokorezolucijskim dosezima (potrebama) i željenom širinom raspona bila je riješena primjenom trodimenzijskog povezivanja procedure s visokopovećavajućim optikama.

Tablica 6. Uređaji mikrotopografije površine i njihova upotreba za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo [1]

princip	odlike	ograničenja	primjeri primjene
ticalo	sljedivost; dugi raspon (X, Y i Z)	sila mehaničkog dodira; geometrija vrha	industrijske površine
autofokus	skeniranje točku po točku	ograničena lateralna rezolucija; maksimalni detektabilni nagib otprilike 15°	meki materijali
bijelosvjetlosna interferometrija	brza metoda; visoka vertikalna rezolucija (podnanometarska)	ograničena lateralna rezolucija; maksimalni detektabilni nagib otprilike 30°	hrapave ili ravne površine; debljina filma; MEMS s malim odnosom omjera
konfokalni	strukture visokog odnosa omjera; maksimalni detektabilni nagib do 75°	ograničena lateralna rezolucija; ograničena vertikalna rezolucija	MEMS s visokim odnosom omjera
SPM	nanometarska rezolucija	spora metoda; ograničen raspon (X, Y i Z)	"nano"

Objavljena je i metoda za 2D profiliranje visokog odnosa omjera mikrostrukture. Uređaji se temelje na specijalno razvijenom silicijskom mikroticalu (dužine 1 mm), poprečnog presjeka $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ koje vibrira pomoću piezoaktuatora. Ta se metoda zove vibroskeniranje s mjernom rezolucijom manjom od $\pm 35\ \text{nm}$. Duljina opisanog vrška je $7.2\ \mu\text{m}$ s promjerom zakrivljenja manjim od $50\ \text{nm}$. Tehnika je korištena za mjerenje mikroprovrtâ promjera $80\ \mu\text{m}$ i dubine $200\ \mu\text{m}$. Vidi sliku 17 za ilustraciju.



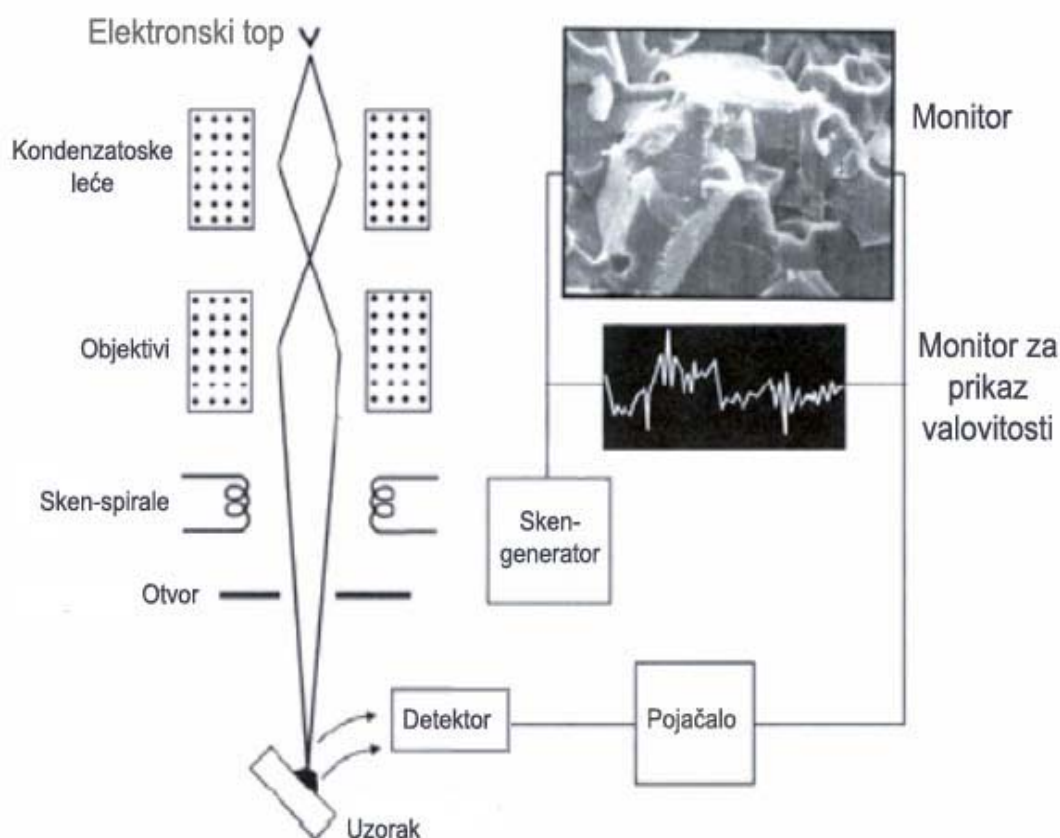
Slika 17. Primjer mjerenja mikroprovrtâ ($\varnothing 80\ \mu\text{m}$) pomoću mikroticala [1]

Postoji i opis uređaja temeljen na visokoj točnosti 3D pozicionirajućih uređaja kombiniranih s fiksnim optičkim fokusnim detekcijskim senzorom korištenim za DVD-e. Sljedeći stacionarni STM senzor koristi se kao tzv. *null*-indikator. 3D pozicionirajući uređaj opremljen je laserskim interferometrima, a sustavi ticala koriste se samo kao okidači za *read-out* laserskih interferometara. 3D pozicionirajući uređaj ima raspon od $25\ \text{mm} \times 25\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ s rezolucijom od $0.1\ \text{nm}$.

3.3 SEM - skenirajući elektronski mikroskop; SEM tehnike

Skenirajući elektronski mikroskop (SEM) je mikroskopska metoda koja postoji već nekoliko desetljeća. Temelji se na skeniranju elektronskog snopa na uzorku. Interakcija između snopa i površine uzorka vodi do nekoliko emisija, koje se mogu detektirati i upotrijebiti za karakterizaciju fizikalnih i kemijskih svojstava koja se istražuju. Među ostalima, to je moguće i sa SEM-om, da bi se dobio topografski prikaz. U pogledu na topografiju SEM ima neka jedinstvena svojstva koja se, kombinirana zajedno, ne mogu mjeriti s nijednom drugom mikroskopskom tehnikom. To uključuje: razinu povećanja

(100x do 100000x), rezoluciju ispod 2 nm (za najviše povećanje), veliko područje dubine, veliku radnu distancu (omogućujući višestruku pozicijsku strategiju), sposobnost analize elemenata i minimum difrakcijskog (lomnog) efekta. Neki nedostaci, uspoređujući optičku mikroskopiju, zahtijevaju obično upotrebu visokog vakuuma, relativno niski protok, potencijal za napajanje uzorka, elektronsku interakciju snop/uzorak itd. Princip je ilustriran slikom 18.



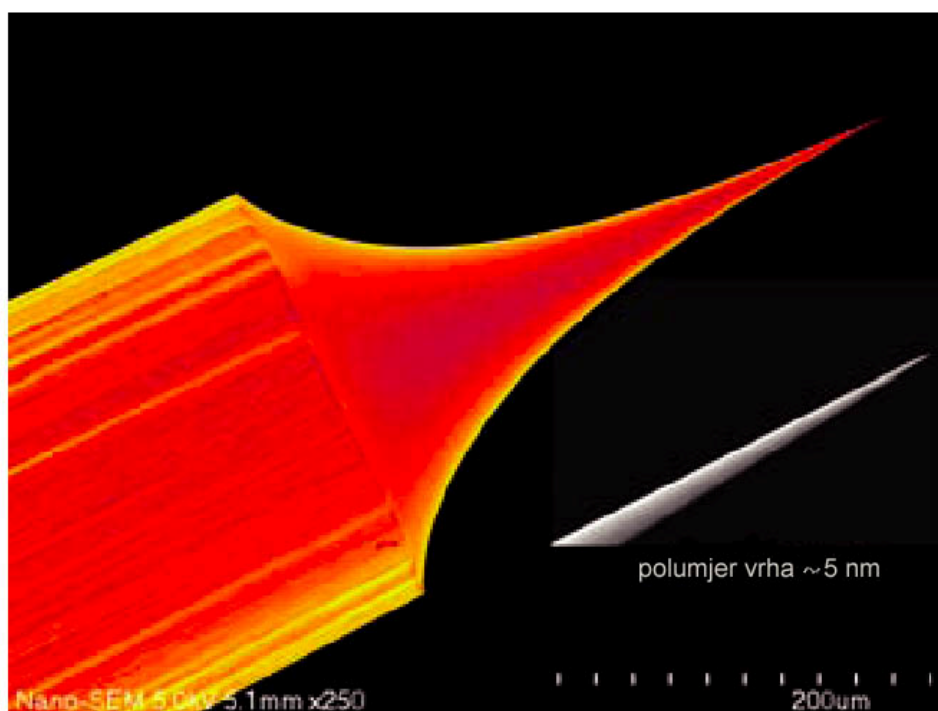
Slika 18. Princip mjerenja SEM-om [1]

SEM se također može koristiti za kvalitativnu površinsku topografsku analizu, prvenstveno temeljenu na činjenici da SEM dozvoljava izvrsnu vizualizaciju postignutu putem vrlo visoke dubine fokusa u toj tehnici. Međutim, SEM fotografije još su svojstvene 2D i ne mogu se dobiti informacije visoke razine izravno iz slike. Osim toga, umjeravanje skale i određivanje mjerne nesigurnosti preduvjet je za korištenje SEM slike za kvantitativnu analizu.

2D SEM

Upotreba SEM-a za dimenzijska mjerenja visoke točnosti realizira se interpretacijom elektronskog prikaza uzorka (slike ili mikrografa). Pod tim se podrazumijeva da sva iskrivljenja slike direktno utječu na točnost. U slučaju 40 nm tranzistorskog ulaza, proizvodnja specificira koso mjerenje manje od 4 nm i ponovljivost od 0,7 nm.

SEM slika općenito pokazuje linije kao fotorezist na siliciju s karakterističnim jasnim bridom. Na mjernu nesigurnost u mjerenju širine linije ili kritične dimenzije utječu činjenice da jasnoća područja prezentirana linijom (ili vratima) brida u SEM slici nije oštra u nanometarskoj skali. Svaka "zona" brida može biti široka desetke nanometara i varijacije intenziteta slike unutar te zone ovise o karakteristikama oblika brida i parametara uređaja. Nekoliko parametara uređaja utječe na te performanse. Pozicija elektronskog ticala idealno mora biti poznata unutar manje od 1 nm u osiguravanju moguće točnosti mjerenja na malim uzorcima. Vibracije i skretanje snopa određuju točnost. Jasnoća elektronskog izvora određena je iznosom stvarne sposobnosti fokusiranja na točku. Konačno, duljinom elektronskog izvora određen je nivo rezolucije. Iz tog su se razloga nanovrhovi razvili i testirali kao elektronski izvori (slika 19).



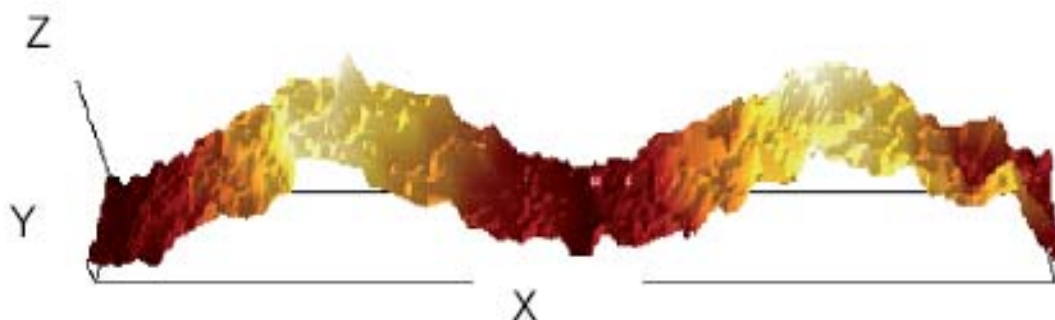
Slika 19. Volframski nano-vrh [1]

Da bi se mogla optimizirati mjerna točnost potrebno je oblikovati karakteristike elektronskog topa, kao i međudjelovanje elektronski snop/uzorak. Ako se uspoređuje fizikalno svojstvo objekta u iznosima makro skale tada je generirani elektronski signal ograničen za nano-strukturu.

Daljnji razvoj prema eliminaciji nepoželjnih nuspojava je u upotrebi različitih pritisaka/okolišnih uvjeta kod skenirajućih elektronskih mikroskopa. Taj tip uređaja nudi prednost više energije (zamišljenu pri višim rezolucijama), različite kontraste mehanizme i neutralizaciju napajanja (zamišljajući neprovodljive primjerke bez metalnih prevlaka).

3D SEM

SEM slike su u stvarnosti dvodimenzijske i formirane su na varijaciji intenziteta sjaja poredanih u pikselima dobivenih od elektronskog snopa skenirajući pravolinijski preko površine uzorka. Da bi se rekonstruirala treća dimenzija površinske teksture, može se koristiti metoda fotogrametrije. 3D informacije mogu se postići rekonstrukcijom stereo para ili trostruke SEM skenirane slike koje se koriste za izradu površinske topografije, ali je ograničena brojnim faktorima. Prije svega, SEM mjerenja zahtijevaju vodljiv materijal uzorka ili pripremu uzorka prevlačenjem površine slojem zlata. Glavno ograničenje je u tome da se parametri hrapavosti računaju preko relativno velike površine duže vrijeme, a u slučaju velikog povećanja, površina je relativno mala. Drugo ograničenje je da je glatke površine teško rekonstruirati malim ili nikakvim oblicima. Slika 20 prikazuje rezultate 3D rekonstrukcije jednog ISO tipa C etalona hrapavosti. Procijenjeno je da su lateralne dimenzije utvrđene zadovoljavajuće, dok su primjećena odstupanja u redu veličine od 20% za vertikalne dimenzije.



Slika 20. Primjer 3D rekonstrukcije ISO tipa C etalona hrapavosti mjenog SEM-om [1]

Skala: X - 520 μm , Y - 60 μm , Z - 16.5 μm

3.4 Mikro i nanokoordinatno mjeriteljstvo

Mjeriteljski okviri

Uzevši u obzir uobičajeni koordinatni mjerni uređaj (CMM) i razmišljajući o mikro i nanomjeriteljstvu, dolazi se do želje za minijaturizacijom takvog stroja; posebno ticala, tako da se mogu mjeriti male veličine. Manji okvir od onog uobičajenog u metrima, mogao bi dati potrebnu čvrstoću i stabilnost za postizanje podmikrometarske nesigurnosti u sva tri smjera. Sagledavajući s druge strane, želja je da AFM uređaji imaju mjerni raspon u mm umjesto u mikrometrima, te da budu učinkovitiji u mjerenjima specifičnih oblika umjesto ukupne površine.

Ta se dva svijeta spajaju u nečemu što ćemo zvati mikro i nanokoordinatno mjeriteljstvo. Posljednjih godina postoji trend u sveučilišnim krugovima kao i kod proizvođača koordinatnih mjernih uređaja (u daljnjem tekstu CMM), izgraditi manje CMM-ove i posebno mala ticala za omogućavanje 3D mjerenja nanometarskih oblika. Spomenuli smo prave 3D sposobnosti kao mogućnost da uređaji za mjerenje profila površina mogu ipak isporučiti podatke točaka u 3D, ali u tim tehnikama postoje stroga ograničenja u pogledu maksimalnog nagiba površina koje mogu mjeriti. Govorimo o pravom 3D mjeriteljstvu, gdje se oblici mogu mjeriti postrance i djelomično iznutra npr. mali provrti.

