

DEFINICIJA

Metrologija je nauka koja obuhvata teoretske i praktične aspekte merenja.

PODELA :

- Naučna ili fundamentalna metrologija
- Primenjena ili industrijska metrologija,
- Zakonska metrologija

Koncepti metrologije:

- Ponovljivost
- Kalibracija
- Tačnost
- Preciznost
- Osetljivost i poremećaji

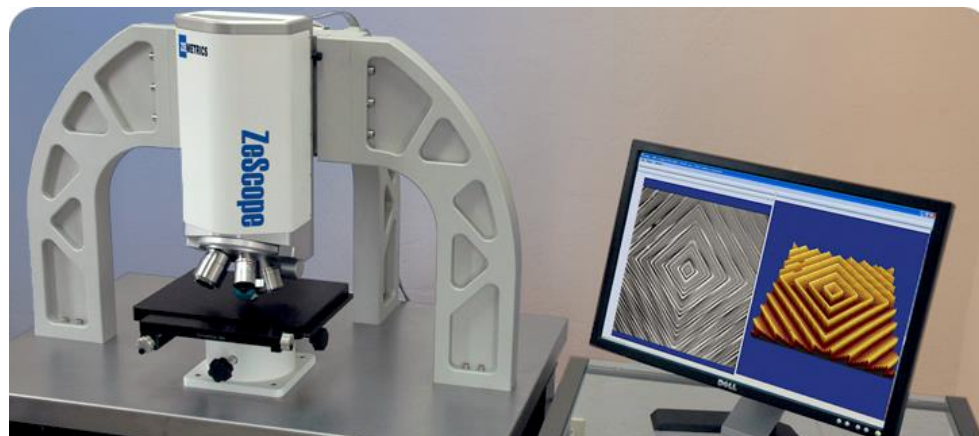


MIKRO METROLOGIJA

- Tradicionalni Sistem Internacionalnih Jedinica i metode merenja gube smisao u mikro opsegu
- Neophodan je razvoj novih strategija i prilagođavanje postojećih mikro svetu
- Obavezna tehnologija za razvoj i obradu delova u mikro oblasti

IZAZOVI I PROBLEMI U PRIMENI :

- Poboljšanje tačnosti i rezolucije
- Prostor za instrumentaciju je ograničen i mali
- Teško izvodljiva merenja i kontrole tokom mikro obrade
- Teško izvodljiva stezanja i pozicioniranja mikro delova



TRENDOVI:

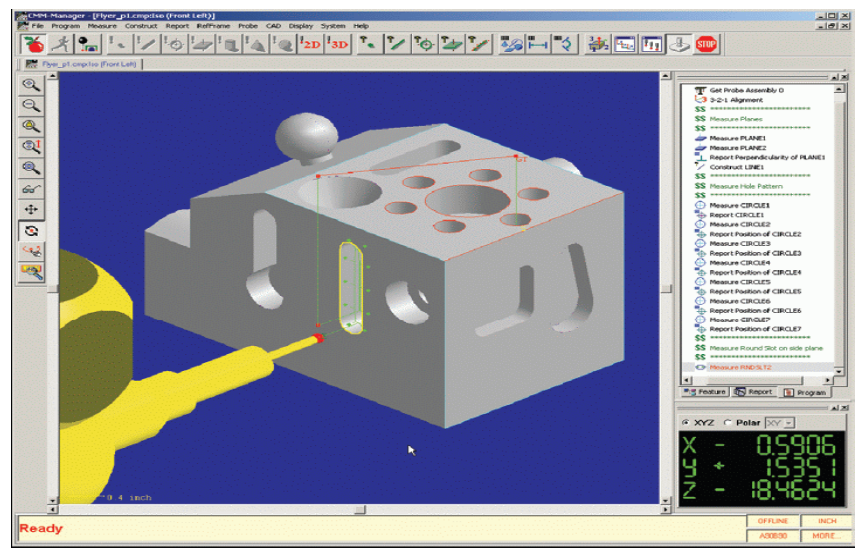
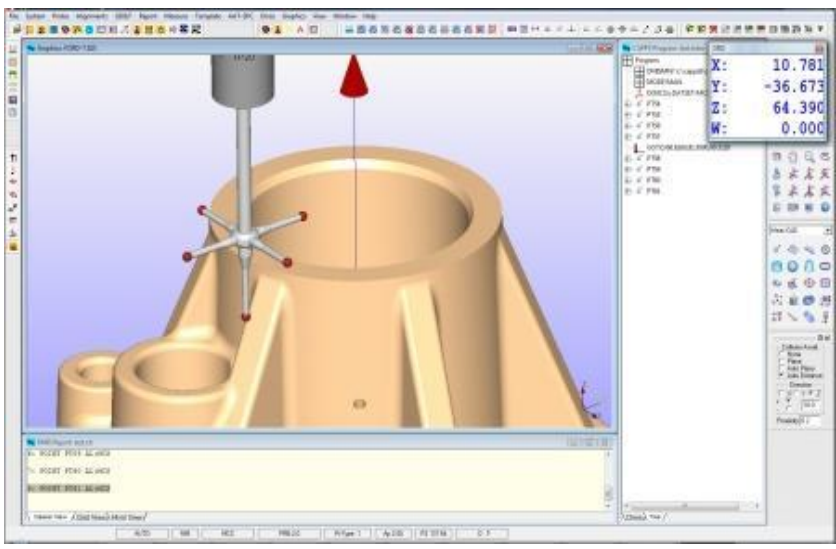
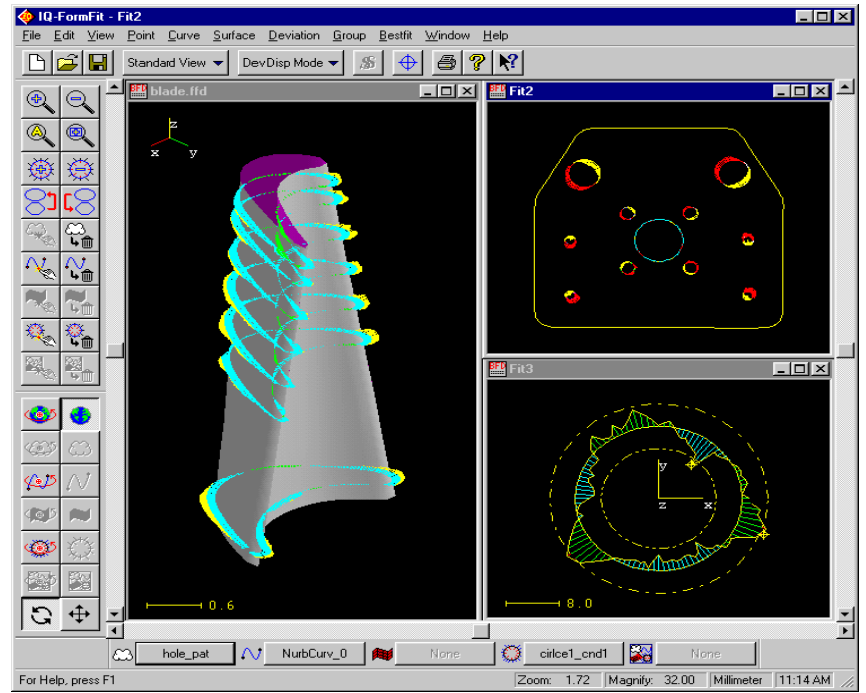
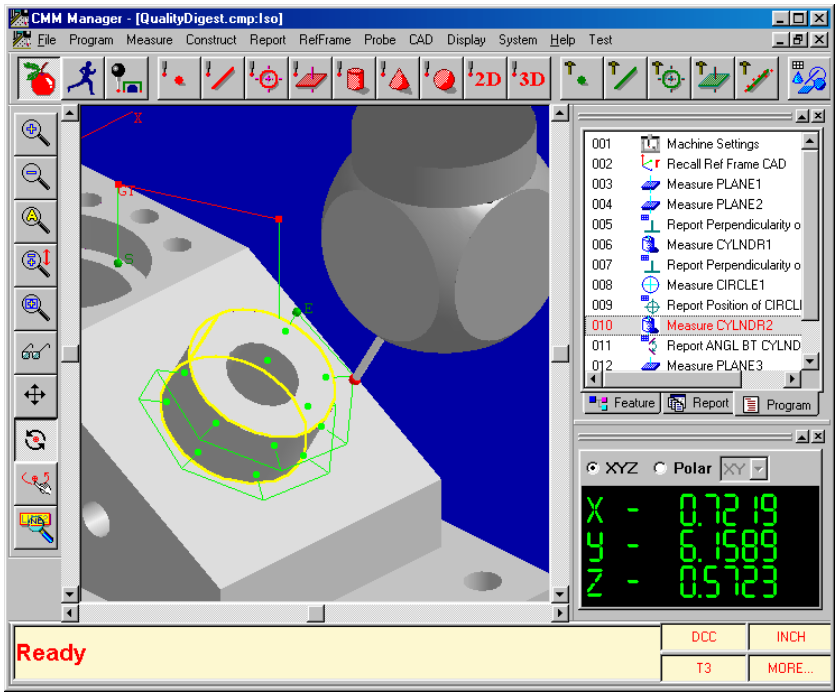
- Minijaturizacija postojećih koordinatnih mernih mašina (CMM)
- Kombinacija kontaktnih i nekontaktnih metoda merenja
- Poboljšanje tačnosti i rezolucije
- Primena dostignuća mikro i nano tehnologije

MIKRO KOORDINATNE MERNE MAŠINE

- Elektromehanički uređaji koji se koriste za tačno i precizno merenje delova
- Merni sto i noseća struktura
- Vođice
- Trodimenzionalni pristup delu
- Merna glava sa senzorskim pipcima
- Rezolucija 10~100 nm
- Brzina merenja 1~3 mm/sec

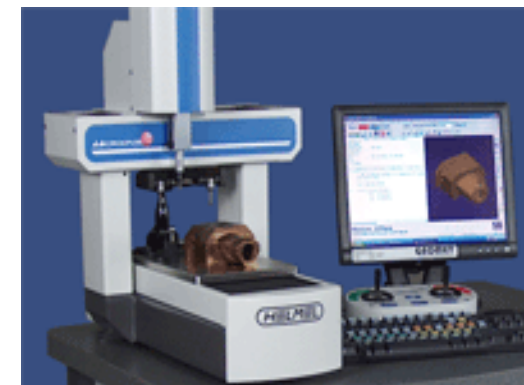


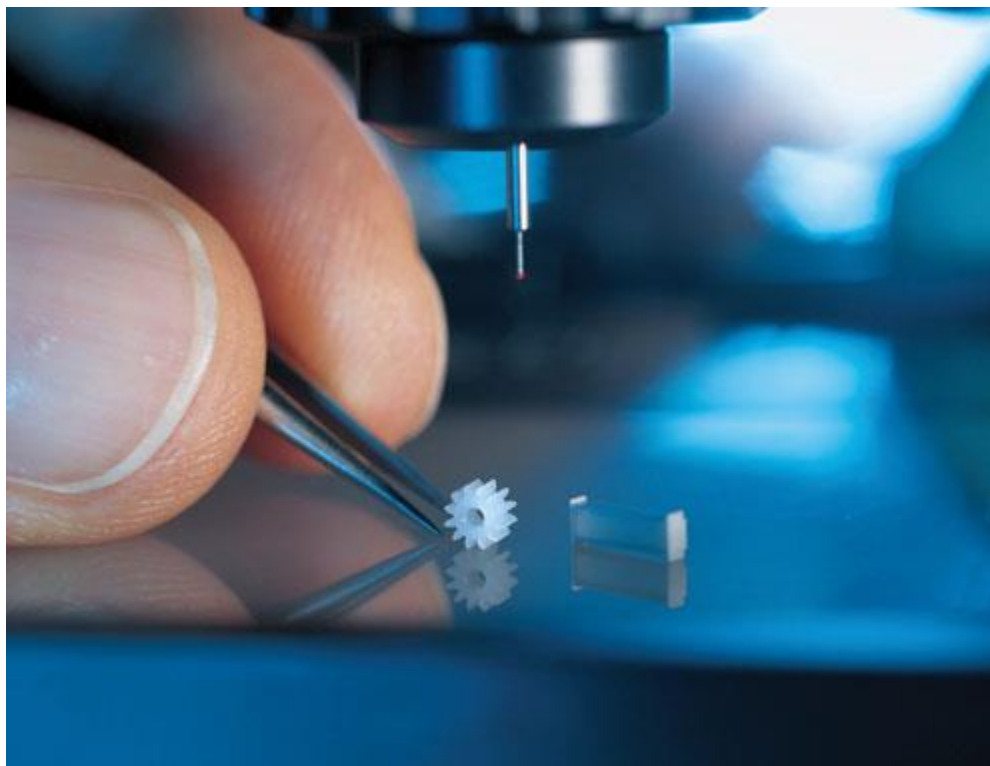
MIKRO OBRADA I KARAKTERIZACIJA – MIKRO METROLOGIJA - 5



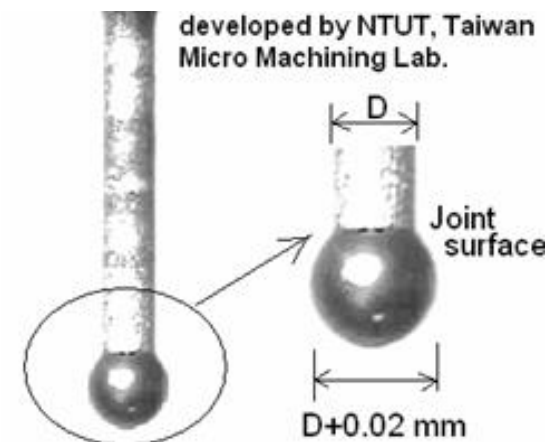
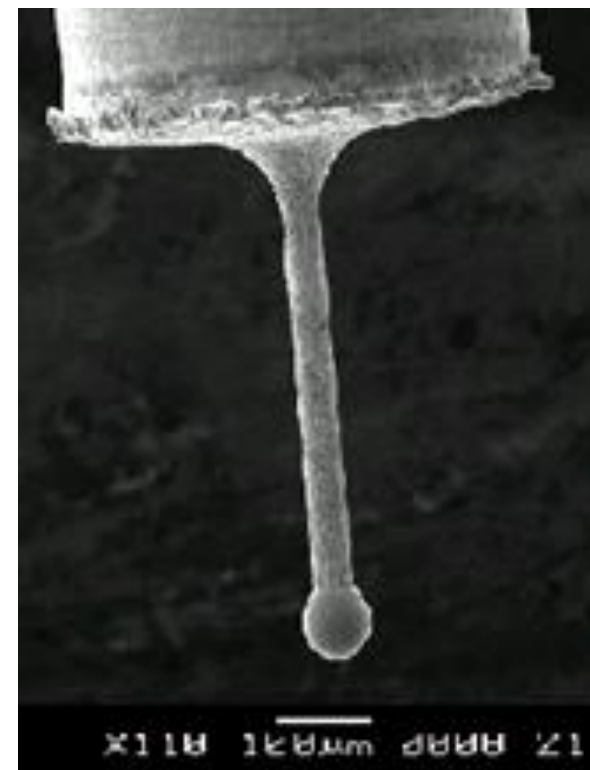
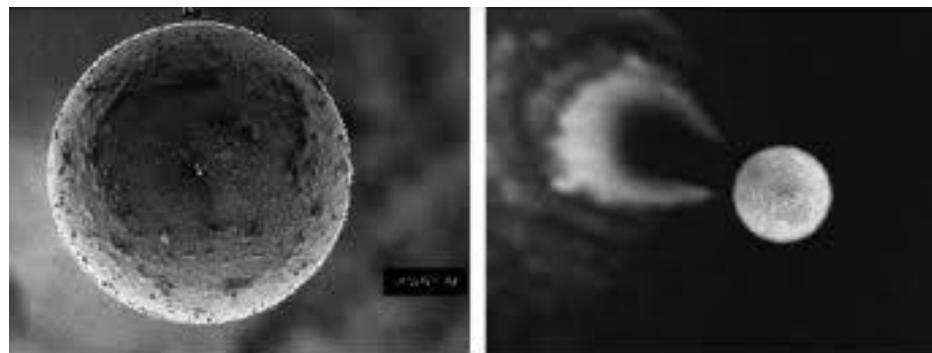