Već prije nekoliko godina bio je razvijen uređaj za mjerenje površine u *NIST*-u, nazvan *molekularni mjerni uređaj: M³* (engl. *MMM – Molecular Measuring Machine: M³*). Taj se uređaj temelji na STM-u sa znatno proširenim x-y rasponom od 50 x 50 mm. Osi x i y se očitavaju laserskim interferometrima. Na površini se mogu odrediti pojedinačne molekule i pomoću toga mjeriti udaljenosti između bilo koje dvije molekule. Vremena potrebna za mjerenja postaju vrlo velika kada se mikrometarska područja mjere s molekularnom rezolucijom. To izgleda kao konačan kraj dimenzijskog mjeriteljstva.

Naravno, još se uvijek može zaželjeti nešto više: mjerenje u zraku, veći z-raspon, uređaj koji je pristupačan za više industrija i koji mjeri značajke prije nego površinu. Uzimajući u obzir točnost nano-CMM-a kao minijaturiziranog CMM-a, postoje zahtjevi koje je teško zadovoljiti tradicionalnom veličinom i strukturom CMM-a.

Neki uređaji razvijeni su da bi zadovoljili *Abbe*-ov princip u 2D, pa čak i u 3D. Za postizanje visoke točnosti koordinata koriste se ili laserski interferometri ili vrlo precizne linearne skale. Ovdje je dan kratak prikaz mjeriteljskih metoda s njihovim karakteristikama:

Sustavi na sveučilištima i institucijama:

Vermeulen-ov stroj

Vermeulens, iz grupe profesora Schellekens na Tehnološkom sveučilištu u Eindhovenu, dizajnirao je stroj koji zadovoljava *Abbe*-ov princip u dvije osi: korištenje linearnih skala omogućeno je pomoću posrednog tijela. Koriste se zračni ležajevi, a mjerni volumen iznosi 100 x 100 x 100 mm.

Ruyl-ov stroj

Ruyl je razvio 3D CMM u *Philips*-ovom istraživačkom centru za razvoj. Njegov mjerni volumen je 100 x 100 x 40 mm i zadovoljava *Abbe*-ov princip u sve tri osi. Mjerna referenca je čvrsti *zerodur*-blok koji se kreće u tri smjera zajedno s radnim komadom, a mjeri se laserskim interferometarskim sustavom s tri ravna ogledala.

Van Seggelen-ov stroj (Sveučilište u Eindhovenu)

Van Seggelen razvija CMM s mjernim volumenom 50 x 50 x 4 mm koji je daljnje poboljšanje i minijaturizacija *Vermeulen*-ovog stroja. Glavna razlika je korištenje sustava duplih fleksibilnih šarki koji daje precizno pomicanje u smjeru z-osi. Ima povratnu vezu i ponovljivost pozicioniranja unutar nanometra.

Ilmenau-ov stroj

Stroj za nanomjeriteljstvo razvijen je na *Ilmenau* tehničkom sveučilištu. Kao i Ruyl-ov stroj opremljen je s tri laserska interferometra.

PTB

PTB je razvio 3D mikromjeriteljski uređaj (3D-MME), koji omogućuje mjerenja mikrostruktura s mjernom nesigurnosti manjom od 100 nm. Mjerni raspon je 25 x 40 x 25 mm. 3D-MME temelji se na CMM-u koji je raspoloživ na tržištu i čija je točnost povećana korištenjem poboljšanih zračnih ležajeva i mjernih skala u 10 nanometarskoj rezoluciji. Osnovni uređaj nadopunjen je mjernim sustavom koji određuje relativnu poziciju i položaj mjenog predmeta.

Sveučilište u Tokyu

Ovaj uređaj ima mjerni raspon 10 x 10 x 10 mm i mjernu rezoluciju 10 nm. Ima simetričnu konstrukciju s dvostrukim V-utorom za vođenje i koristi metodu pozicioniranja koristeći optičku skalu za dobivanje visoke stabilnosti.

Komercijalno dostupni strojevi

Nekoliko prethodno spomenutih strojeva komercijalno su dostupni; *Vermeullen*-ov stroj proizvodi *Zeiss* pod imenom *F25*; *Ruy*-ov stroj proizvodi *IBS* pod imenom *ISARA*. *Ilemenau*-ov stroj se povezuje s kompanijom *SIOS*. *Panasonic* prodaje mjerni stroj *UA3P* mjernog volumena do 400 x 400 x 90 mm, koji se temelji na laserskim interferometrima. Prvenstveno je namijenjen mjerenju površina.

Mitutoyo je razvio *NANOCOORD* mjerni stroj koji ima mjerni volumen 300 x 200 x 100 mm s nesigurnošću počev od 0.2 μm . Može biti opremljen kuglastim ticalom promjera 30 μm , ticalom za mjerenje hrapavosti i nekim drugim vrstama optičkih ticala. Teško je navesti izvor nesigurnosti svih tih strojeva, jer rezultati mjerenja skoro potpuno ovise o korištenom ticalu.

Ticala za mikro CMM-ove

Općenito, CMM-ovi iz prethodnog poglavlja daju precizno pozicioniranje i mjerne osnovu za korištenje širokog spektra ticala. Uz točkasti osjet i optička, mogu se koristiti STM-nalik ticala i konična ticala za hrapavost. Konična ticala s promjerom vrha od 10 nm nisu osobito upotrebljiva za prava 3D mjerenja, jer ne mogu skenirati postrance. Za 3D mjeriteljstvo tipični element ticala biti će neka vrsta kuglice. Pregled principa ticala dat je po *Weckenmann*-u; ovdje će biti skraćeni pregled 3D ticala koja koriste male kuglice kao dio ticala. Problemi s reduciranim 3D ticalima s kuglicama malih dimenzija su: ljepljenje-klizanje efekt, netočnost oblika i promjera ticala i mala krutost poluge ticala. S mjeriteljskog stanovišta, uzet će se u obzir problem određivanja točnog položaja ticala. Od mnogih pristupa tu se spominje: izrada zglobnog sustava s vrlo malom krutošću tako da poluga može biti tanka. Problem orijentacija/ovisna krutost temeljito je obrađen u tekstu sa simetričnim uređajem. Mjeriteljski problem zglob/savijanje obrađen je *Schwenke*-ovim mjerenjem pozicije ticala optičkim putem. Drastični pristup, uklanjanje poluge, laser-sabirnik ticala i mjerenje njegove pozicije optičkim mikroskopom uzet je od *Takaya*, s promjerom ticala 8 μm . Problem ljepljenje-klizanje ispitan je od *Mitutoyo*

UMAP-ticalom s *Takaya* sustavom temeljenom na malim vibracijama njegovih prirodnih frekvencija, sa sinhronizacijom i micanjem ticala tako brzo kako se amplitude mijenjaju blizu objekta. Ticalo može biti manje od 30 μm .

3.5 Mikroskopske tehnike skeniranja pomoću ticala – SPM tehnike

Mikroskopske tehnike skeniranja pomoću ticala ili *scanning probe microscopy* (u daljnjem tekstu SPM), snažan su alat za podnanometarsko ispitivanje topografije na vrlo finim površinama. SPM omogućava mjerenje na površinama s područjem od otprilike 100 μm x 100 μm i ima lokalnu varijaciju, u visini površine, koja iznosi manje od otprilike 10 μm . SPM je 2½D mikroskopska tehnika u kojoj rezolucija nije ograničena lomom svjetlosti. Vertikalna rezolucija SPM-a je otprilike 0.1 nm dok je horizontalna rezolucija za većinu AFM-ova tipično 2 nm do 10 nm, ali može biti i atomska. SPM-ovi zahtijevaju minimalnu pripremu uzorka.

S obzirom da se različite SPM tehnike temelje na različitim jačinama polja, kao što su tunelirajuća struja između vodičkog vrha i skenirane površine, *Van der Waals*-ove sile, magnetske sile i ostalog, skenirajući se mehanizam univerzalno temelji na piezoelektričnom efektu koji dozvoljava pozicioniranje unutar frakcija nanometra. Posljedica je u tome da svi SPM-ovi trpe stvarni nedostatak piezoelektričnog materijala kao što su histereza i puzanje. To vodi do brojnih korekcija tehnika temeljenih na npr. kapacitativnim sensorima, kao i specijaliziranih softvera za umjeravanje.

SPM nudi velik raspon mogućnosti i unatoč njegovim ograničenjima, on je najraznovrsniji alat za nanomjeriteljstvo. Potrebno je naglasiti da je SPM nedestruktivna tehnika, koja radi jednako dobro na metalima, poluvodičima, pa čak i na biološkim uzorcima. Nadalje, ona se može kombinirati s drugim tehnikama npr. SPM je uspješno montiran na običan CMM za proširenje raspona, premda s određenim gubitkom na rezoluciji.

SPM tehnike omogućavaju stvaranje slike površine nanometarske veličine. Umjesto svjetlosne zrake ili elektrona, SPM-ovi koriste skeniranje oštrim ticalima preko površine održavajući vrlo blizak razmak prema površini (ili se skeniranje vrši pomicanjem površine ispod ticala). Upotrebom ticala više ne postoje ograničenja u pogledu valne duljine svjetla ili elektrona. Ova metoda omogućava rezolucije kojima je moguće razlučiti pojedine atome jedne od drugih i istovremeno stvaranje 3D slika površine uzorka.

SPM je opći pojam i upotrebljava se za opis rastućeg broja tehnika koje koriste oštro ticalo za skeniranje površine uzorka i mjerenje njenih značajki. Broj tehnika raste iz nekoliko razloga, primjerice: mogućnosti modificiranja vrha za sve veći broj značajki, upotreba lokalnih struja i jednostavnih povratnih veza u obliku sile ili recimo svjetla kroz male otvore. Sve te modifikacije redom omogućavaju različite načine interakcije s površinom.

Pojam SPM tehnika obuhvaća grupu srodnih uređaja, kao što su:

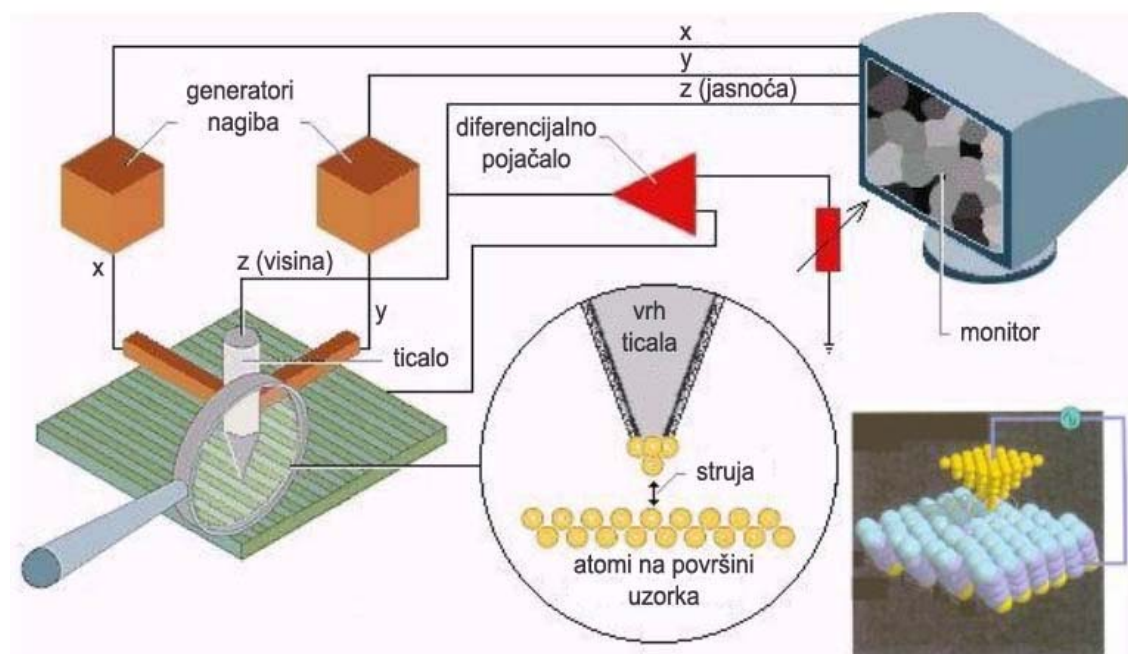
- skenirajući tunelni mikroskop (*scanning tunneling microscopy - STM*),
- mikroskop atomske sile (*atomic force microscopy - AFM*),
- mikroskop lateralne sile (*lateral force microscopy - LFM*),
- mikroskop magnetske sile (*magnetic force microscopy - MFM*),
- skenirajući termalni mikroskop (*scanning thermal microscopy - SThM*),
- mikroskop elektrostatičke sile (*electrical force microscopy - EFM*)
- optički skenirajući mikroskop bliskog polja (*near-field scanning optical microscopy - NSOM*)

Tablica 7. Pregled SPM tehnika i osnovne informacije [6]

mikroskop	djelovanje	osnovni podaci
STM	provodne struje	3D topografija: veličina, oblik i periodičnost značajki, površinska hrapavost; elektronska struktura
AFM	međuatomske i međumolekularne sile	3D topografija: veličina, oblik i periodičnost značajki, površinska hrapavost
MFM	magnetske sile	veličina i oblik magnetskih značajki; čvrstoća i polarnost magnetskih polja na različitim poljima
SThM	prijenos topline	razlike toplinske vodljivosti između površinskih značajki
EFM	elektrostatičke sile	gradijenti elektrostatičkog polja na površini uzorka
NSOM	refleksija, apsorpcija i fluorescencija svjetla	optička svojstva značajki površina

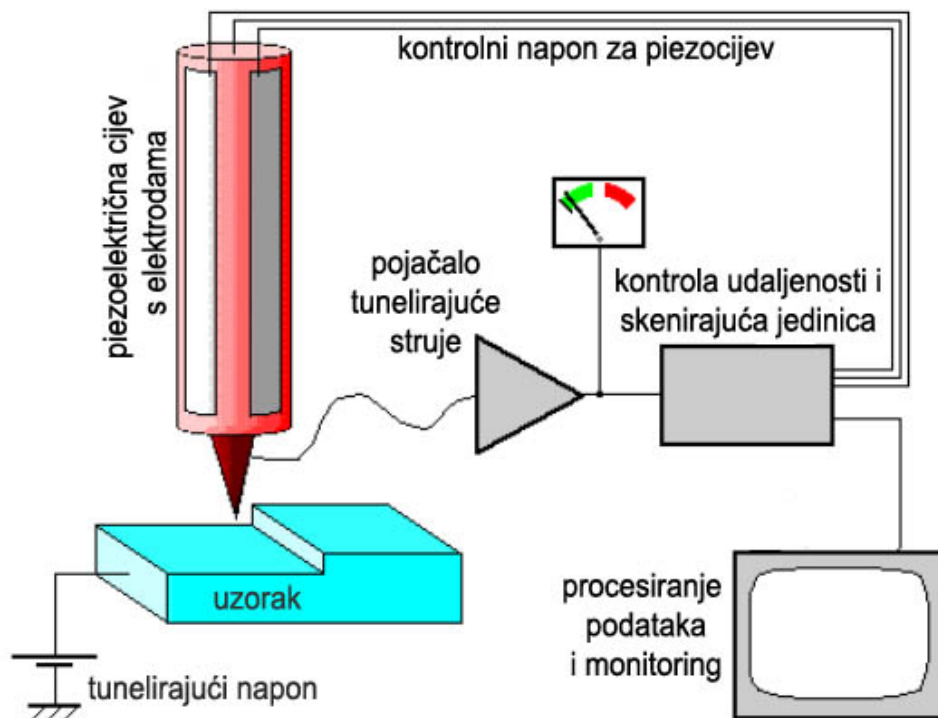
Skenirajući tunelni mikroskop – STM

STM je uređaj (tehnika) razvijen u osamdesetima i pripada ne-optičkim metodama. Uređaj je razvijen za "gledanje" površina vodljivih materijala s atomskom preciznošću. Izumili su ga Binning i Rohrer 1981. godine, koji su za to otkriće nagrađeni i Nobelovom nagradom za fiziku 1986. godine.



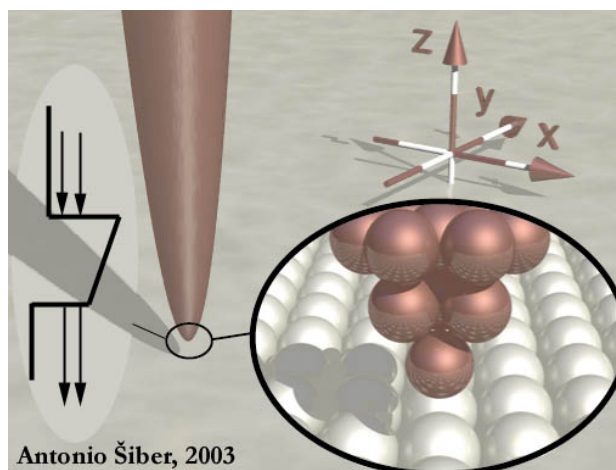
Slika 21. Shematski prikaz STM uređaja

Na slici 21 dan je shematski prikaz STM uređaja. Osnovni element STM-a je oštri vrh od volframa, platine, iridija ili nekog drugog vodljivog materijala. Vrh je (uobičajeno) posebno pripremljena žica koja je "naoštrana" specijalnim kemijskim i/ili mehaničkim postupcima, tako da u idealnom slučaju sam vrh žice tvori samo jedan ili nekoliko atoma. Ugljikove nanocijevi također se koriste kao vrhovi. Vrh je kontroliran računalom što omogućava njegovo precizno pozicioniranje s obzirom na površinu koja se promatra STM-om. Vrh je pozicioniran unutar manipulatora koji je vezan na računalo. Električni napon primjenjuje se između vrha i materijala, što rezultira malom strujom kad je vrh vrlo blizu površine (nanometar i manje), ali samo u slučaju kad je materijal koji se istražuje vodljiv. Materijal koji se istražuje i vrh STM-a, nalaze se u vakuumskim uvjetima. Kako se vrh miče duž površine (u x-y ravnini), struja između vrha i materijala se mijenja.



Slika 22. Osnovni princip rada STM-a

U prvom režimu djelovanja (podešenje konstantne visine), udaljenost između vrha i površine održava se konstantnom (konstantna z-koordinata vrha), a bilježe se promjene u struji ovisne o x i y koordinatama vrha. Promjena struje kao funkcija (x,y) položaja vrha može se interpretirati kao "slika" površine. Pri drugom režimu djelovanja (podešenje pri konstantnoj struji), struja se drži konstantnom, a bilježe se promjene z-koordinate vrha. Dobiveni podaci ponovo se mogu interpretirati kao slika površine. Struja se mijenja u (x,y) ravnini zbog nehomogenosti površine na skali atoma, tj. elektronska gustoća površine nije svugdje ista. Da bi se uspostavila struja između vrha i materijala, elektroni iz površine moraju putovati prema vrhu ili oni s vrha moraju putovati prema površini. S obzirom da je prostor između vrha i površine praktički vakuum, elektroni jedino mogu *tunelirati* (engl. *tunneling* – lokalna struja) kroz taj prostor. Takvo ponašanje može se objasniti jedino kvantnom teorijom. Kako struja tuneliranja opada približno eksponencijalno kako se razmak između vrha i površine povećava, vrh mora biti vrlo blizu površini da bi se mogla zabilježiti struja (obično u nanoamperima - nA). Treba napomenuti da je struja vrlo osjetljiva na male promjene udaljenosti. Prema tome, iako su veličine struja vrlo male, mogu se detektirati velike promjene struje uzrokovane varijacijama u razmaku na atomskoj razini i dalje upotrebljavati za stvaranje slike površine.

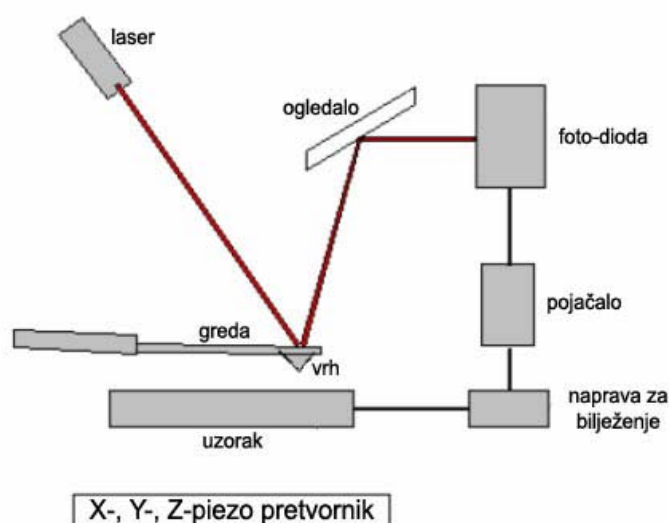


Slika 23. Idealizirani prikaz STM vrha iznad površine [9]

Mikroskop atomske sile – AFM

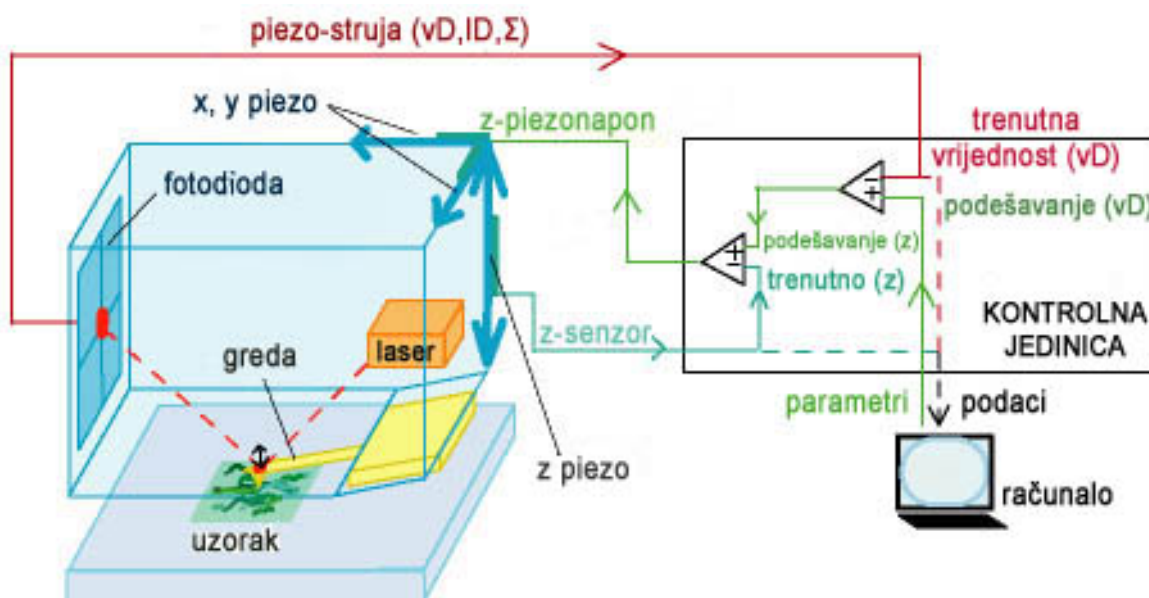
Atomic force microscope (ili mikroskop atomske sile) uređaj je namijenjen promatranju površina, ne nužno vodljivih. Ovo je glavna prednost AFM-a prema *scanning tunneling* mikroskopu koji se primjenjuje isključivo za vodljive materijale i njihove površine. AFM mikroskop ima vrlo visoku rezoluciju i danas predstavlja jedan od najčešće korištenih alata za manipulaciju tvarima na nano-razini, odnosno premještanja atoma ili molekula po površini materijala.

AFM se sastoji od fleksibilnog ticala s vrlo oštrim vrhom na njegovom slobodnom kraju koje se koristi za skeniranje površine uzorka. Ticalo je obično silicij ili silicijev-nitrit s vrhom radijusa nanometarskih veličina.



Slika 24. Osnovni princip rada AFM-a

Za razliku od STM-a, AFM ne mjeri struju između vrha mikroskopa i uzorka, nego silu koja djeluje među njima. Sile koje su važne u ovom slučaju su jaka odbojna sila koja se pojavljuje na malim udaljenostima kao rezultat preklopa elektronskih gustoća vrha mikroskopa i uzorka i dugodosežna *Van der Waals*-ova sila. Oštri vrh AFM mikroskopa postavljen je okomito na ticalo "mikroskopskih" dimenzija, a mali pomaci ticala mjere se ili optički (koristeći laser – interferometrija) ili električki (piezoelektrične metode kada je greda napravljena od piezoelektrika, primjerice kvarca). Pomak ticala proporcionalan je sili koja djeluje između vrha i uzorka. Promjene mjerene sile, kako se vrh pomiče po površini, snimaju se i ovakva se informacija koristi za rekonstrukciju slike površine. AFM funkcionira i izvan visokovakuumskih uvjeta i može se upotrijebiti za promatranje bioloških uzoraka.

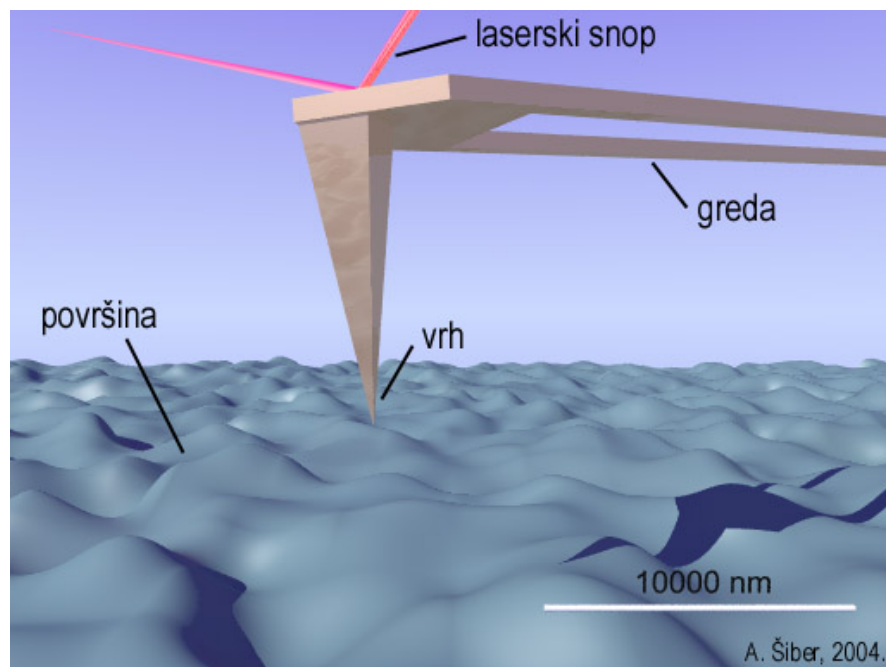


Slika 25. Shema AFM uređaja – postrojenja

Kao i kod STM-a, postoje dva glavna režima rada:

1. kontaktni – AFM vrh je u laganom (mekanom) fizičkom dodiru s uzorkom. Kako se vrh približava površini uzorka, međuatomske sile postaju sve jače i odbijanje je sve veće, a s obzirom da ticalo ima malu konstantu opruge, sile će uzrokovati savijanje ticala i praćenje površine uzorka. Prema tome, detekcija položaja ticala stvara topografiju površine uzorka.

2. beskontaktni – ticalo vibrira blizu površine uzorka. Razmak između vrha i uzorka je reda veličine desetinki nanometra. Beskontaktni AFM režim rada osigurava mjerenje topografije uzorka bez kontakta (ili s vrlo malo kontakta) između vrha i uzorka što predstavlja prednost pri proučavanju elastičnih uzoraka kao što su biomolekule



Slika 26. Idealizirani prikaz AFM vrha ticala iznad površine s laserskom zrakom za detekciju otklona [9]

Mikroskop lateralne sile – LFM

Tijekom skeniranja u kontaktnom režimu rada ticalo se ne savija samo normalno, već se pojavljuju i torzijske (lateralne) deformacije, koje mjeri LFM. Otklon ticala registrira se optičkim sustavom mikroskopa. Mjerenje torzije ticala provodi se pod uvjetima konstantne sile, npr. s konstantnim vertikalnim otklonom ticala. Bočne deformacije ovise o silama trenja koje djeluju na vrh. Prema tome, moguće je razlikovati područja različitog trenja, dakle drugim riječima, LFM je osjetljiv na kemijski sustav strukture površine uzorka. Bočni otkloni ticala obično su posljedica dva izvora: promjena u trenju površine i promjene u nagibu površine. U prvom slučaju, vrh može biti podvrgnut većem trenju kako prelazi preko pojedinih područja što uzrokuje jače zakretanje. U drugom slučaju, ticalo se

može savijati kada naiđe na strmi nagib površine. Da bi se jedan efekt razdvojio od drugoga, LFM i AFM slike moraju biti prikupljene istovremeno. Kada se analizira rezultat LFM mjerenja, važno je razlikovati informaciju zbog razlike u koeficijentu trenja od informacije uslijed promjene u topografiji površine uzorke dobivene s AFM-om.

Mikroskop magnetske sile – MFM

Mikroskop magnetske sile (MFM) učinkovit je alat za magnetska istraživanja na podnanometarskoj razini. Slika dobivena pomoću MFM-a predstavlja prostornu raspodjelu nekih parametara interakcije ticalo-uzorak, primjerice interakcija sile, amplitude vibracije magnetskog ticala i dr. Magnetsko ticalo je obično silicijsko ticalo (ili silicijski nitrid) koje se prevlači tankim magnetnim filmom. MFM mjerenja se odnose na pregled strukture magnetskih domena, čitanje i snimanje podataka s magnetskih medija itd. Činjenica da nije potrebna priprema uzoraka, te da lateralna razlučivost iznosi 50 nm, doprinijele su tome da MFM postane snažan alat za analizu podmikronskih uzoraka magnetizacije. Metode odvanja topografije i magnetskih značajki omogućavaju stvaranje čistih magnetskih slika. Najveći problem u MFM metodi predstavlja upravo to odvajanje magnetske slike od topografije. Za rješavanje ovog problema, mjerenja se provode metodom "dva prolaza".

Skenirajući termalni mikroskop – SThM

SThM tehnika bilježi toplinska svojstva površine uzorka uz pomoć toplinskog nanoticala s otporničkim elementom. Postoje dva režima rada:

- *thermal contrast microscopy (TCM)*
- *thermal conductivity contrast microscopy (CCM)*

TCM režim omogućava mjerenje promjena temperature površine uzorka, a *CCM* režim mjerenje promjena u toplinskoj vodljivosti površine uzorka. Udaljenost između vrha ticala i površine uzorka kontrolirana je uobičajenom AFM-shemom, dok toplinsko ticalo predstavlja jedan kraj *Wheatstone*-ovog mosta. Takav most služi za dobivanje povratne

informacije, prilagodbu i uravnoteženje napona mosta u svrhu mjerenja temperature ticala (*TCM* režim) ili održavanja konstantne temperature ticala (*CCM* režim).

Mikroskop elektrostatičke sile – EFM

EFM prikuplja podatke o električnim svojstvima površine uzorka mjerenjem elektrostatičke sile između površine i AFM ticala. EFM se temelji na principu dovođenja napona između vrha i uzorka dok vrh "lebdi" iznad površine (bez da ju dodiruje). Ticalo ima otklon pri skeniranju statičkih naboja.