MIKRO KOORDINATNE MERNE MAŠINE - PRIMERI

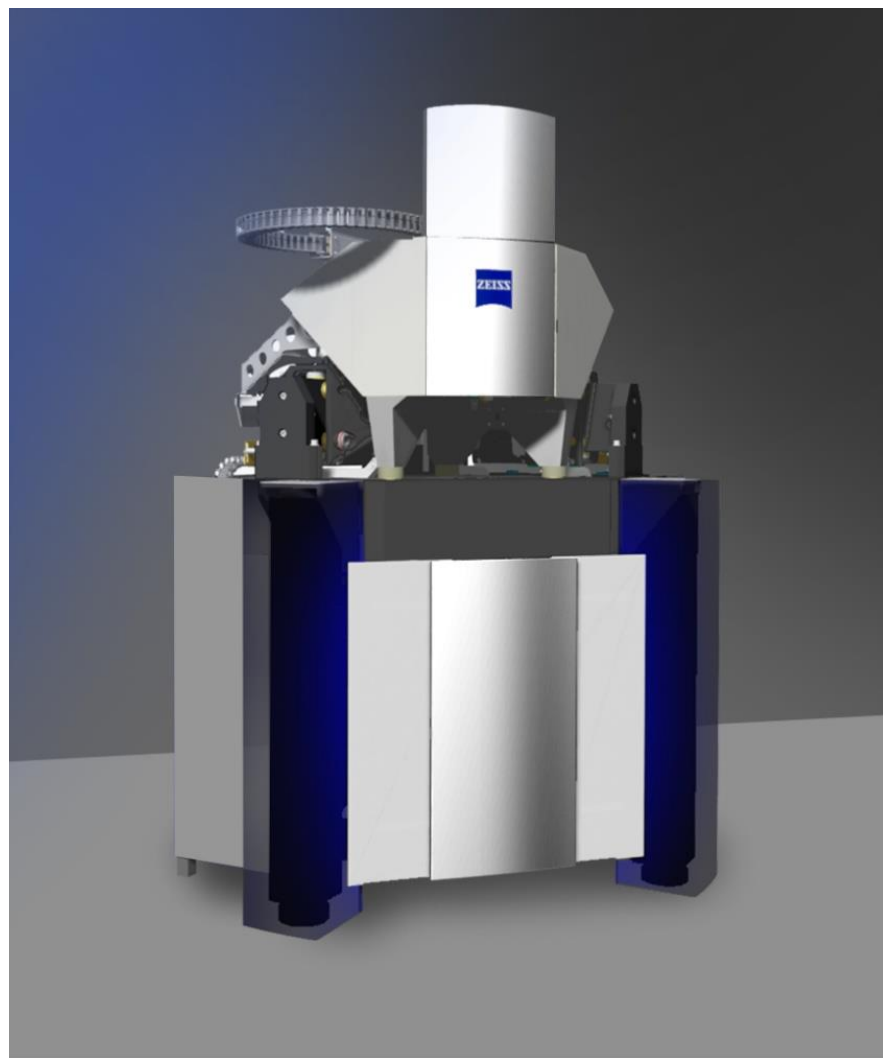


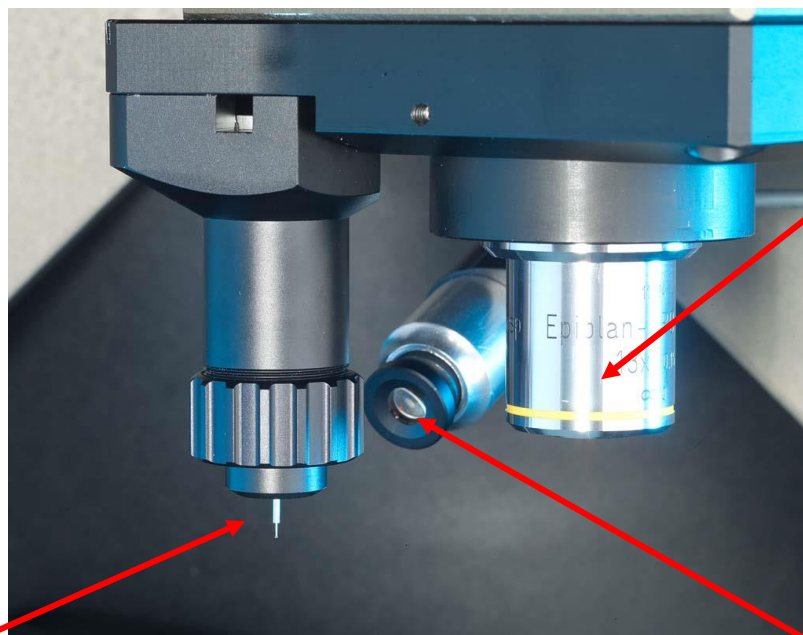


MIKRO MERNI PIPCI



ZEISS F-25 Micro-CMM



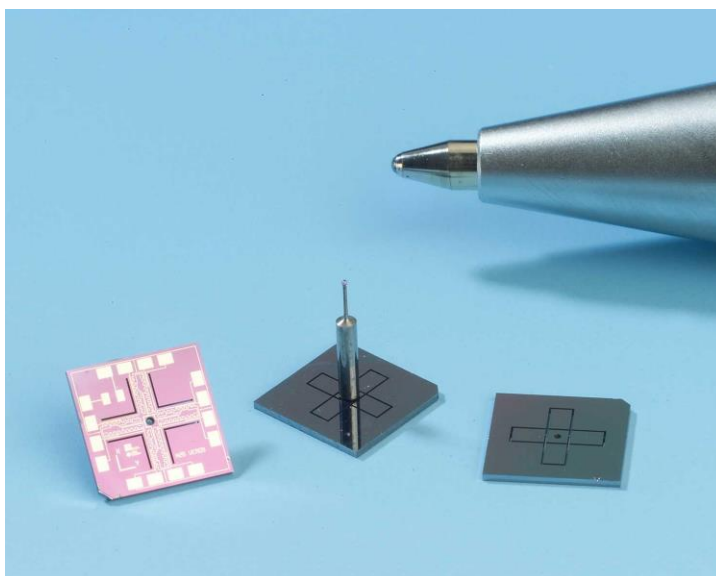


**Optical
Sensor**

**Visualizing
Camera**

Tactile

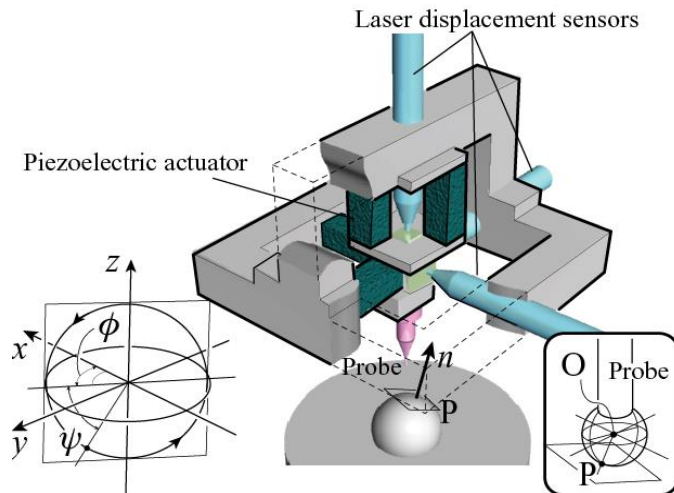
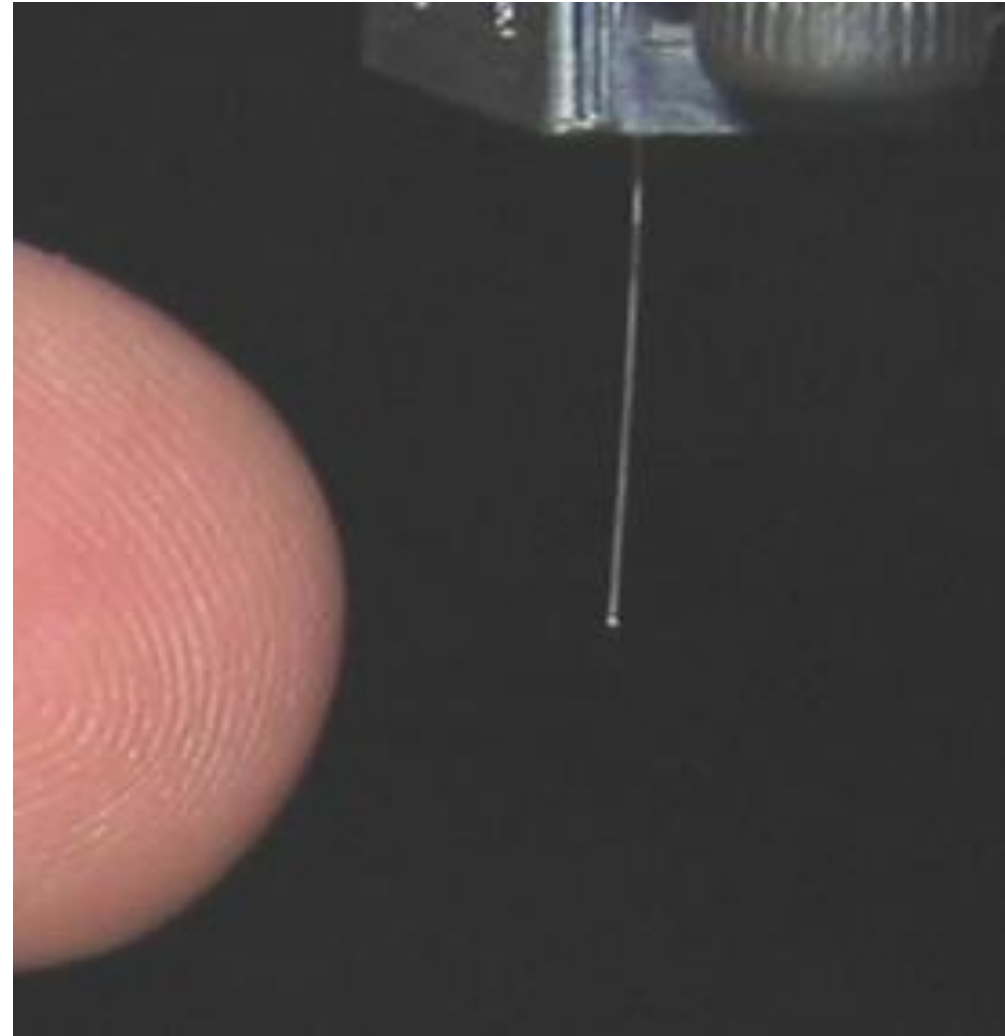
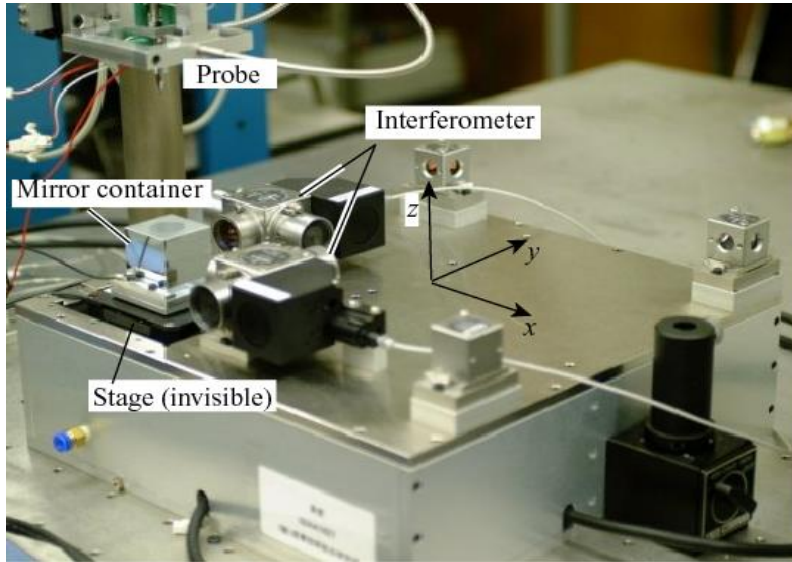
**Scanning
Probe**