EFM slika sadržava informacije o električnim svojstvima kao što su površinski potencijal i raspodjela naboja na površini uzorka. EFM se dakle može upotrijebiti za proučavanje prostornih promjena površinskih nositelja naboja ili za bilježenje elektrostatičkih polja elektronskih krugova tijekom paljenja i gašenja uređaja. Ta tehnika, poznata pod nazivom "*voltage probing*", predstavlja vrijedan alat za ispitivanje mikroprocesorskih čipova (tijekom njihova rada) na podnanometarskoj razini.

Optički skenirajući mikroskop bliskog polja – NSOM

Ovom se tehnikom mogu prostorno razlučivati signali kojima su izvor točke smještene bliže jedna drugoj nego što je iznos valne duljine svjetla. Ključni element NSOM-a je kabel optičkih vlakana koji je zašiljen na vrhu s polumjerom manjim od valne duljine. Ovaj je vrh prevučen aluminijem na način da je samo otvor na vrhu već spomenutih dimenzija bez prevlake. Optički signali prenose se kroz otvor promjera manjeg od veličine valne duljine svjetla dok vrh istovremeno skenira površinu uzorka upotrebljavajući pri tome tehniku s ticalom sličnu bezkontaktnoj AFM tehnici. Odziv uzorka na odaslano svjetlo koje izlazi iz vrha bilježi se kao funkcija pozicije vrha nad uzorkom, pa se na taj način uzorak snima u vrlo visokoj rezoluciji. Upravo tako visoka rezolucija čini NSOM sustav suvremenim optičkim mikroskopom. Može biti kombiniran s bilo kojom spektroskopskom tehnikom u svrhu skupljanja spektra s vrlo malih područja uzoraka, budući da pojmovi kao što su toplinsko zračenje, vidljivi dio spektra, UV dio spektra, NSOM fluorescencija, potoluminiscencija, magnetooptička spektrometrija ili fotovodljivost nailaze na sve veće zanimanje znanstvenika. Kombiniranjem režima rada s valnim duljinama ili spektroskopske tehnike s NSOM-om omogućeno je prikupljanje

jedinstvenih podataka visoke razlučivosti o sastavu i fizikalnim svojstvima površine na malim valnim duljinama (destinke nanometra).

Najveća prednost NSOM sustava leži u njegovoj sposobnosti pružanja optičkih i spektroskopskih podataka visoke razlučivosti, u kombinaciji s istovremenom topografskom informacijom.

3.6 Ostale tehnike

U ovom poglavlju kratko su opisane druge tehnike dimenzijskog mikro i nanomjeriteljstva. Opis ne sadrži sve moguće metode, već je ograničen na izabrane.

Digitalna holografija

Površina tipičnih mikrosustava vrlo često sadrži glatke, reflektirajuće materijale primjerice aluminij, silicij ili bakar. S pomoću digitalne holografije moguće je mjeriti topografiju mikrosustava ili njihova ponašanja. Rezultati se mogu usporediti s brojčanim izračunima i funkcijskim parametrima ili se može dobiti ponašanje materijala. Prednosti upotrebe digitalne holografije jesu brzo, planarno i nekontaktno mjerenje s rezolucijom frakcije korištene valne duljine.

Kod upotrebe digitalne holografije predmet osvjetljen koherentnim svjetlom interferira s referentnim snopom na CCD meti. Hologram se može brojčano rekonstruirati u svakoj dubini i stoga se geometrija predmeta može dobiti analizom fazne distribucije u rekonstrukcijskom planu. Za dobivanje mjernih rezultata trebaju se razmatrati odgovarajući geometrijski modeli i svojstva površine predmeta. Za mjerenje deformacija predmeta pod napajanjem, distribucije faze, sa i bez napajanja, mjere se i sažimaju. Tipična veličina mikrosustava manja je nego $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Ovdje je klasična digitalna holografija ometana činjenicom da sve optičke komponente (iluminacija, tračci snopa) moraju biti ugrađene između predmeta i senzora.

Eksperimentalna mjerenja oblika i deformacija na HF prekidaču pokazuju potencijal ove tehnike. Upotrebljena valna duljina $\lambda=532 \text{ nm}$, a objektiv mikroskopa ima numeričku aperturu od $N.A.=0,25$. Pri superpoziciji fazne distribucije s prijenosnom funkcijom objektiva mikroskopa, može se utvrditi visoka distribucija.

Optički difrakcijski mikroskop

Sadašnji optički difrakcijski mikroskop (ODM) uveden je kao novi alat u nanomjeriteljstvo. On se temelji na lomu bijelog svjetla, gdje su analizirani direktni snop (nultog reda) i ostali redovi raspršenog svjetla. Bez pomicanja dijelova i temeljeno na optičko-signalnom procesiranju; to obećava brzi i začuđujuće točan alat za različite optičke nepogodnosti.

Princip je sljedeći: bijela svjetlost prikaže uzorak, a raspršena svjetlost, kao i nulti red, skupljeni su i analizirani spektroskopski. Spektri se analiziraju simulacijom spektara iz modela rešetke i tada parametri modela pristaju promatranom spektru. Stoga je ODM obećavajuća tehnika za kontrolu proizvodnje rešetki, budući da je puno brža od AFM tehnike. Tehnika je vrlo selektivna i gruba (robustna), a to što je nedustruktivna, dijeli s SPM tehnikama.

Mikroračunalna tomografija

Temeljeći se na postojećim medicinskim X-zračnim tomografskim sustavima (koji imaju rezoluciju od 1-2 mm) danas se razvijaju mikroračunalni tomografski sustavi. Ta vrsta sustava ima rezoluciju ispod 0.15 μm . Jedinstveno obilježje tih mjernih tehnika je to da su one potpuno trodimenzijske. One zapravo nemaju ograničenja u odnosu na pristup ticala, zbog visoke prodorne snage X-zraka. Mikrofokusirajući izvor X-zraka osvjetljava predmet interesa, koji je stavljen na precizni manipulator. Sjene X-zraka postižu se s X-zračnom osjetljivom kamerom. Takvi radiografi X-zraka sadrže 2D sjenu potpune interne 3D strukture, ali se u jednoj 2D projekciji sjene ne prepoznaje dubina informacije. Stoga se, preko akvizicije slike uzorak rotira postupno kroz 180°, a slike se snimaju u svim pozicijama. Temeljeno na intenzitetu X-zraka 2D, slike sjena se preračunavaju za svaki položaj i 3D model predmeta se konačno postiže kombiniranjem slika 2D sjena.

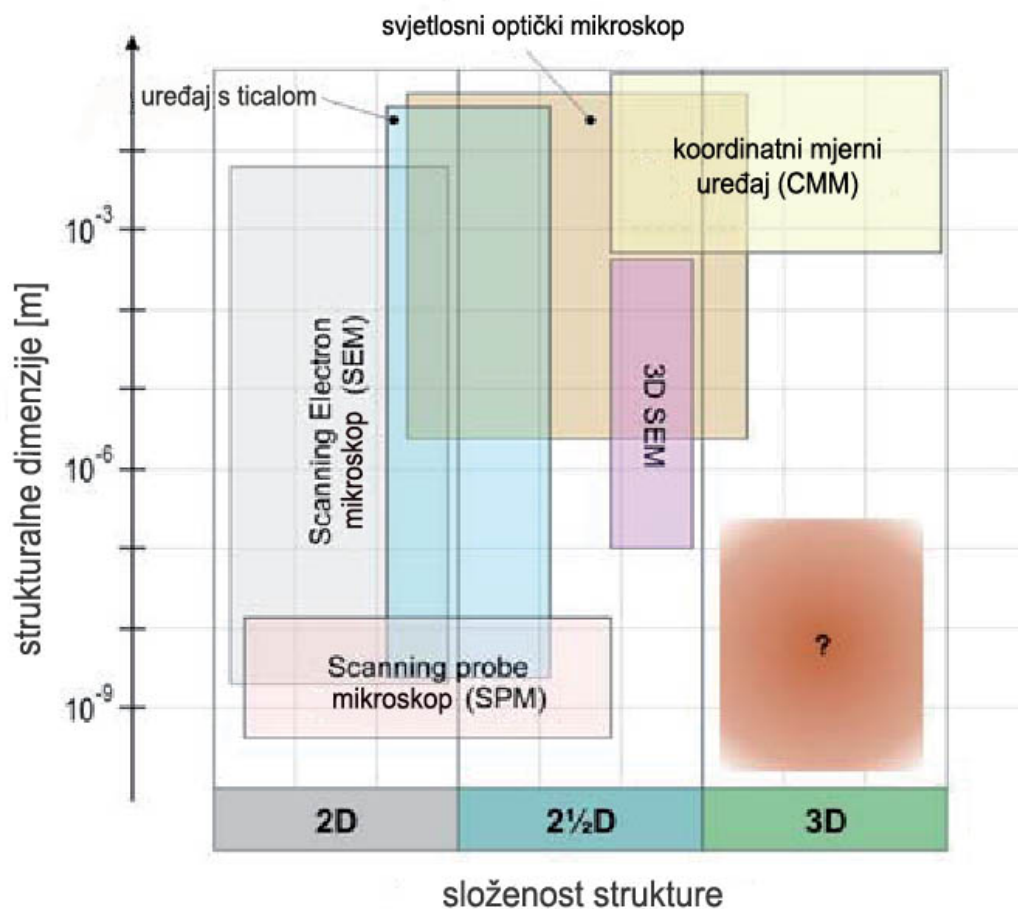
Zaključak je da se mnogi interferencijski principi primjenjuju u mikrotopografskom mjernim uređajima, kao i mikro i nano CMM-ovi. Općenito, interferometrija je sposobna isporučiti točnost i mjernu nesigurnost u nanometarskom rasponu. Međutim, priroda udaljenosti interferetrije je jednodimenzijska, tako da se često mogu vidjeti rješenja sadržaja višestrukih interferometara.

Mikrotopografski mjerni uređaji sposobni su isporučiti setove trodimenzijskih topografskih podataka. Površinski topografski mjerni uređaji su svi ponešto ograničeni u primjeni na vertikalnim osima, većinom zahvaljujući interkciji uzorak-ticalo (mehaničko kontaktno ticalo) ili optičkim karakteristikama (optičko ticalo). Obilježja visokog odnosa omjera, kao što je dubina udubljenja, kritične su; štoviše, oštri presjeci ne mogu se mjeriti.

SEM je snažno oružje za dobivanje oštih slika s velikim povećanjem. Te su tehnologije široko korištene za dimenzijsko mjeriteljstvo 2D struktura u mikro i nanometarskom rasponu. Međutim, posebnu brigu treba povesti za utemeljenje sljedivosti upotrebe SEM-a u dimenzijskom mjeriteljstvu.

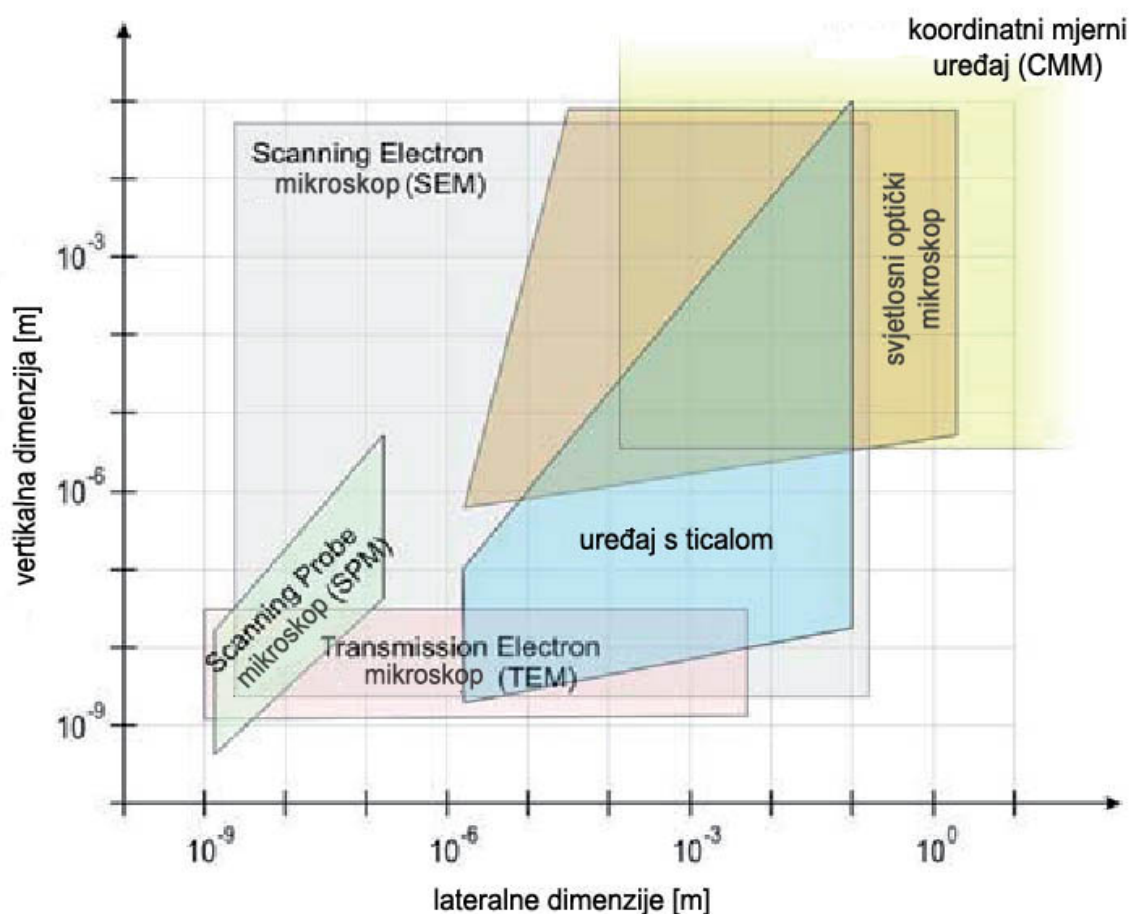
Primjena uobičajenih mjernih robota za osiguranje kvalitete u kontekstu mikrotehnologije ograničeno je nedostatkom točnosti ili veličine ticala. U tu svrhu razvijaju se novi strojevi opskrbljeni malim, visokotočnim ticalima.

Slika 27 prikazuje klasifikaciju mjernih tehnika dvojako: u odnosu na dimenziju i kompleksnost.



Slika 27. Klasifikacija opreme i mjernih tehnika [1]

Na slici su površinski topografski mjerni uređaji promatrani u cjelosti. Specifični uređaji mogu dakle imati sposobnosti ne biti indicirani na slici. Općenito, danas su raspoloživi raznoliki 2D i 2½D uređaji koji su relativno skupi i spori. S točke gledišta robusnosti i brzine ispitivanja mjeriteljskim sustavima manjka sposobnost korištenja u proizvodnim podešavanjima. Mjerni izazov na slici raste slijeva nadesno odozgo prema dolje. To polje, pokriveno kompaktnim ultrapreciznim CMM-om, visokorelevantno je u industriji. Tehnike kao što su 3D SEM i mikroračunalna tomografija od velikog su značenja, premda njihova sljedivost još uvijek nije utemeljena kroz univerzalne procedure umjeravanja. Nekoliko je pravih 3D mjeriteljskih sustava u toj domeni. Puna 3D karakterizacija u nanometarskom rasponu nije moguća kroz upotrebu ijedne od postojećih tehnika. Slika 28 sadrži usporedbu tehnika o kojima se raspravljalo u dijagramu nalik *Steadman-u*.



Slika 28. Usporedba mjernih tehnika u dimenzijskom mikro i nanomjeriteljstvu [1]

Nedostaci i specifičnosti utvrđeni kod uređaja:

- Postoji velik broj mjernih principa i uređaja sposobnih reproducirati dimenzijska mjerenja u režimu razmatranja. Međutim, različiti uređaji imaju različite prednosti i ograničenja. Iz te perspektive jasno je da ne postoje stvarna rješenja za uzvraćanje 3D rezultata u skali ispod 1-10 μm ,
- Razvoji ticala neophodni su u cilju prevladavanja tekućih proizvodnih ograničenja i shodno tome ograničenja u izvršenju zadataka,
- Na toj skali interakcija između ticala i predmeta postaje kritična. Potrebni su fizikalni modeli za opisivanje tih interakcija za različite postavke mjerenja,
- Postoji rastuća potreba za obavljanje mjerenja u različitim dužinama skala na istom radnom komadu (tj. nanohrapavost, širina mikrokanala itd). Ti su rezultati potrebni za korištenje u različitom rasponu uređaja, jer jedan pojedinačni uređaj nije sposoban pokriti sve potrebe. Daljnji razvoj morao bi integrirati različite principe kao alternativu postojećim,
- Nužan je razvitak specijalne opreme za mjerenja u nanometarskom režimu s naglaskom na sljedivost,
- Procesna sposobnost mjerne opreme postaje ekstremno važna s obzirom na razvoj mikro i nanotehnologije uključenih u industrijsku proizvodnju (primjerice industrija integriranih krugova),
- Tehnologija čistoće uzoraka i uređaja postaje kritična, jer učinak kontaminacije (onečišćenja) u tim redovima veličine totalno poništava rezultate mjerenja.

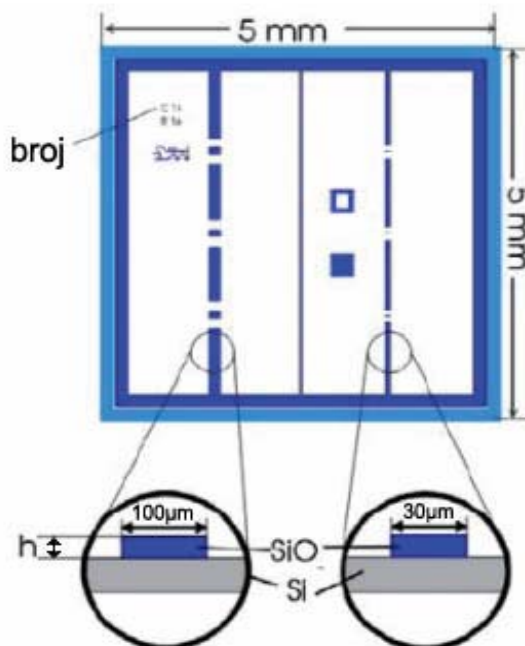
4 MJERNO JEDINSTVO

Pred mjeriteljski sustav koji treba osigurati mjerno jedinstvo na području mikro i nanomjeriteljstva otvara čitav niz izazova. U prvom redu, nemoguće je postojeći sustav sljedivosti i umjeravanja koji je utemeljen na etalonima i metodama koji se koristi u makrosustavima u potpunosti prenijeti u mikro i nanomjeriteljske sustave. To se posebno odnosi na područje nanomjeriteljstva, gdje se intenzivno radi na razvoju etalona izrađenih novim materijalima, kako anorganskih tako i organskih, uključujući i žive stanice u specijalnim slučajevima. Osim toga, značajne poteškoće u osiguravanju mjernog jedinstva stvara veliki broj mjernih metoda i uređaja koji rade na različitim mjernim principima i mjernim mogućnostima s obzirom na mjerna područja i rezolucije. Pokazuje se snažna potreba za standardizacijom procedure.

Danas se mogu uglavnom naći umanjeni etaloni iz makro područja izrađeni uglavnom poluvodičkim tehnologijama i materijalima, kao primjerice etaloni dubina brazdi i visina stepenice, 1D i 2D rešetke i rijeđe reference ravnoće, a uglavnom su namijenjeni SPM metodama. U osiguravanju mjernog jedinstva dosad je provedeno nekoliko usporedbenih mjerenja između nacionalnih mjeriteljskih instituta.

Velik broj umjeravanja etalona stvoreno je i karakterizirano kao rezultat projekata sponzoriranih od strane Europske unije, dok nekoliko komercijalnih kompanija prodaje slične etalone. Oni se većinom temelje na poluvodičkim materijalima, ali tu nema tradicije za održavanje sljedivosti izvan nacionalnih mjeriteljskih instituta.

Etaloni koji su korišteni u ranije spomenutoj usporedbi stupnja visine stepenice prikazani su slikom 29.



Slika 29. Primjer umjeravanja etalona za mjerenje visine stepenice upotrebljen na međunarodnoj usporedbi. Nominalna visina stepenice iznosi 20 nm [1]

Općenito, postoji suglasnost da optimalni etalon za upotrebu na AFM-u ili slično velikom uređaju može biti umjeren nezavisnim uređajem koji je namjenjen velikim dimenzijama. Primjer je etalon visine stepenice iz slike 29 koji se može umjeriti neovisno pomoću interferentnog mikroskopa, sve dok površina ne daje efekte promjene faze (kao u slučaju između Si i SiO₂) i dok stupanj širine bude duži nego mikroskopska lateralna rezolucija.

Drugi primjer je korak mreže koji se može umjeriti difrakcijom; međutim difrakcija je očito prosječna preko mnogih linija mreže i malo toga može pokazati o nekoliko mrežnih linija unutar malog raspona na STM-u ili AFM-u. Za mala područja mjerenja općenito je teško imati reference za sljedivost u literaturnom smislu, te što se sve može umjeriti i reproducibilno naći na specifičnim lokacijama.

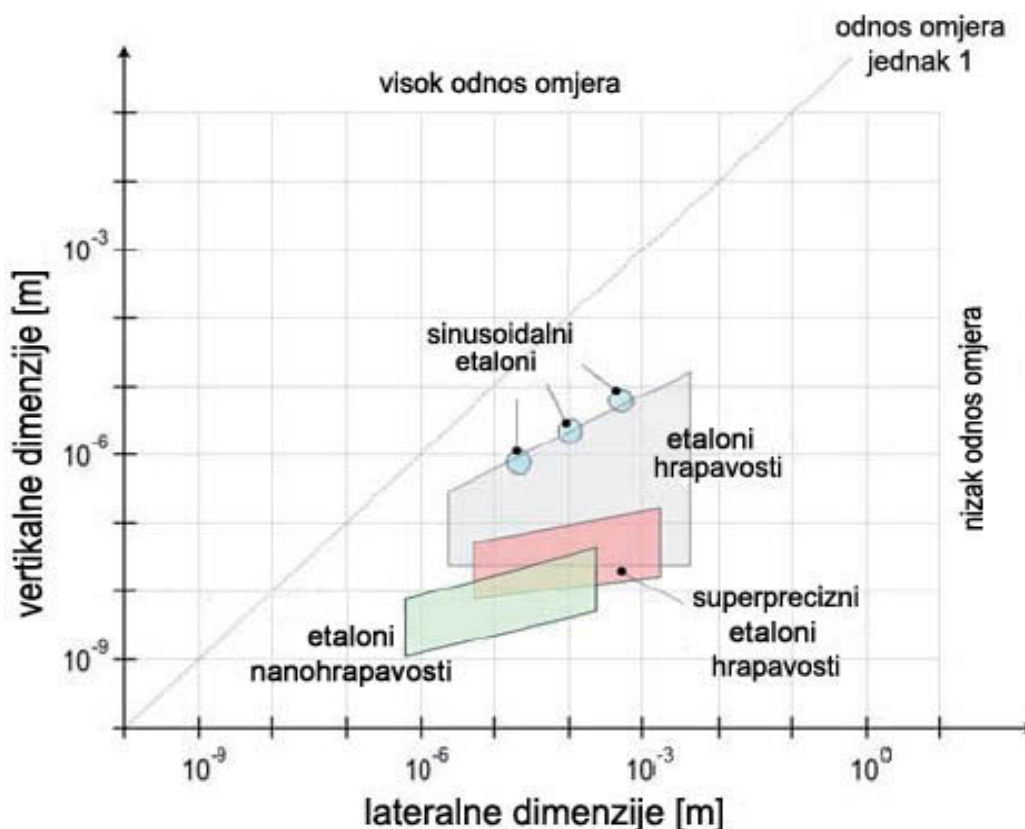
Raspoloživi etaloni jesu dubina brazde i visina stepenice, 1D i 2D mreža i rjeđe, reference glatkoće. Umjeravanje sljedivosti redovito se može dobiti za dubinu brazde/visinu stepenice i primjerice korak 1D mreže. Rijetki su etaloni za ravnoću, glatkoću i pravokutnost, a pravokutnost između sve 3 osi na STM-u ili na AFM-u opisana je prema saznanjima u svega nekoliko slučajeva.

U oba slučaja, 2D i 3D SEM-a, umjeravanje je također izazovno. Umjeravanje je iskomplicirano činjenicom da SEM može spajati puno niza veličina u dimenzijskim

uvjetima i da interakcija između elektronskog snopa i uzorka ima utjecaj na mjerenje, osobito u nanometarskom rasponu. Primjeri ustanovljavanja sljedivosti za SEM uređaje morali bi uključivati umjeravanje uvećavanja, umjeravanje kosih kuteva (3D), vertikalno podizajuće umjeravanje (3D), lateralno umjeravanje na trodimenzijsko podešavanje podataka (3D) itd. U nekim člancima predstavljen je novi etalon umjeravanja koji sadrži višestruku visinu stepenice za vertikalno podizanje u 3D SEM-u. U slučaju upotrebe etalona za umjeravanje koraka, predmet mjerenja preko jedne ili mnogo mrežnih linija i relativne nesigurnosti morao bi uključivati odnos vjerojatnosti ili vjerojatnosti slične *Allan*-varijacijama u umjeravanju frekvencije.

Dakle, osnivanje sljedivosti putem umjeravanja važan je predmet u mikro i nanomjeriteljstvu. Fizikalni etaloni nužno su potrebni tijekom procedura umjeravanja. Daljnje modeliranje zahtjeva specifičnih nesigurnosti, ogroman je izazov u tom dimenzijskom režimu. Važna aktivnost u namjeri utemeljenja koherentnog znanja iz sljedivosti je organiziranje interlaboratorijskih usporedaba.

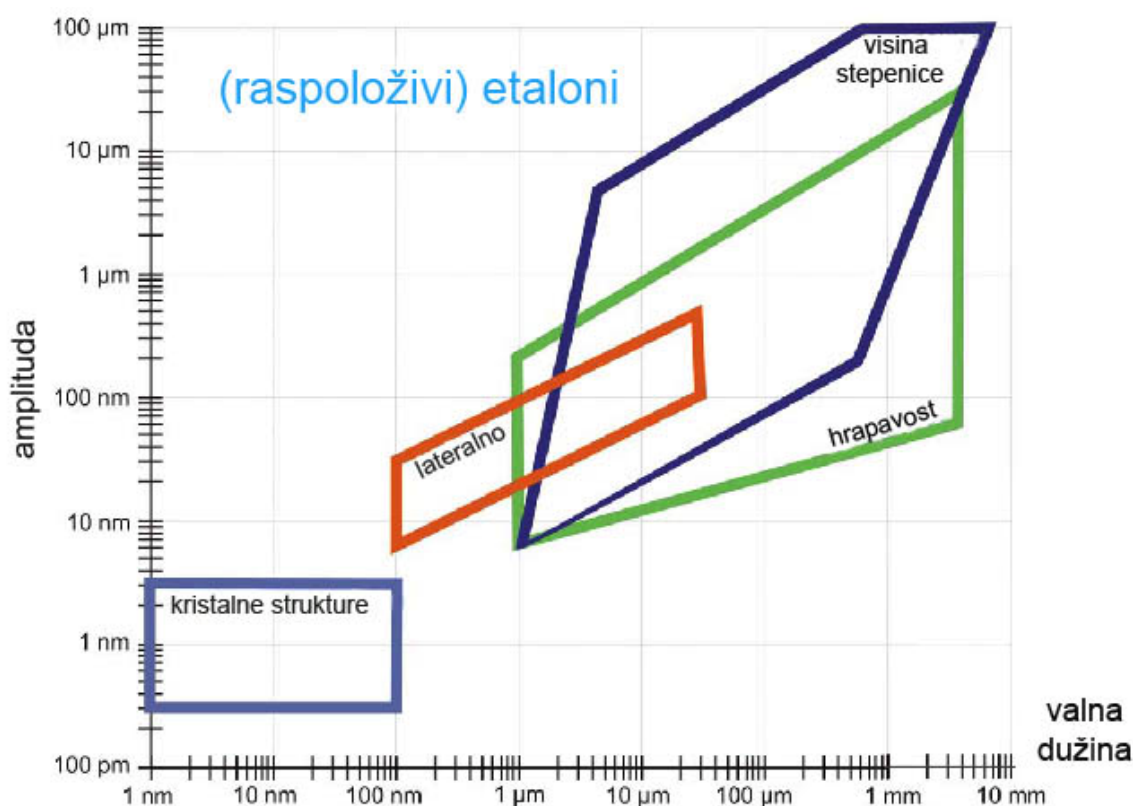
Različiti etaloni mogu se pozicionirati u *Stedman*-sličnom dijagramu kao što je pokazano na slici 30. Jasno je da relativno velika područja dijagrama koja su nepokrivena ukazuju na potrebu za umjeravanjima etalona.



Slika 30. Umjeravanje etalona za dimenzijsko mikro i nanomjeriteljstvo [1]

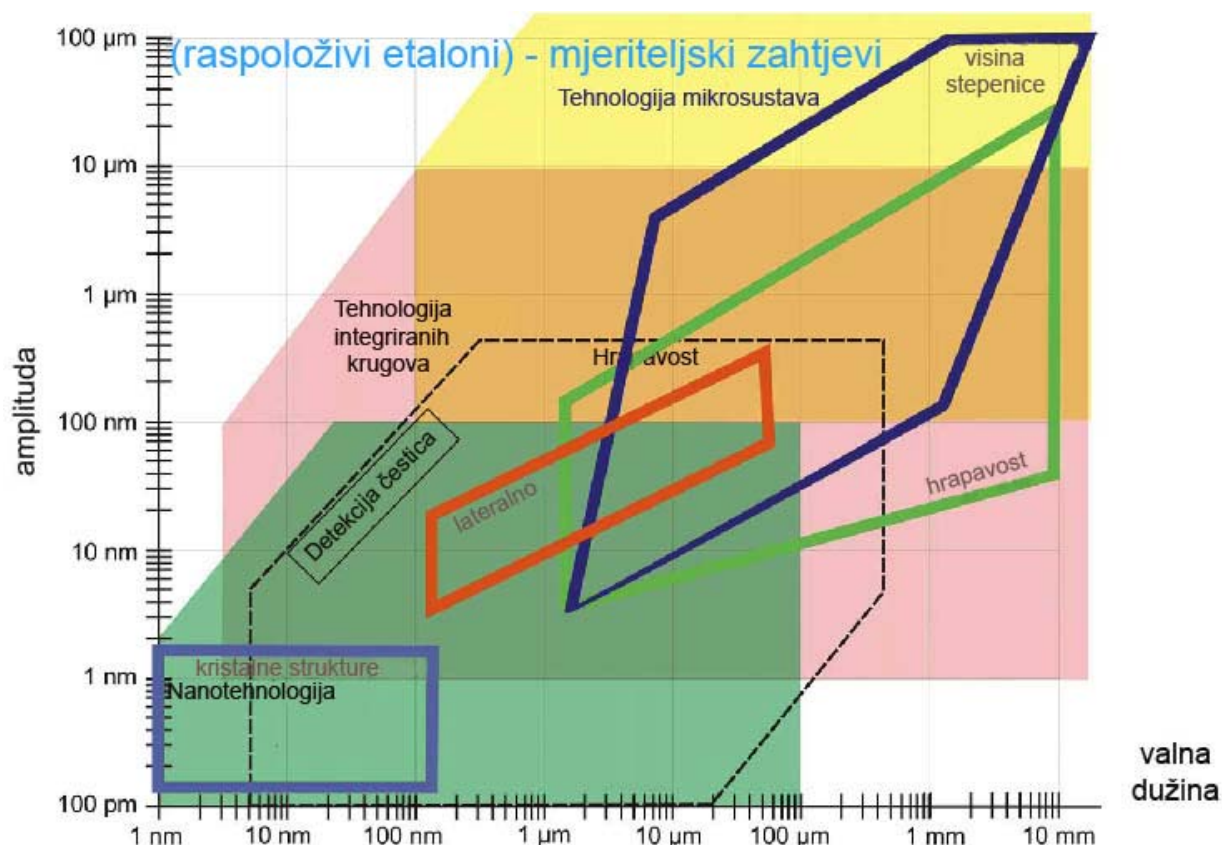
Pojedinačno, svi etaloni čine se da prikazuju male odnose omjera, stoga 3D etaloni u stvarnosti nisu prikladni u tom režimu. Fizikalni etaloni zato su nužno potrebni za površinsku hrapavost, ispodpovršinska svojstva, oblike (glatkoću, sferičnost, asferičnost) stakla, keramike i metala. Kao što je već bilo rečeno, također su potrebni i etaloni načinjeni od anorganskih materijala.