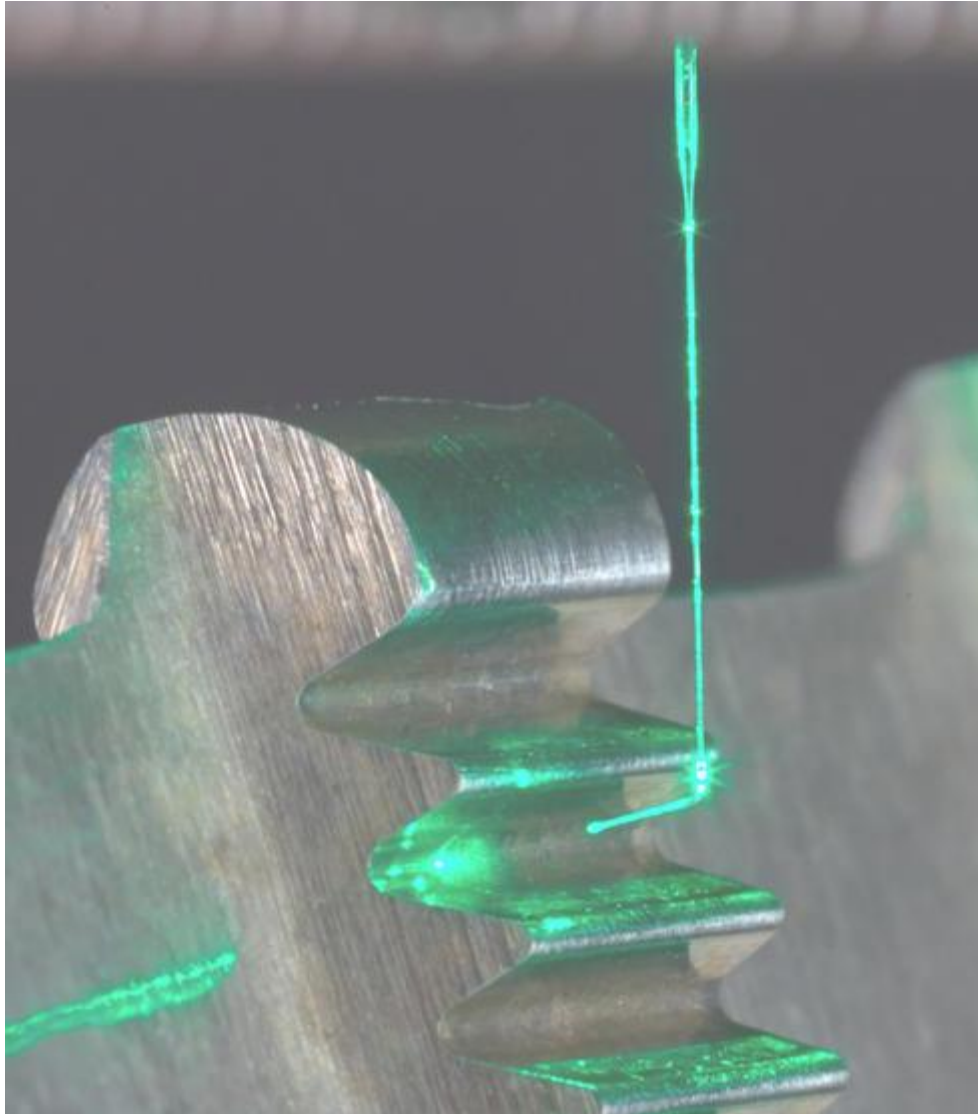


Dve veličine mernog pipka
130 μ m vrh/prečnik osovinice 200 μ m
120 μ m vrh/prečnik osovinice 50 μ m
Sila skeniranja: 0.5 mN / 0.250 mN
Savijanje vrha : 1 μ m
Dužina mernog pipka : 7 mm
Max dubina merenja: 4 mm

mikro CMM Japan

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

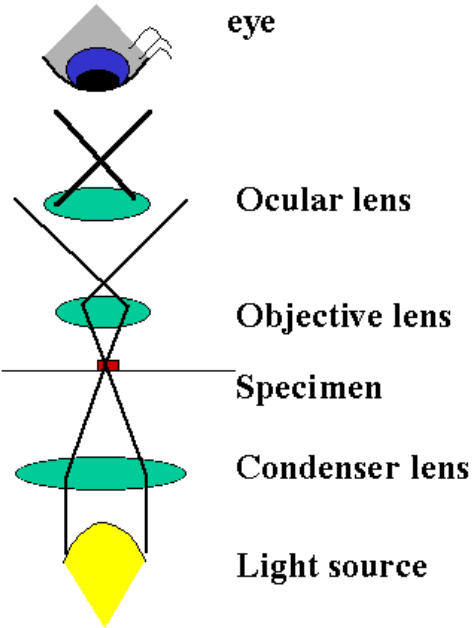




Patentirana Werth Fiber Probe (WFP) je merni pipak L-oblika za koordinatne mašine. Kontaktna sila od mN i prečnik kuglice od 20 μm su neophodni za površine izrađene mikroobradom.

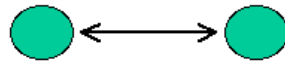
OPTIČKA MIKROSKOPIJA

- Jedna od osnovnih metoda za ispitivanje makro detalja prostorne strukture neprovidnih materijala
- Talasna dužina vidljivog zračenja $\lambda_v \sim 400-700 \text{ nm}$
- Maksimalna teoretska rezolucija je oko polovine talasne dužine snopa koji pada na objekat → najbolja rezolucija do 200 nm

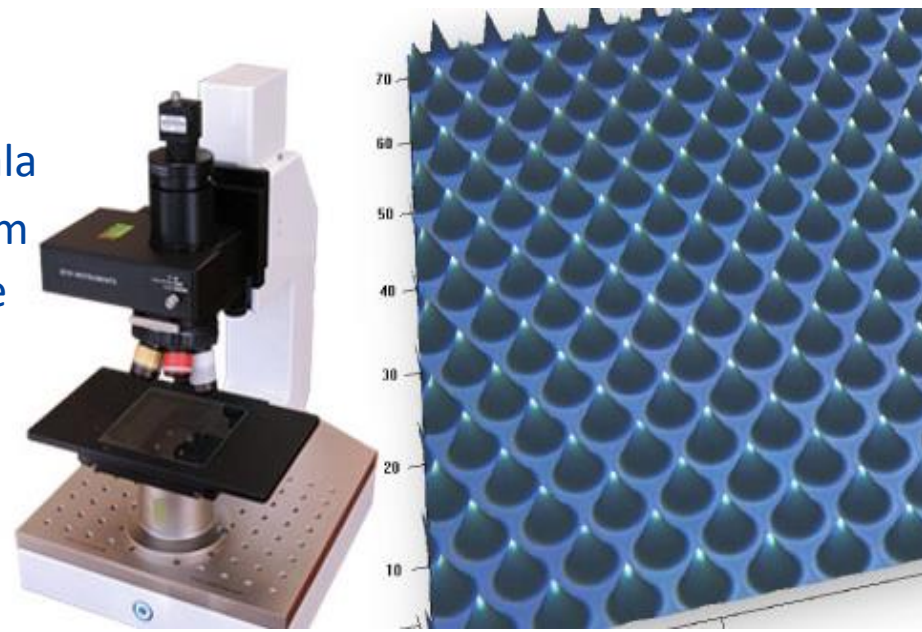


Resolution: $0.17 \mu\text{m}$
(Human Eye: $100 \mu\text{m}$)