Na slici 31 u dijagramu prikazani su raspoloživi, odnosno trenutno dostupni etaloni umjeravanja u mikro/nanotehnologijama za neka mjerna područja: visinu stepenice, hrapavost, lateralno umjeravanje i kristalne strukture.



Slika 31. Raspoloživi etaloni umjeravanja u mikro/nanotehnologijama [2]

Kada se prikaz tih istih etalona preklopi s područjima mikrotehnologija, tehnologija integriranih krugova i nanotehnologija, što je sve prikazano slikom 32, vrlo brzo uočavamo koliko su velika područja tih tehnologija ostala nepokrivena mjernim područjem dostupnih etalona i utvrđujemo da su velike potrebe za raznim etalonima koji bi ih trebali barem djelomično pokriti.



Slika 32. Kombinirani prikaz raspoloživih etalona umjeravanja i mjeriteljskih zahtjeva [2]

4.1 Dozvoljena odstupanja u mikro i nanomjeriteljstvu

Osnovna je činjenica da u makro svijetu većina brzo zamjetnih funkcija konstrukcijskih elemenata jesu udružene sposobnosti: sposobnosti klizanja i kotrljanja, stupanj opterećenja, različiti završeci površina itd. Za osiguravanje tih funkcija specifikacije su dane u uvjetima maksimalnog odstupanja od idealnog geometrijskog oblika. Različiti ISO standardi reguliraju to polje u uvjetima geometrijskih specifikacija proizvoda (GPS). Štoviše, u uobičajenim strojarskim procesima, specifikacije dijelova, kao i varijable za prilagođavanje dimenzija i geometrije proizvedenog dijela, linearnih su dimenzija (primjerice korekcija za kompenzaciju otklona ili trajnosti alata), što znači da se primarno zatvorena petlja kontrole temelji na linearnim dimenzijama. Za dozvoljena odstupanja u mikro i nanomjeriteljstvu čini se da je najizraavnije upotrijebiti ISO etalone GPS-serija, iako su čak i tu primjećeni neki očiti problemi: primjerice stupanj dozvoljenog odstupanja nije definiran za nominalne veličine ispod 3 mm. U crtanju, mikroveličine i

dozvoljena odstupanja trebaju prethoditi s više nula ako su još uvijek izražene u mm, ali taj se problem može lako prevladati. Mnogo je ozbiljniji problem da je ISO-GPS sustav postavljen na osnovi proizvodnog dimenzijskog mjeriteljstva. To znači da su na mnogim mjestima mjerni elementi propisani na milimetarske veličine; prema tome, mjerenje manjih veličina nije moguće ako se takvi etaloni interpretiraju striktno. Primjer je mjerenje 2D hrapavosti gdje su igle ticala podešene na 2 μm i gdje granično područje za površine počinje od 2,5 μm . Za proizvođače AFM-ova nije održivo stavljanje R_a vrijednosti u njihov softer za analizu, jer je cijela površina na koju se odnosi sadržana u nekoliko kvadratnih mikrometara. To izaziva konfuziju kada se vrijednosti dobivenih tim uređajem usporede s mjernim zahtjevima uzetih s uređaja gdje je mjerenje u skladu s ISO normom. I u drugim mjerenjima, kao za ravnoću ili kružnost, također postoje nastojanja za propisivanjem veličina ticala i radnih komada. Ograničavajući faktor u razvoju sustava dozvoljenih odstupanja za mikro i nano velike oblike dobivene mikrogloodalima identificiran je u dostupnosti etalona za umjeravanje za osiguranje sljedivosti. U mikro i nanotehnologiji se mogu razlikovati tri različite integracijske tehnike:

Heterointegracija: Integracija se temelji na istom konceptu kao za makromehaničko sastavljanje. Zbog toga se geometrijsko dozvoljeno odstupanje koristi za postizanje funkcionalnosti spoja.

Hibridna integracija: U toj se kategoriji mikro komponente pozicioniraju, fiksiraju i sastavljaju na supstrate, rezultirajući punom funkcionalnošću mikrosustava. Za hibridne integracijske tehnike, pozicijska točnost komponente na supstrate najvažniji je kontrolni parametar.

Monolitska integracija: U tom slučaju, svi su procesni koraci integrirani na jedan jedini supstrat. To znači da združene sposobnosti nisu nadalje potrebne, dok tamo nema komponente za združivanje. Koristeći taj pristup, geometrijska mjerenja nisu od primarne važnosti, a niti dosezanje funkcionalnosti proizvoda kao kontrole proizvodnog procesa.

Za monolitske mikro proizvode, kao i za heterointegrirane mikroproizvode, manipulirajuće varijable i funkcionalni parametri nisu više linearnih ili geometrijskih dimenzija. U slučaju procesa jetkanja primarno manipulirajuće varijable za aproksimaciju idealnog geometrijskog oblika nisu geometrijskih dimenzija, ali jesu procesni parametri

kao primjerice instance kompozicije jetkala, vremena jetkanja itd. Na temelju tih promatranja, Weckenmann i ostali, sugeriraju funkcijsko-orijentirani koncept dozvoljenog odstupanja. U skladu s tim konceptom, dozvoljeno odstupanje je udruženo u sveopćoj funkciji mikrokomponente. Ako je proračunata performansa odstupanja kroz razne procesne korake duža nego dozvoljeno odstupanje proizvoda, parametri trenutnog aktivnog proizvodnog koraka trebaju biti korigirani tako da krajnji proizvod bude smješten unutar očekivanog dozvoljenog odstupanja proizvoda kao što je definirano funkcionalnim ponašanjem.

U nanomjeriteljstvu se pristup *odozgo-dolje* temelji na makroskopskom GPS pristupu koji je procijenjen u nanokontekstu. Predlaže se prilagođavanje tradicionalnog pristupa kada se on primjenjuje u nanomjeriteljstvu. Pojedinačno to uključuje temeljne studije uzimajući u obzir kada površine počinju/završavaju masivnim materijalom (*bulk material*). Pojedinačni atomi na površini trebali bi postati dominantni, te stoga više ne vrijede pretpostavke bazirane na mehanici kontinuuma.

Dozvoljeno odstupanje blisko je povezano s mjeriteljstvom, dok općenita pravilo indicira da mjerenje nesigurnosti može biti 1/10 specifičnog dozvoljenog odstupanja. Vrlo je teško udovoljiti toj zakonitosti kada su apsolutne dimenzije iskazane u mikrometrima i posebno u nanometarskom rasponu. Kao što se prethodno raspravljalo, vrlo malo uzoraka umjeravanja i metoda opstaje na toj skali, pa je zato procjena mjerne nesigurnosti teška. Međutim, preduvjet je da je moguće specificirati dozvoljeno odstupanje, ali potreban je još dugi put u uvažavanju te problematike.

4.2 Umjeravanje i sljedivost

Mjerni etaloni i uređaji za umjeravanje moraju osigurati vrlo važna mjerenja za uspostavu pouzdanosti i povjerenja. To se čini djelomičnim izazovom i kombiniran je s mnogostrukim raznolikostima, jer je nanometarski raspon (0.1 nm do 100 nm) mjesto gdje počinje atomski svijet, a mehanika kontinuuma završava. Prijelazno područje je tzv. *međupodručje* (engl. *mesoscopic area*), gdje je ekstremno teško opisati interakciju senzora s preciznošću mjerenja. Međutim, to je nužan preduvjet za korektno dobivanje te interakcije i pouzdanih mjernih rezultata.

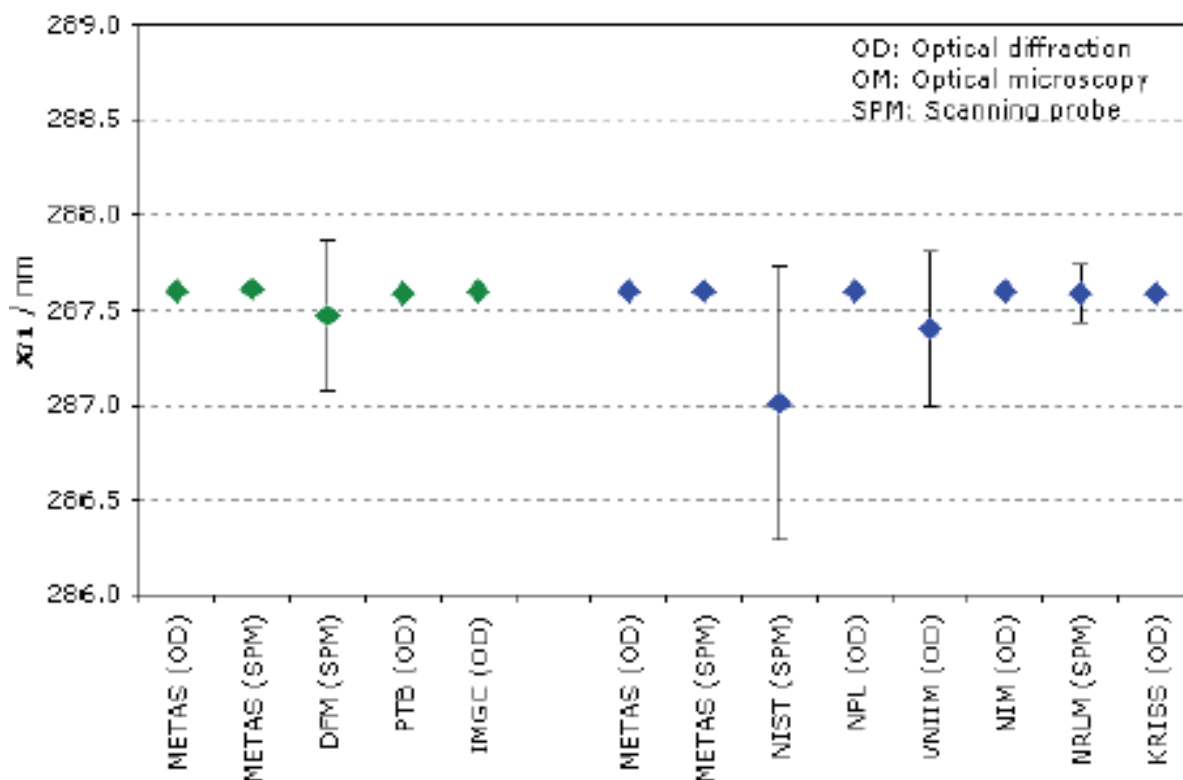
Makroskopski svijet ima svoje vlastitu tradiciju u osiguranju sljedivosti i normalno koristi elemente kao što su skale, laserski interferometri, stepenaste mjerke, mjerne

kuglice, lineali, optička stakla i dr. U mikroskopskom svijetu daleko je manje etalona u upotrebi: visina stepenice, skale, 2D skale i za STM mjeriteljstvo kristali tinjca ili silicijske površine za umjeravanje etalona i osiguranje sljedivosti.

Da bi se ilustrirali neki izazovi, razmatrati će se točnost mjerenja oblika u svijetu *međupodručja*: povratna metoda korištena u tradicionalnom mjeriteljstvu duljina praktički je teško moguća, jer je etalonima teško rukovati ili ih je teško pripremiti. Primjerice, nema mikroskopskog ekvivalenta oštrog brida i iako se može zamisliti, kako umjeriti jedan takav predmet nekom povratnom metodom koji je teško i zamisliti. Nema mikroskopskog ekvivalenta kuglice koji se može umjeriti povratnom tehnikom kao što niti ne može biti umjeren pristupom s dvije strane. 3D ravninska metoda za dobivanje apsolutne glatkoće umjeravanja teško može biti oblikovana u svijetu *međupodručja*. Isto tako za linearne dimenzije: još uvijek nema mikroskopskog ekvivalenta za stepenaste mjerke ili paralelne granične mjerke. Upotreba visine stepenice ekvivalentna je stepenastoj mjerki i paralelnoj graničnoj mjerki utisnutoj na ploči. U makroskopskom svijetu u kojem se čisti etalon smatra kao uzorak, uvijek se približava s iste strane i efekti dvostranog ticala ne postaju vidljivi. Tip D etalona hrapavosti postoji s nižim $R_a=15$ nm i *cut-off* duljinom od 80 μm , ali nije primjenjiv za tipičnu mjernu površinu za AFM-a koja iznosi 20 x 20 μm .

Pored tih etalona napravljenih od anorganskih materijala, ekvivalentni su etaloni vrlo poželjni u nanotehnologiji svih vrsta procesa (proizvodnja, praćenje, mjeriteljstvo) organskih materijala, uključujući žive stanice u posebnim slučajevima.

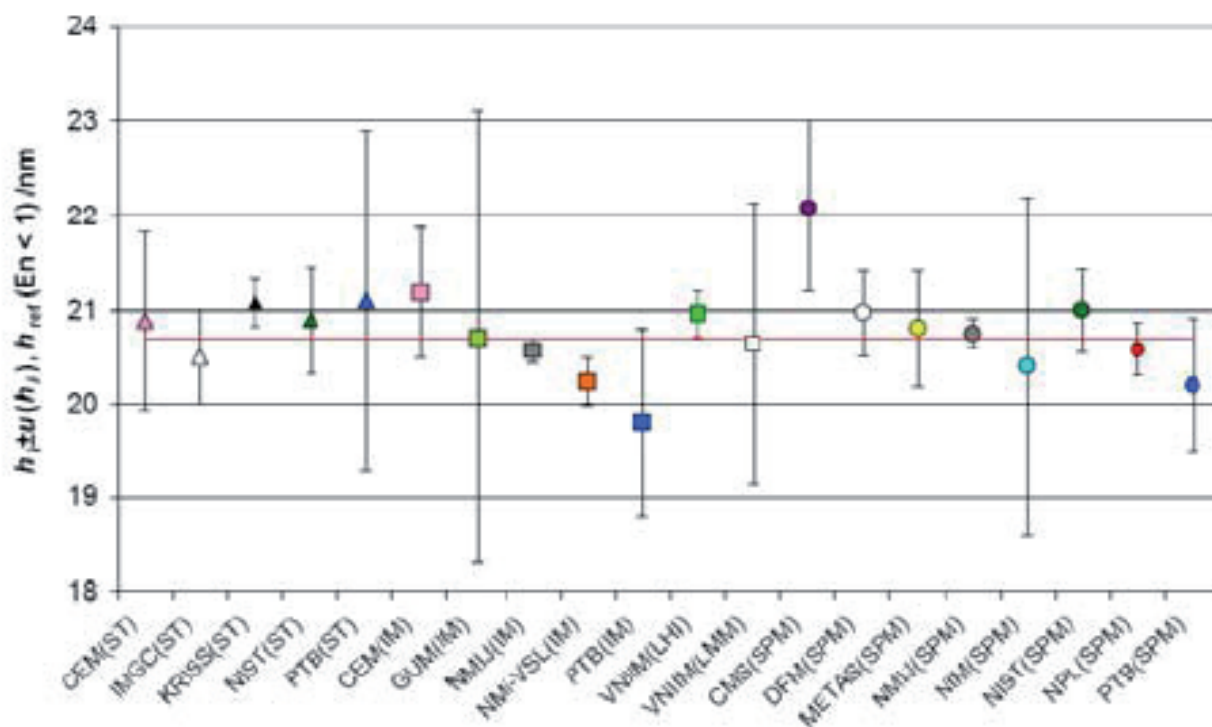
Iako korištenje sljedivosti može biti usmjereno na nekoliko specijalnih mjesta, napravljeno je nekoliko pokušaja uspostavljanja globalne sljedivosti u nanopodručju. Zbog toga, oni su često bili usmjereni na SPM-tehnike. Unutar konzultativnog komiteta za duljinu CIPM-CCL unutar konvencije o metru, provedene su 4 globalne usporedbe između nacionalnih mjeriteljskih instituta na mjerenju visine stepenice, linearne skale, kao i 1D i 2D rešetke i to s između 11 i 14 učesnika. Tri su gotove, a jedna će biti proširena na Europu s pet učesnika. Dio rezultata dat je na slici 33. Slika prikazuje rezultate mjerenja za 1D rešetku gdje su primijenjene tri tehnike: optička difrakcija, optička mikroskopija i SPM-tehnika. Usporedba pokazuje dobro slaganje između klasičnih optičkih i SPM-tehnika i daje dojam o mjernim nesigurnostima u tim tehnikama. Na 290 nm rešetke uz 95%-tnu pouzdanost, razina prihvatljive mjerne nesigurnosti iznosi $U \approx 0,5$ nm.