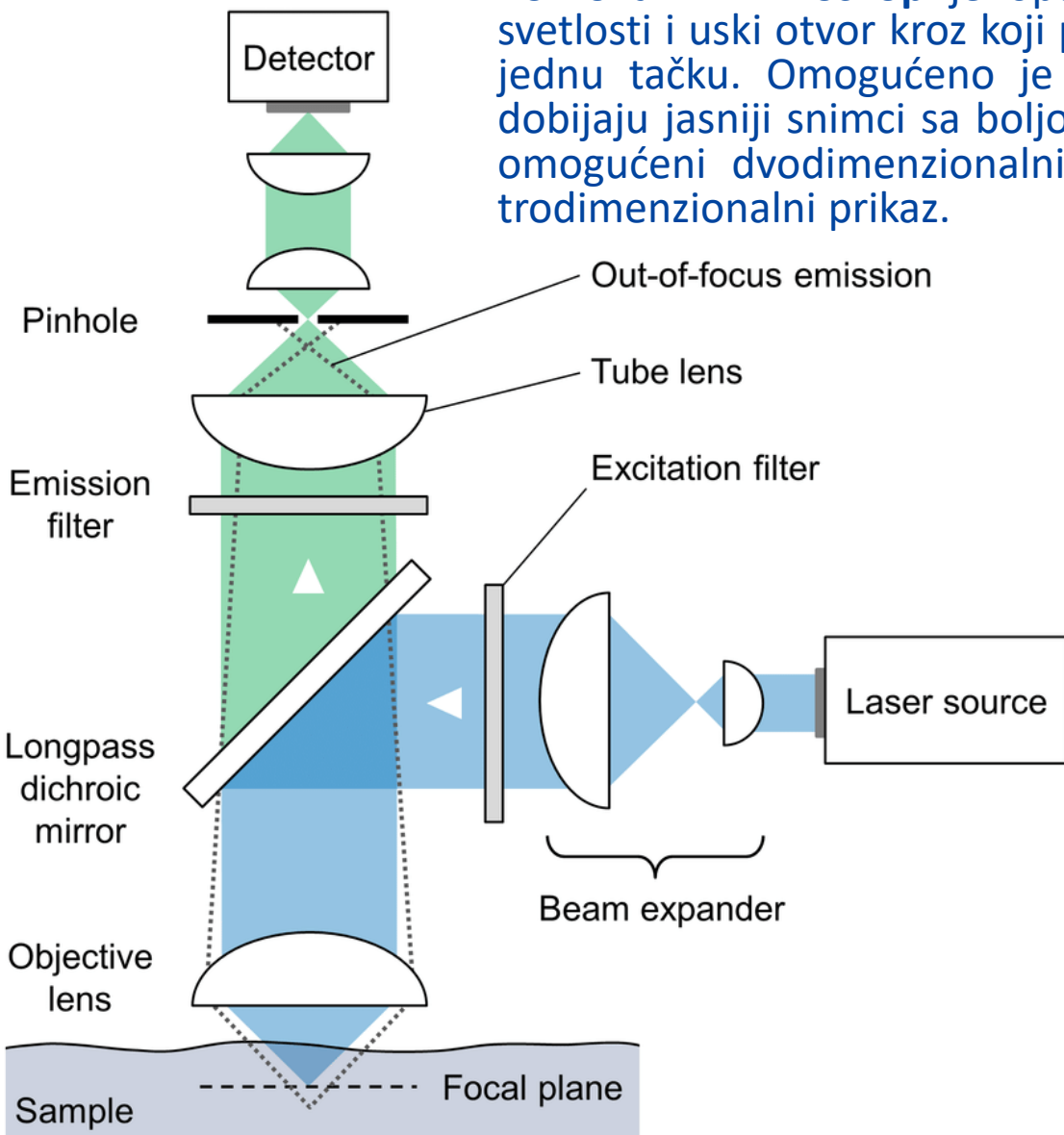
$0.17 \mu\text{m}$

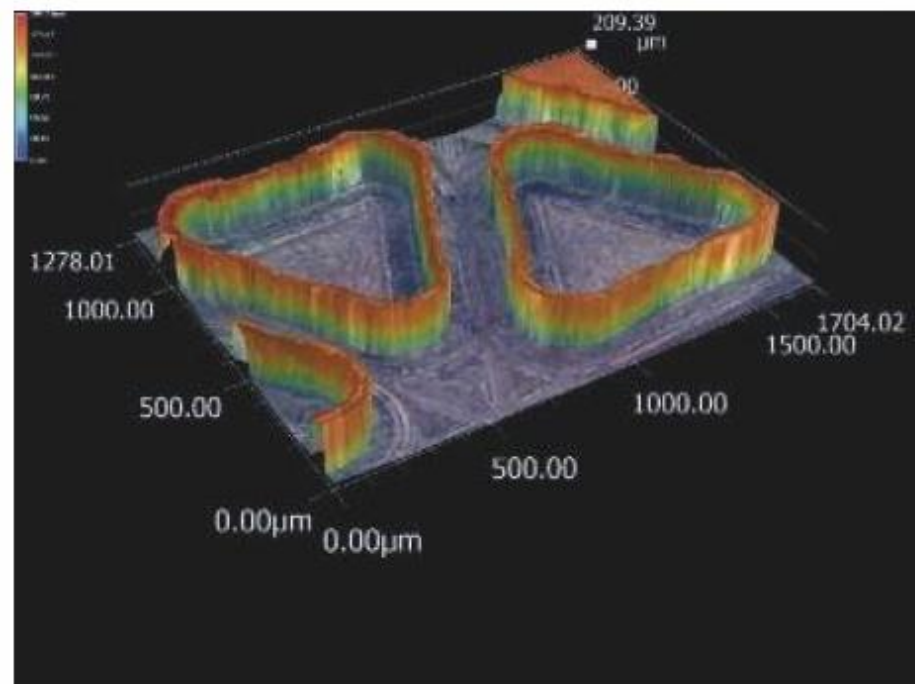
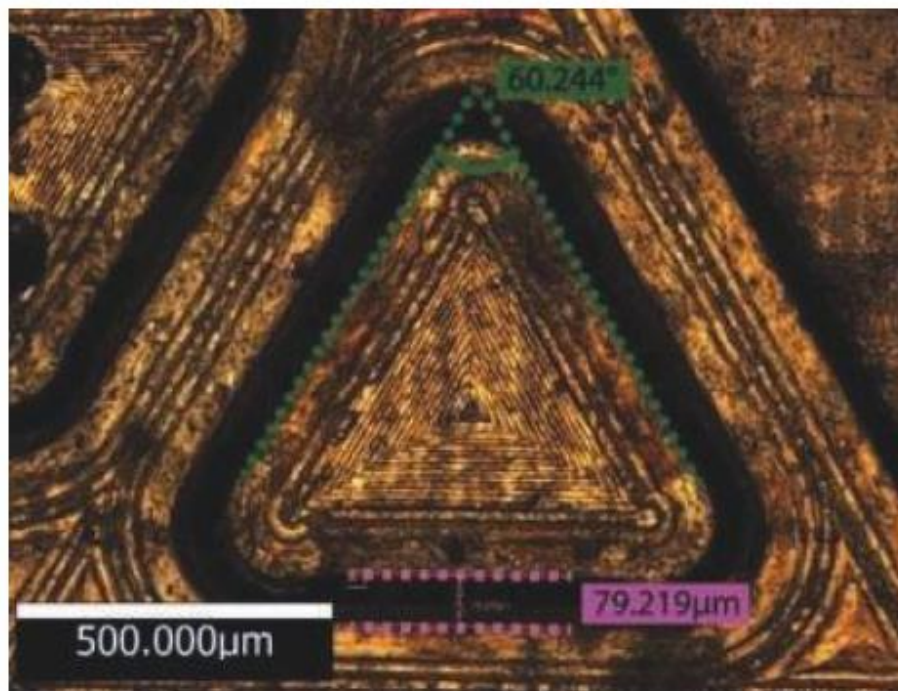


Magnification 1000 x



Konfokalni mikroskop je optički mikroskop koji ima laserski izvor svetlosti i uski otvor kroz koji prolazi odbijeni zrak koji je fokusiran na jednu tačku. Omogućeno je i skeniranje tačku po tačku čime se dobijaju jasniji snimci sa boljom rezolucijom i kontrastom. Takođe su omogućeni dvodimenzionalni snimci po nivoima, čime se postiže trodimenzionalni prikaz.

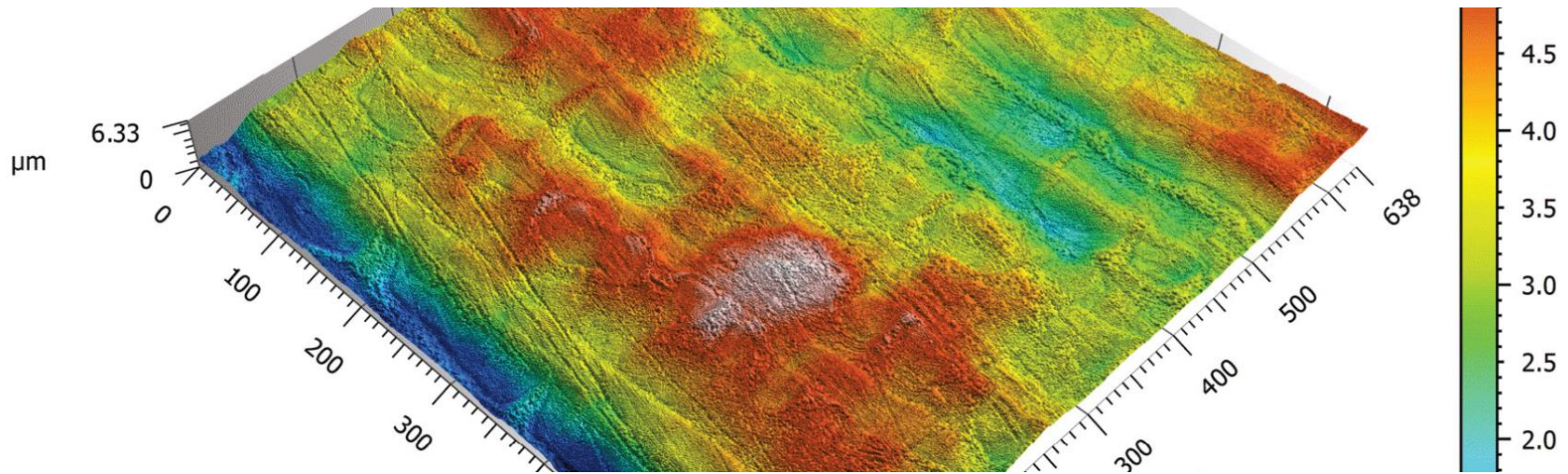
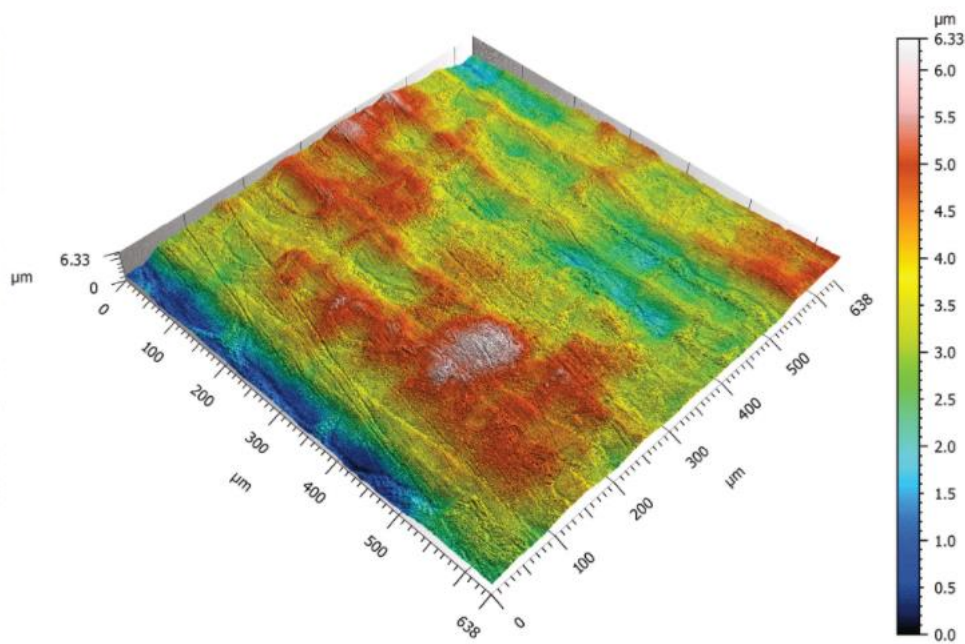




Trougaoni zidovi projektovane širine od 100 mikrometra su dobijeni mikro glodanjem. Stvarna izmerena širina je bila 79.2 mikrometra.

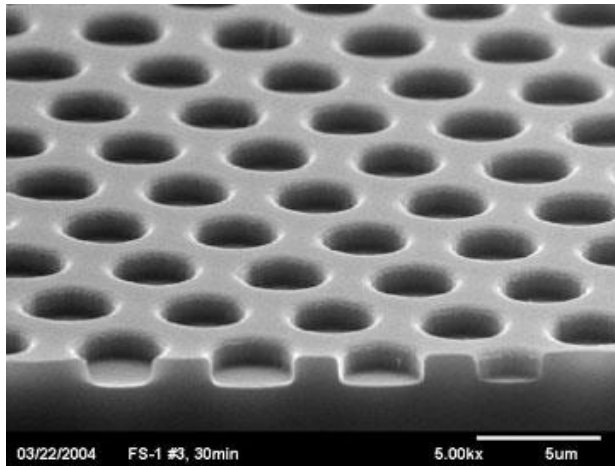
Optički mikroskop daje širu sliku i to samo dvodimenzionalni prikaz.

Konfokalni mikroskop se može koristiti i kao senzor visine na nanometarskom opsegu, što se u mikro inženjerstvu koristi za određivanje visine i dubine.



ELEKTRONSKA MIKROSKOPIJA

- Koristi talasna svojstva elektrona, omogućavajući istraživanje detalja prostorne strukture i do nekoliko među - atomskih rastojanja
- Da bi se mogao raspoznati objekat veličine 1nm potrebno je na njega usmeriti elektrone koji će imati brzinu približno 100 000 m/s
- Za ubrzavanje elektrona - napon od 50-100 000 V
- Elektron tada ima talasnu dužinu od oko 0.5nm



ISTORIJSKI RAZVOJ

- Prvi elektronski mikroskop je konstruisan 1928-1934.
- Prvi elektronski mikroskop je napravljen 1931.god
- Prvi SEM napravljen je 1940.god.



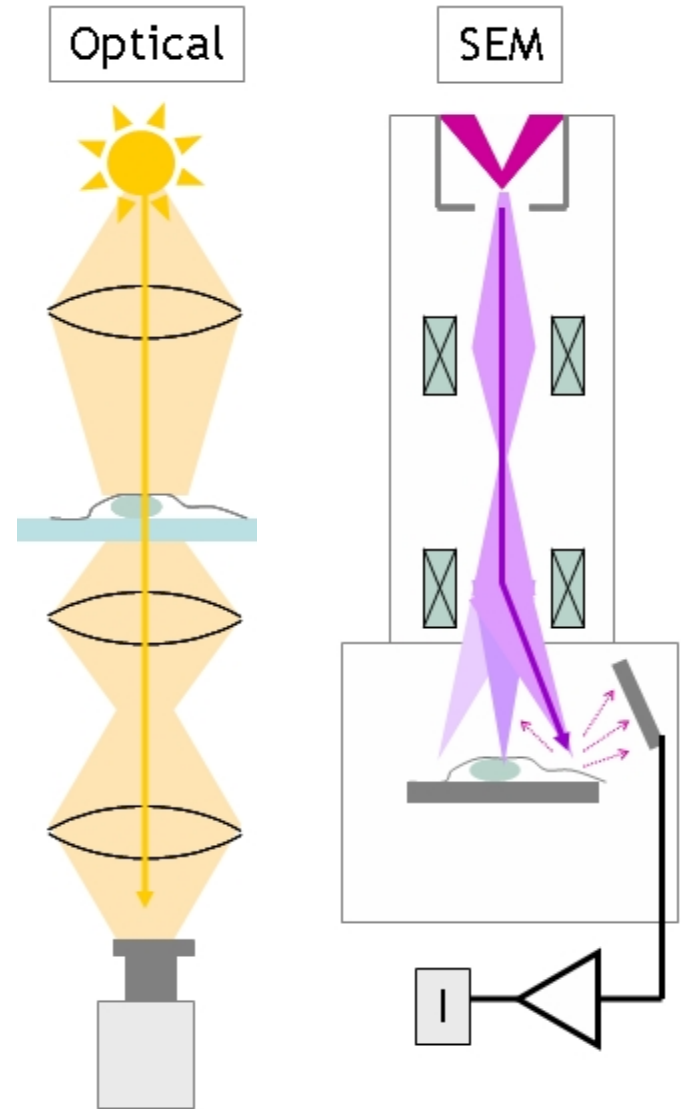
OSNOVNI PRINCIP RADA:

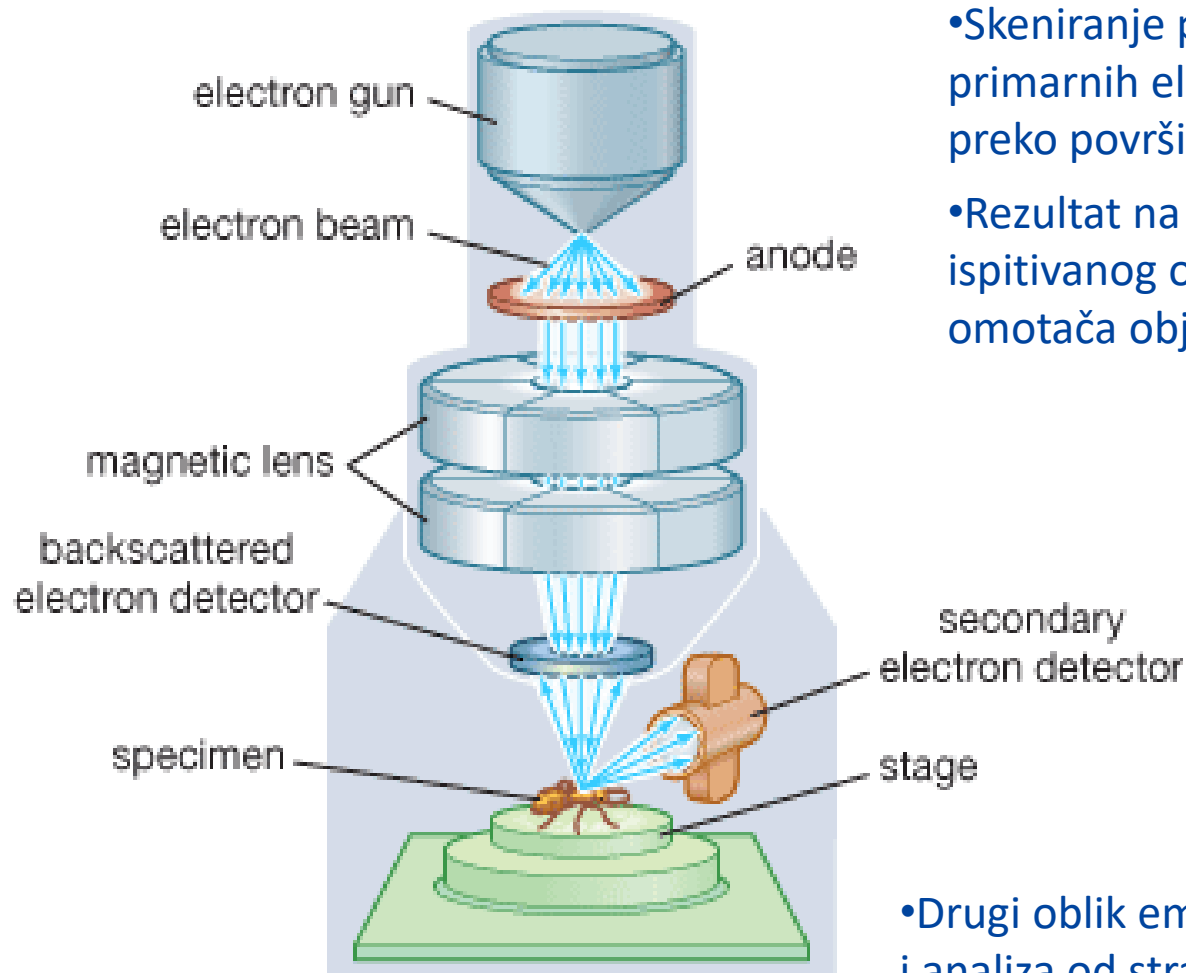
Umesto vidljive svetlosti i optičkih sočiva, za dobijanje uveličane slike objekta kod elektronskog mikroskopa koristi se snop elektrona koji se usmerava i fokusira uz pomoć elektromagnetnog polja.

- Jak vakuum - sprečavanje rasipanja elektrona i jonizacije molekula vazduha
- Fokusanje elektrona - ne može staklenim sočivima, već magnetnim kalemovima

SKENIRAJUĆA ELEKTRONSKA MIKROSKOPIJA (SEM)

- Jedna je od najviše korišćenih metoda u karakterizaciji materijala i analizu površine čvrstih uzoraka
- Skenira površinu preparata - sliku oblikuje detekcijom elektrona koji se odbijaju od spoljašnje površine
- Uvećanja od 10 do preko 500,000
- Morfologija ispitivanog materijala (topografija) i precizna informaciju o hemijskom sastavu materijala u blizini njegove površine





- Skeniranje površine je prelaženje uskog snopa primarnih elektrona energije od 100 eV-50 keV preko površine uzorka
- Rezultat na ekranu je topografska slika površine ispitivanog objekta, odn. površina metalnog omotača objekta

- Interakcija elektrona primarnog snopa i molekula (atoma) uzorka izaziva izbacivanje sekundarnih elektrona sa površine skeniranog uzorka

- Sekundarne elektrone energije od 50 eV– detektor - indukcija el. signala - pojačanje i digitalizacija

- Drugi oblik emisije sa uzorka (X zraci) - skupljanje i analiza od strane specifičnih detektora

© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

**JEOL SEM
JSM-5510LV**



**JEOL SEM JSM-
7001F**



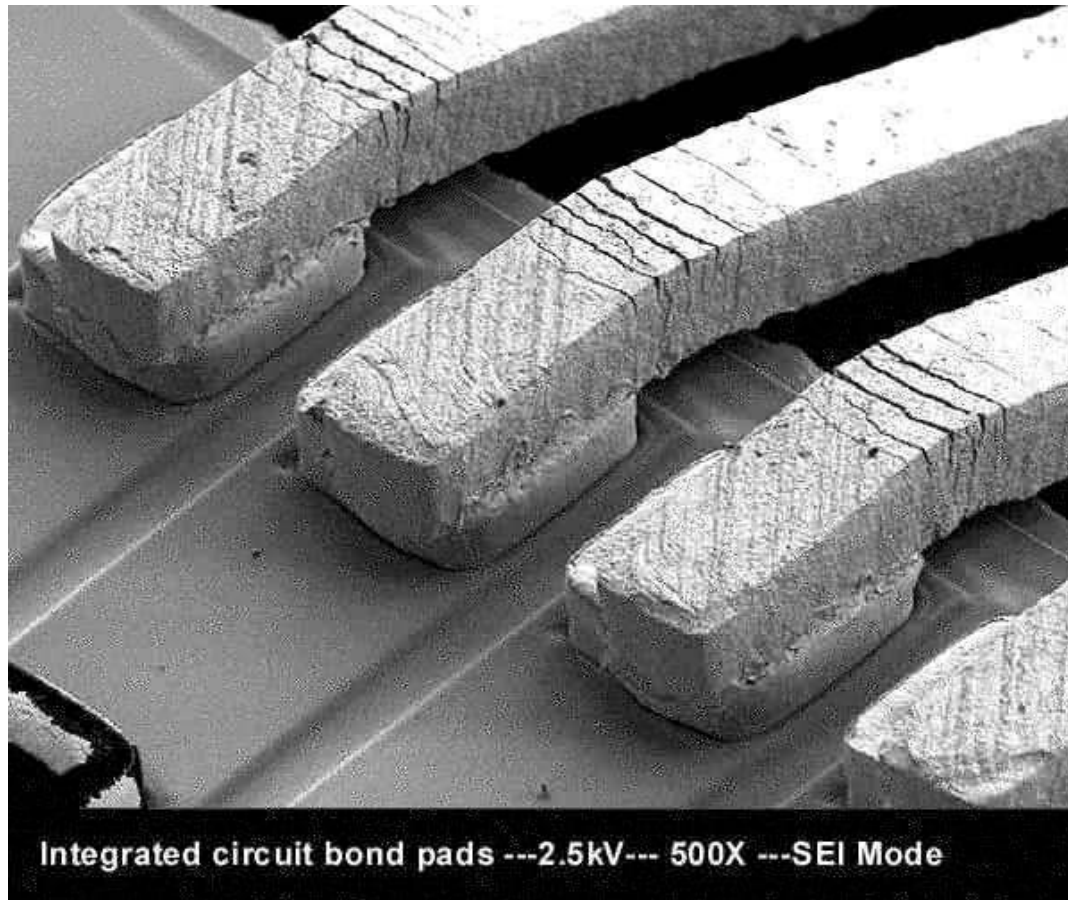
PRIPREMA UZORAKA ZA SEM

- Dovoljno mali da stanu u merni prostor
- Moraju biti čisti i odmašćeni
- Provodni materijali uzemljeni
- Nprovodni materijali se najčešće se nparavaju zlatom ili paladijumom da bi postali provodni
- Nagrizaju se za metalografske analize
- Presecaju se i poliraju