Slika 33. Usporedba mjerenja jednodimenzijske rešetke. Nominalna vrijednost iznosi 290nm. Nesigurnost između dviju linija rešetke odgovara proširenoj nesigurnosti pri 95% pouzdanih razina [1]

Puno interesantnija je usporedba mjerenja visine stepenice prikazane slikom 34, gdje je sljedivost u z-smjeru potpuno različita za SPM. Ovdje visina stepenice od nazivno 20 nm pruža znatna rasipanja i relativno veliku mjernu nesigurnost. Osim toga ti rezultati pokazuju ogromno poboljšanje između rezultata objavljenih prije nekoliko godina, gdje se visine stepenice mjerene klasičnom metodom pomoću ticala nisu slagale u čak nekoliko postotaka.

Nekoliko nacionalnih instituta nude umjeravanja uzoraka ili etalona za upotrebu u proizvodnim uvjetima, dok samo jedan nudi mjerenja u suglasnosti s procedurom koja je akreditirana prema ISO/EN 17025. Stoga se tu pokazuje potreba za standardiziranjem procedure.



Slika 34. Usporedba mjerenja visine stepenice. Nominalna vrijednost iznosi 20nm. Nesigurnost između dviju linija rešetke odgovara proširenoj nesigurnosti pri 95% pouzdanih razina [1]

Potrebe i nedostaci utvrđeni kod umjeravanja i sljedivosti:

- Prikladni etaloni za transfer sljedivosti i umjeravanja sami su po sebi nužni. Etaloni koji su važeći danas, redom su svi nastali minijaturizacijom etalona makro skala. Potrebno je posebno za nanotehnologiju razviti etalone novih materijala (također anorganskih materijala),
- Modeli za procjenu nesigurnosti trebaju se razviti za različite tipove mjernih principa i uređaja,
- Međunarodne usporedbe trebaju se ojačati s ciljem dobivanja zajedničke osnove za vrednovanje novih tehnologija, kao i nesigurnosti.

5 MOGUĆNOSTI LABORATORIJA ZA PRECIZNA MJERENJA DUŽINA FAKULTETA STROJARSTVA I BRODOGRADNJE NA PODRUČJU MIKRO I NANOMJERITELJSTVA DULJINE

Umjeravanje preciznih mjernih skala odnosno njihova provjera na vrlo zahtjevnoj razini točnosti (mjerne nesigurnosti reda veličine $U=0,1 \mu\text{m}$, $k=2$) danas su svakodnevni zahtjev korisnika alatnih strojeva, mjernih uređaja i drugih tehničkih sredstava s mjernim sustavima. Međutim, umjeravanja preciznih mjernih skala na toj razini mjernih nesigurnosti još uvijek predstavljaju svjetski problem iako su te razine mjernih nesigurnosti nužne u kontekstu osiguravanja sljedivosti. Najveći nedostatak mjernih metoda za provedbu umjeravanja mjernih skala je utjecaj (subjektivnost) mjeritelja bez obzira na korištenje tehničkih pomagala (projektor, kamera i slično). Zbog toga se i pristupilo izradi uređaja koji bi isključio utjecaj mjeritelja u postupku viziranja mjerne skale, u čemu se u potpunosti i uspjelo. Izrađen je softver koji analizom slike isključuje utjecaj mjeritelja u procesu viziranja linije precizne mjerne skale. Završetkom projekta je realiziran osnovni cilj projekta, realizacija uređaja za umjeravanje preciznih mjernih skala, koji će se koristiti za sudjelovanje Republike Hrvatske u međunarodnim usporedbenim mjerenjima u okviru EUROMET-a, te za potrebe hrvatskog gospodarstva.

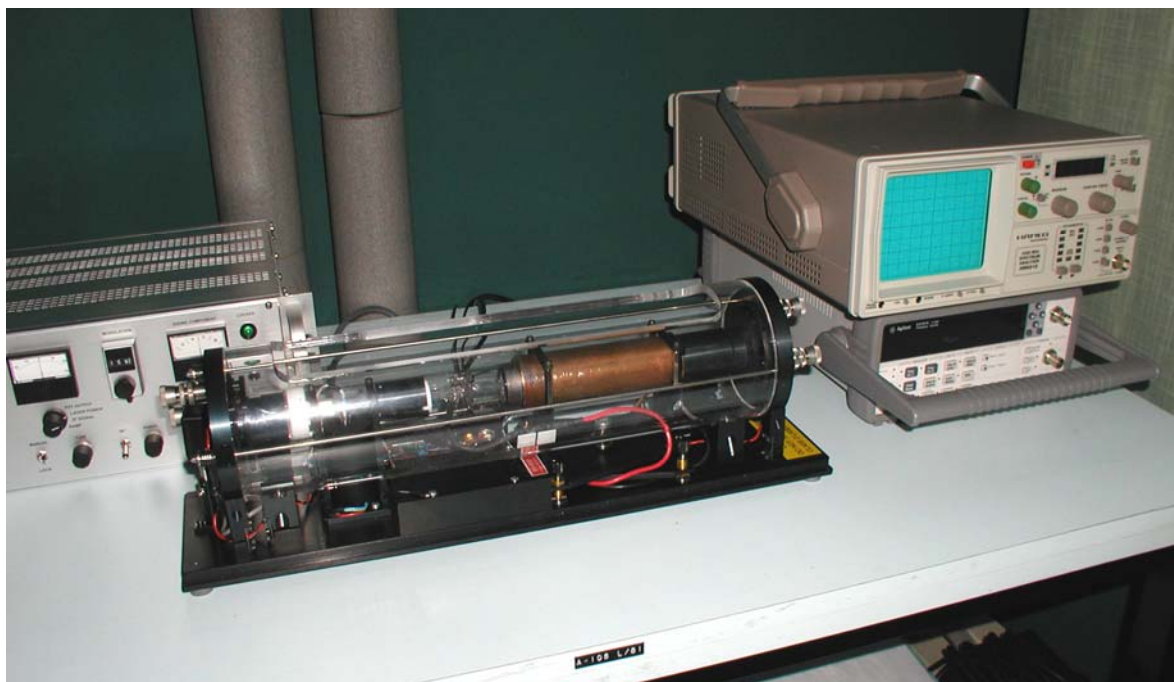
Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje već je dugi niz godina intenzivno uključen i u istraživanja vezana uz osiguravanje mjernog jedinstva na području ispitivanja hrapavosti površina s razvojem vlastitog seta referentnih etalona hrapavosti. Poseban problem predstavlja osiguranje mjerne nesigurnosti u području mikro i nanomjeriteljskih vrijednosti.

5.1 Stabilizirani laser NPL-a

He-Ne laser s jednom ćelijom (prikazan je slikom 35) stabilizirane je frekvencije zbog čega se koristi kao etalon za frekvenciju, odnosno etalon za veličine određene pomoću frekvencije, poput valne duljine emitirane svjetlosti. Kada je radna frekvencija lasera jednaka predviđenoj frekvenciji postignut je lokalni minimum apsorpcije svjetlosti u molekulama joda, zbog čega dolazi do lokalnog maksimuma u intenzitetu laserske

svjetlosti, što se bilježi fotoćelijom. Povratnom vezom, ostvarenom fotoćelijom i pomičnim krajem laserske šupljine, osigurava se stalnost frekvencije lasera.

Time je frekvencija, nazivnog iznosa oko $5 \cdot 10^{14}$ Hz određena do na $5 \cdot 10^6$ Hz, odnosno relativna nesigurnost je reda veličine 10^{-8} , što se prosljeđuje na doprinos nesigurnosti mjerenih veličina, frekvencija drugih lasera ili duljina etalona.



Slika 35. NPL-ov jedno stabilizirani He-Ne laser u *Laboratoriju za precizna mjerenja dužina*

5.2 Umjeravanje preciznih mjernih skala

5.2.1 Tehnički opis uređaja za umjeravanje preciznih mjernih skala

Uređaj za umjeravanje preciznih mjernih skala prikazan je na slici 36. Mjerno područje uređaja je 800 mm i prvenstveno je namijenjen za umjeravanje preciznih mjernih skala. Sastoji se od čeličnog postolja s vodilicama po kojima se vodi stolić. Na stolić se postavlja mjerna skala ili objekt koji se umjerava.

Vođenje stolića je manualno s točnošću pozicionirana manjom od jednog mikrometra. Proces viziranja vrši se pomoću mikroskopa s digitalnom CCD kamerom *Olympus DP 70* s maksimalnom rezolucijom od 12,5 megapiksela. Mikroskop je

opremljen s objektivima različitih povećanja (10x, 20x, 50x i 100x). Izbor objektiva vrši se sukladno predmetu mjerenja.

Pomak stolića mjeri se apsolutno pomoću laserskog interferometra (*Reinshaw ML 10*). Osim laserskog interferometra moguća je i gruba kontrola pomoću skale s enkoderom te pripadnim monitorom. Enkoderska se skala upotrebljava samo za grubo pozicioniranje, a ne i za umjeravanje.



Slika 36. Uređaj za umjeravanje preciznih mjernih skala [7]

Kamera Olympus DP 70

Kamera koja se koristi kod umjeravanja preciznih mjernih skala je *Olympus DP 70* prikazana slikom 37.



Slika 37. Kamera *Olympus DP 70* [7]

Kamera sadrži CCD čip i ima sustav progresivnog skeniranja. Kamera daje prikaz preko računala u više rezolucija (4080x3072 piksela, 2040x1536 piksela, 1360x1024 piksela i 680x512 piksela). Kamera omogućuje direktan prikaz s 15 slika u sekundi kod rezolucije 680x512 piksela.

Laserski sustav Reinshaw ML 10

Za točno određivanje pomaka stola koristi se laserski interferometar s izvorom svijetla *Reinshaw ML 10* (slika 38) koji je spojen na računalo u kojemu je instaliran programski paket *Reinshaw Laser 10*.



Slika 38. Laserski sustav *Reinshaw ML 10* [7]

Laserski sustav *ML 10* koristi sofisticiranu elektroniku za stabilizaciju i interpolaciju. Sastoji se od laserske mjerne glave *ML 10*, električnog naponskog kabela i kabela za prijenos podataka. Sustav *ML 10* zasniva se na iscrpnom vrednovanju točnosti koordinatne osi, a doseg lasera iznosi 40 metara.

Izvor laserskog snopa je He-Ne laserska cijev maksimalne snage 1 mW. Laserska cijev je drugog razreda snage, što znači da nije potrebna posebna zaštita kod korištenja.

Digitalni pokazivač pozicije *Iskra NP 30*

Za grubo pozicioniranje stola koristi se digitalni pokazivač pozicije *Iskra NP 30* (slika 39) koji je direktno spojen na klizni stol i pokazuje njegov pomak. Njegova točnost puno je manja od laserskog sustava kojeg koristimo za umjeravanje i služi nam samo za grubo pozicioniranje.



Slika 39. Digitalni pokazivač pozicije *Iskra NP 30* [7]

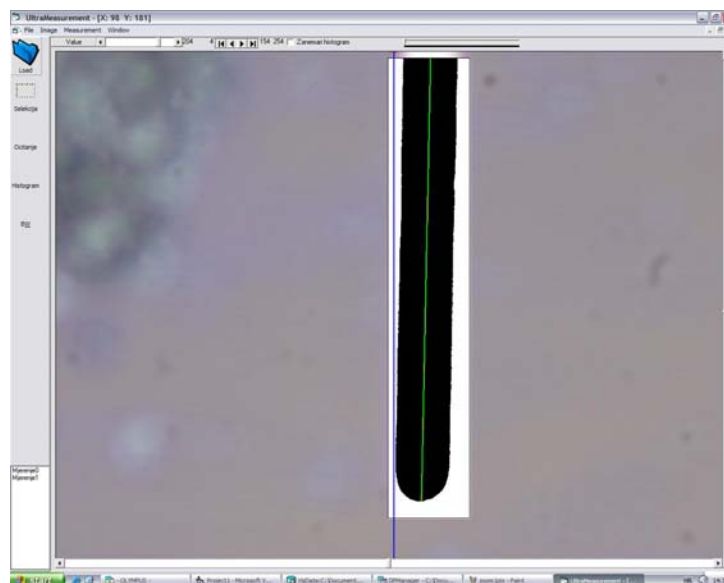
Prikaz originalnog softverskog rješenja

U dosadašnjim metodama umjeravanja preciznih mjernih skala koje su se koristile u LFSSB-u, nije bilo moguće izbjeći utjecaj mjeritelja u postupku umjeravanja mjerne skale. U području nanomjeriteljstva u kojem se odvija umjeravanje preciznih mjernih skala, utjecaj mjeritelja na mjernu nesigurnost umjeravanja je presudan.

Da bi izbjegli subjektivnost mjeritelja potrebno je na egzaktan način odrediti sredinu linije mjerne skale. To je jedino moguće ako se analizira slika, tj. pikseli. Zbog toga je izrađeno originalno softversko rješenje za viziranje linija. Program je izrađen u programu *Visual Basic* i koristi se za obradu slika linija mjerne skale. Proces obrade slike je statičan, što znači da je potrebno uzeti slike linije, a nije moguće obrađivati "živi" signal prikaza koji daje kamera.

Programski paket radi tako da sve piksele koji se vide na monitoru prebacuje u kombinaciju crno-bijelo, te se aritmetičkim algoritmima traži sredina linije, odnosno

sredina crnih ili bijelih piksela. Ako su linije crne onda je pozadina bijela i obrnuto. Na slici 40 prikazano je kako se u softverskom paketu dobije sredina vizirane linije.



Slika 40. Automatsko određivanje sredine vizirane linije [7]

Kada se nađe sredina linije, program pamti na kojem se pikselu ta srednja linija nalazi (u x koordinati). Nakon toga se vrši manualni pomak stolića i uzima se slika sa sljedećom linijom. Ponavlja se isti postupak pronalaska sredine linije i zatim softver razliku u pikselima između tih srednjih linija dodaje ili oduzima od očitane vrijednosti na laserskom interferometru.

Prije početka umjeravanja potrebno je podesiti ekran, odnosno saznati koliki je dužinski iznos svakog piksela, budući da se korekcija u pikselima dodaje ili oduzima od očitane vrijednosti na laserskom interferometru.

Podešavanje sustava

Podešavanje ekrana izvodi se na način da se uzmu dva prikaza iste linije dobivena kamerom, a koji su međusobno pomaknuti za udaljenost očitane na laserskom interferometru. U programskom paketu *Olympus DP-BSW* manager uzimaju se dvije slike te iste linije, te se u razvijenom programskom paketu dobiva udaljenost tih linija, a time i veličina 1 piksela koja iznosi recimo 0.00016041 mm za uvećanje objektiva od 20 puta.

Podošavanje sustava izvodi se svaki put prije upotrebe uređaja za umjeravanje preciznih mjernih skala s ciljem da se izbjegnu male promjene u dužinskom iznosu piksela koje bi se mogle pojaviti zbog različitih razina fokusa.

5.2.2 Eksperimentalna faza i ispitivanje

U fazi eksperimentiranja i ispitivanja uređaja izvršeno je ispitivanje utjecaja fokusa mikroskopa na sredinu linije mjerne skale. Dobivenim rezultatima uvidjelo se da uslijed različitog nivoa fokusiranja dolazi do pomaka sredine linije mjerne skale od 80 nm. Da bi izbjegli taj pomak, pristupilo se istraživanju pravocrtnosti vodilica kao glavnom uzroku gubljenja fokusa prilikom viziranja mjerne skale.

Isto su tako izvršena ispitivanja utjecaja temperaturnog zračenja osvjetljenja mikroskopa na sredinu linije mjerne skale. Dobiveni rezultati pokazuju da nakon vremenskog perioda od otprilike 6 sati dolazi do toplinske ravnoteže pri kojoj više nema pomaka linije mjerne skale uslijed temperaturnog rastezanja dijelova mikroskopa.

5.2.3 Potrebne djelatnosti do početka upotrebe

Umjeravanje preciznih mjernih skala se vrši u području nanomjeriteljstva i kao takvo je podložno raznim izvorima nesigurnosti koje se trebaju svesti na minimum. Stoga će se u daljnjem vremenskom periodu vršiti istraživanja kako bi se smanjila mjerna nesigurnost umjeravanja preciznih mjernih skala i to s posebnim osvrtom na:

- smanjenje utjecaja *Abbe*-ove pogreške na mjernu nesigurnost umjeravanja precizne mjerne skale,
- smanjenje utjecaja postavljanja optičkih komponenti na mjernu nesigurnost umjeravanja precizne mjerne skale,
- minimiziranje *drift*-a (odstupanje od postavljene vrijednosti pri vraćanju skale na postavljenu vrijednost) pri umjeravanju precizne mjerne skale,
- utjecaj temperaturnih gradijenata na uređaj, a time i na mjernu nesigurnost umjeravanja,
- utjecaj postavljanja mikroskopa na dobivanje homogenizirane slike,
- utjecaj izbora povećanja objektiva na mjernu nesigurnost,

- ponovljivost softvera,
- utjecaj odmaka skale u vertikalnoj i horizontalnoj ravnini na mjernu nesigurnost.

Procijenjena mjerna nesigurnost s kojom će LFSB učestvovati u međunarodnim usporedbenim mjerenjima iznosi $U = (150+L)$ nm, L u mm.

Uspješnost ostvarenog rješenja te potvrđivanje procijenjene mjerne nesigurnosti provjerit će se provedbom međunarodnih usporedbenih mjerenja s relevantnim mjeriteljskim institutima.

5.3 Područje ispitivanja hrapavosti površina

Set referentnih etalona hrapavosti (slika 41) izrađen je postupcima istim kao u proizvodnji integriranih krugova, dakle kao osnovni materijal korišten je monokristal silicija (*wafer*) odnosno silicijska pločica.



Slika 41. Set referentnih etalona hrapavosti LFSB-a [3]

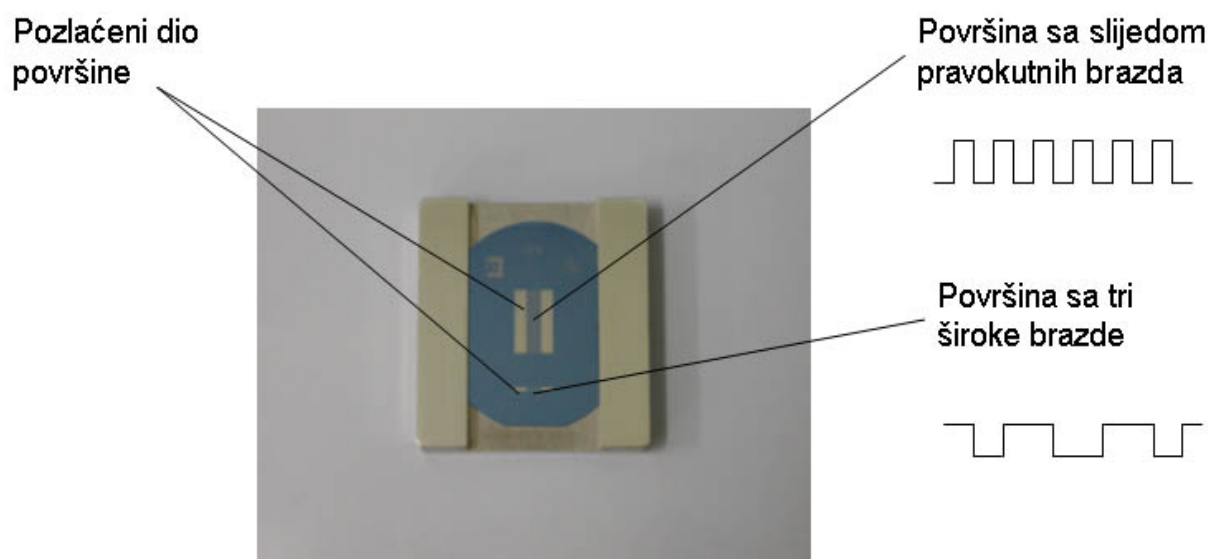
Planarnim tehnološkim postupkom koji se danas standardno koristi u mikroelektroničkoj industriji dobivene su dvije mjerne površine s vrlo preciznim pravokutnim brazdama: prva površina sa slijedom pravokutnih brazda dimenzija 15 x 10 mm i druga površina s tri široke brazde dimenzija 3 x 10 mm. Oblik brazdi izabran je

temeljem istraživanja utjecaja pojedinih elemenata uređaja za ispitivanje hrapavosti površina na točnost reprodukcije stvarnog profila. S tim u vezi izvršeno je istraživanje utjecaja oblika vrha ticala, utjecaja vođenja ticala pomoću nožice i utjecaja elektroničkog – filtra uređaja. Uvećane brazde etalona hrapavosti prikazane su slikom 42.



Slika 42. Uvećana slika brazdi referentnih etalona hrapavosti LFSB-a [3]

Pozlaćeni dio površine s obje bočne strane površina s brazdama, širine 3mm, koristi se za mjerenje dubine brazde interferencijskom metodom, dok se centralni nepozlaćeni dio površine koristi za mjerenja parametara hrapavosti kontaktnom metodom pomoću uređaja s ticalom. Prikaz jednog takvog etalona iz seta referentnih etalona hrapavosti prikazan je na slici 43.



Slika 43. Referentni etalon hrapavosti LFSB-a [3]

Set se sastoji od 8 zasebnih referentnih etalona hrapavosti, nazivnih vrijednosti parametara u iznosima R_a od: 0,025; 0,050; 0,100; 0,200; 0,400; 0,800; 1,20 i 1,60 μm , te nazivnim vrijednostima parametra d u iznosu: 0,050; 0,100; 0,200; 0,400; 0,800; 1,60 i 3,20 μm . Time je pokriveno područje najčešćih nazivnih vrijednosti etalona za podešavanje, tako da se elektroničko-mehanički uređaj s ticalom može upotrijebiti kao komparator.

Zanimljivo je za napomenuti da je *Laboratorij za precizna mjerenja dužina* još 1986. godine proveo usporedbena mjerenja na razini PTB-LFSB sa vrlo zadovoljavajućim rezultatima. Kao prilog tome, prikazane su dvije tablice, tablica 8 i 9, s usporedbenim rezultatima za dubinu brazdi i parametar hrapavosti.

Tablica 8. i 9. Usporedbena mjerenja PTB-LFSB 1986. godine [3]

Referentni etalon hrapavosti LFSB Br.	LFSB		PTB		ΔR_a μm	En
	R_a μm	U μm	R_a μm	U μm		
17	0,031	0,003	0,028	0,003	0,003	0,71
19	0,116	0,003	0,111	0,010	0,005	0,48
21	0,448	0,003	0,445	0,030	0,003	0,10
27	1,757	0,008	1,720	0,090	0,037	0,41

Referentni etalon hrapavosti LFSB Br.	LFSB		PTB		Δd_b μm	En
	d_b μm	U μm	d_b μm	U μm		
17	0,062	0,003	0,060	0,005	0,002	0,34
19	0,236	0,003	0,240	0,008	- 0,004	0,46
21	0,925	0,005	0,961	0,010	- 0,036	3,22
27	3,794	0,020	3,883	0,020	- 0,089	3,15

Kao što je već prije rečeno, umjeravanje preciznih mjernih skala vrši se u području nanomjeriteljstva, te je kao takvo jako podložno temperaturnim utjecajima na točnost mjerenja. Ostvarenjem svih potrebnih uvjeta okoliša moguće je početi s upotrebom uređaja. Budući da je uređaj za umjeravanje preciznih mjernih skala vrlo specifičan zbog područja u kojem se vrše umjeravanja, osnovna upotreba uređaja biti će za potrebe LFSB-a u okviru međunarodnih usporedbenih mjerenja, te za potrebe hrvatskog

gospodarstva, kao i za druge laboratorije izvan Republike Hrvatske. *Laboratorij za precizna mjerenja dužina* koji je ujedno i *Nacionalni laboratorij za duljinu* obvezan je sudjelovati u *MRA* usporedbama koje uglavnom ostvaruje u okviru projekata *EUROMET*-a. Osvarenjem projekta, odnosno izgradnjom mjernog sustava za umjeravanje preciznih mjernih skala, *Laboratoriju* je otvorena mogućnost i za provedbu međunarodnih aktivnosti odnosno usporedbe na području mjernih skala u području mikro nanomjeriteljstva. S tim u svezi, *Laboratorij* je prijavio sudjelovanje na *EUROMET* projektu 882 "*Calibration of line scales*", L-K7, te će prema izrađenom planu provesti mjerenja u drugoj polovici 2007. godine. Stvarna validacija mjeriteljskih sposobnosti izrađenog sustava biti će provjerena upravo sudjelovanjem u navedenom projektu. Do tada će se intenzivno nastaviti istraživanje utjecaja na mjernu nesigurnost uz suradnju s europskim mjeriteljskim institutima (PTB, MIRS, BEV).

Potrebno je napomenuti da set osam referentnih etalona hrapavosti sačinjava etalonsku bazu na području Republike Hrvatske. Osim toga, etaloni hrapavosti prodani su u nekoliko zemalja Europe, a u Sloveniji i Italiji su sastavni dio referentnih etalonskih baza na području mjerenja parametara hrapavosti.

Tijekom 2005. godine započela je izgradnja *Odjela za nanomjeriteljstvo* unutar LFSB-a za provođenje mjerenja u nano području, uvažavajući svjetska iskustva u opremanju takvog prostora. Pri tome je vrlo bitno spomenuti da je izgrađen "plivajući pod" koji je odvojen od ostatka građevine, a sve u svrhu smanjenja vibracija koje jako utječu na ovako zahtjevna mjerenja. Isto je tako postavljen specijalni klimatizacijski sustav u svrhu zadovoljenja uvjeta okoliša na najvišoj mogućoj razini. U *Odjelu za nanomjeriteljstvo* u postupku razvoja i usvajanja su:

- završetak modifikacije interferometra uz primjenu jedno stabiliziranog He-Ne lasera; primjenom ovog interferometra omogućit će se osiguravanje sljedivosti za duljinu unutar Republike Hrvatske,
- završetak vlastite izrade sustava za umjeravanje preciznih mjernih skala uz provjeru mjernih nesigurnosti u okviru *EUROMET* projekta (prijava 2004. godine),
- razvoj sustava za primjenu holografije na tribološkim problemima u nano području,
- nabavka mjerne opreme i ovladavanje postupcima 3D ispitivanja hrapavosti u nano području,
- izrada novog poboljšanog niza referentnih etalona hrapavosti LFSB-a.

ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad opisuje problematiku i izazove u dimenzijskom mikro i nanomjeriteljstvu. To je postignuto pregledom tipičnih mjernih zahtjeva i raspravom o raspoloživim uređajima i mjernim metodama. O problematici mjernog jedinstva, sljedivosti i umjeravanju, raspravlja se naknadno. Konačne potrebe i nedostaci identificirani su temeljem navedenih zapažanja.

Potrebe za dimenzijskim mikro i nanomjeriteljstvom očite su, a kako kritične dimenzije padaju sve više na skali, a geometrijska kompleksnost i mjerni zahtjevi rastu, raspoložive tehnologije ne čine se dostatnima. Glavna istraživanja i razvojni uspjesi biti će u nalaženju odgovora na te izazove, što će djelomično biti pokušano riješeno kroz projekt IMERA (Implementing Metrology in the European Research Area). Razvoj naravno mora uključivati nove mjerne principe i uređaje, ali jednako je važna problematika u pravilima dozvoljenih odstupanja i procedurama. Konačno, problematika sljedivosti i umjeravanja od najveće je važnosti u ambicioznim razvojnim planovima u mikro i nanotehnologiji industrijskog okruženja.

Laboratorij za precizna mjerenja dužina Fakulteta strojarstva i brodogradnje već je preko dvadeset godina uključen u područje mikro i nanomjeriteljstva kroz realizaciju referentnih etalona hrapavosti u osiguranju mjernog jedinstva. Cilj je *Laboratorija* da kroz razvoj i realizaciju poboljšanih referentnih etalona hrapavosti, kao i usvajanjem novih metoda i uređaja, te nabavkom nove opreme, u potpunosti stavi u funkciju *Odjel za nanomjeriteljstvo* u okviru *Laboratorija*.

LITERATURA

- [1] Hansen H.N., Carneiro K., Haitjema H., De Chiffre L., Dimensional Micro and Nano Metrology; Annals of the CIRP Vol. 55/2/2006: 721-743.
- [2] Bosse H., Flügge J., Koenders L., Dai G., Danzebrink H.-U., Wilkening G., Nanometrology at PTB – Euromet Length Workshop NANOtrends, Bucharest, Romania, 18 &19 listopada 2004.
- [3] Dusman F., Mahović S., Radić V., Niz baždarnih etalona hrapavosti razvijen u LFSB-u, FSB 1986.
- [4] Šercer M., Runjić-Sokele M., Dobranić J., Mikrotehnika i nanotehnika, Strojarstvo 41 (5, 6): 241-252, 1999.
- [5] Whitehouse D. J., The Handbook of Surface and Nanometrology, Institute of Physics Publishing, Bristol-Philadelphia, UK, 2003.
- [6] Hrman D., SPM tehnike – seminarski rad, poslijediplomski studij, FSB 2006.
- [7] Medić S., Završno izvješće o rezultatima projekta, FSB 2006.
- [8] <http://www.nanotech-now.com/>
- [9] <http://nanoatlas.ifs.hr/>
- [10] <http://www.ipt.arc.nasa.gov/>
- [11] <http://festival.znanost.org/2003/bonacci.html>
- [12] Reader's Digest Hrvatska, izdanje siječanj 2007.