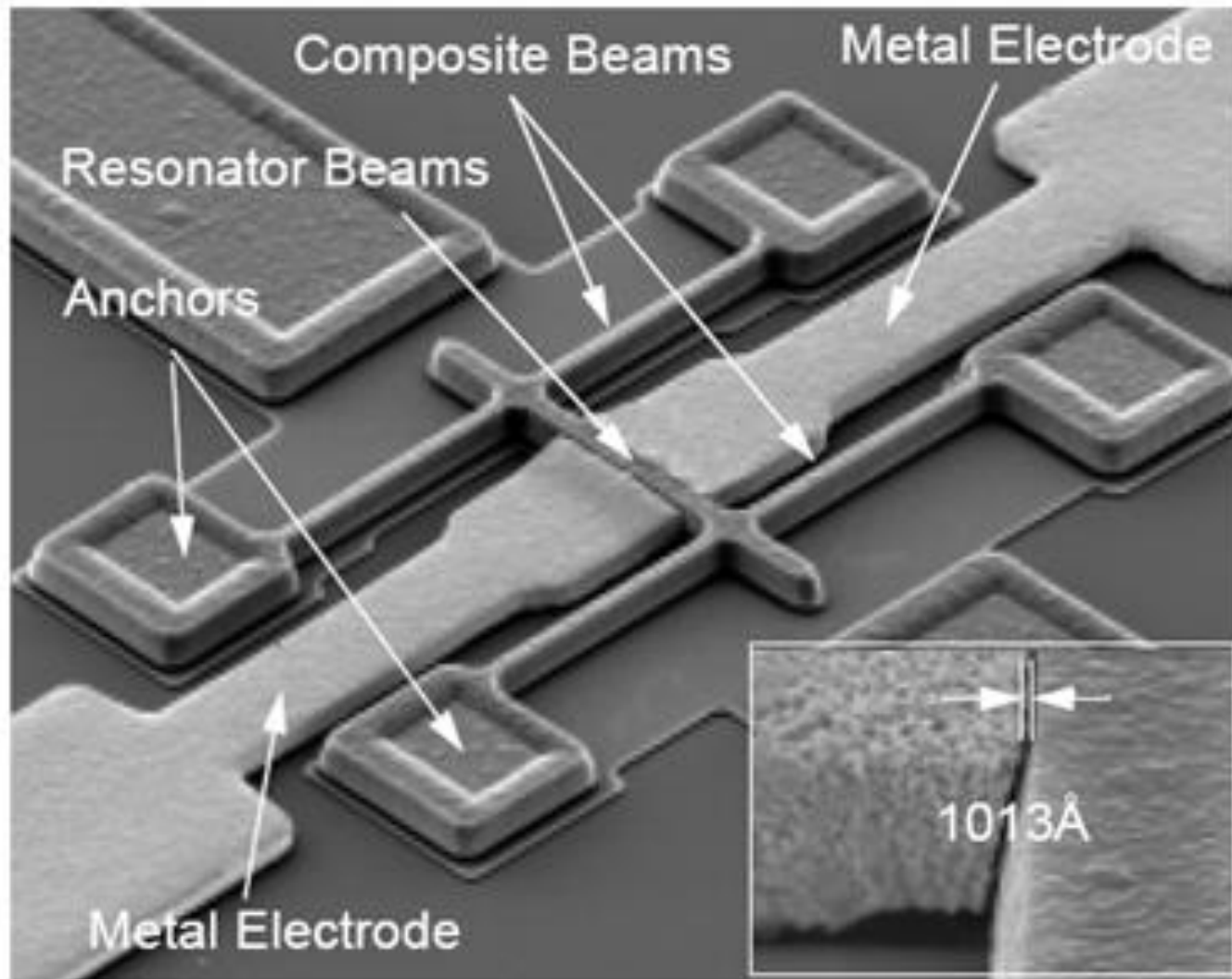


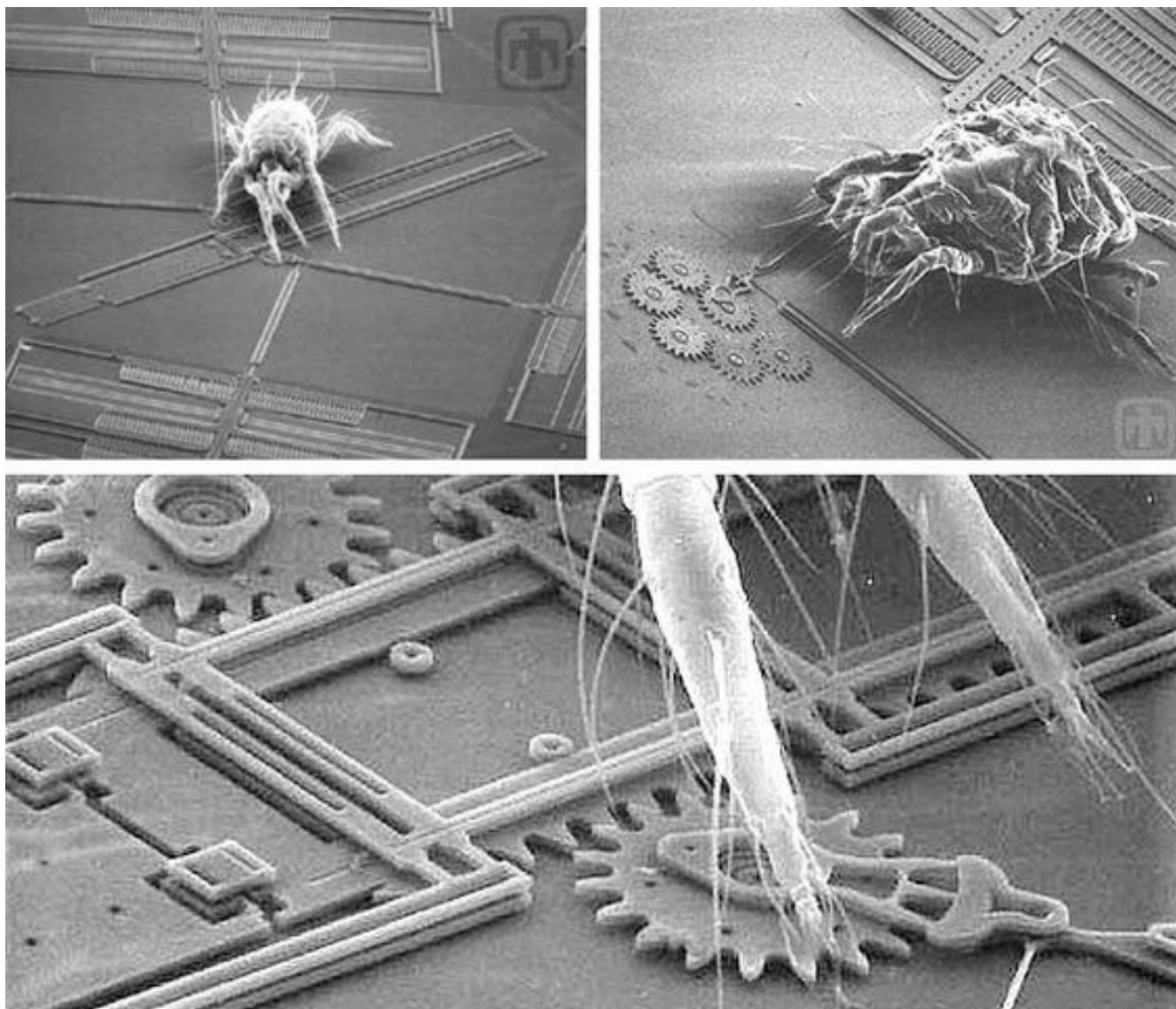
SEM PRIMENA:

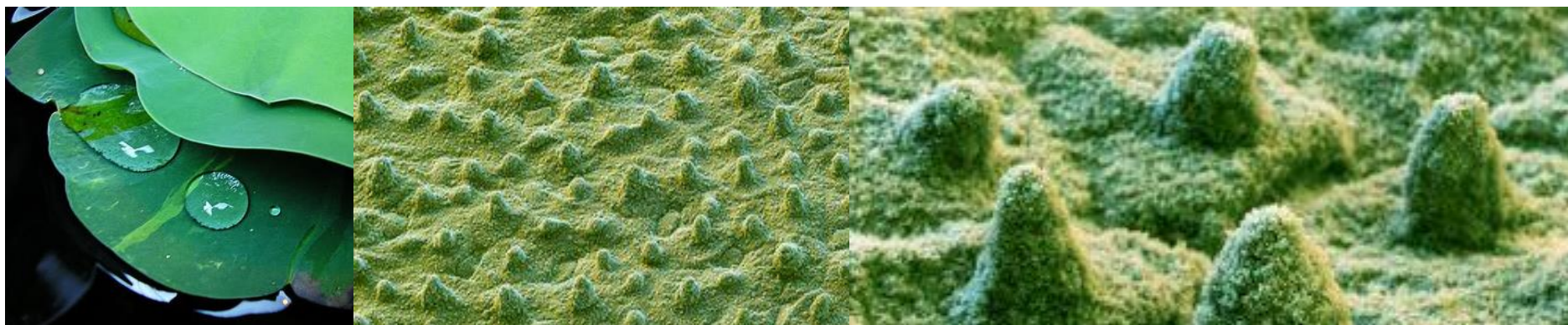
- Ispitivanje materijala, razvoj materijala, analizu otkaza i kontrolu kvaliteta
- Ispitivanje mikrostrukture metalnih materijala
- Utvrđivanje sastava, kristalne strukture i orijentacije, električnih i optičkih svojstava



SEM snimak rezonatora koji slobodno osciluje u poprečnom pravcu

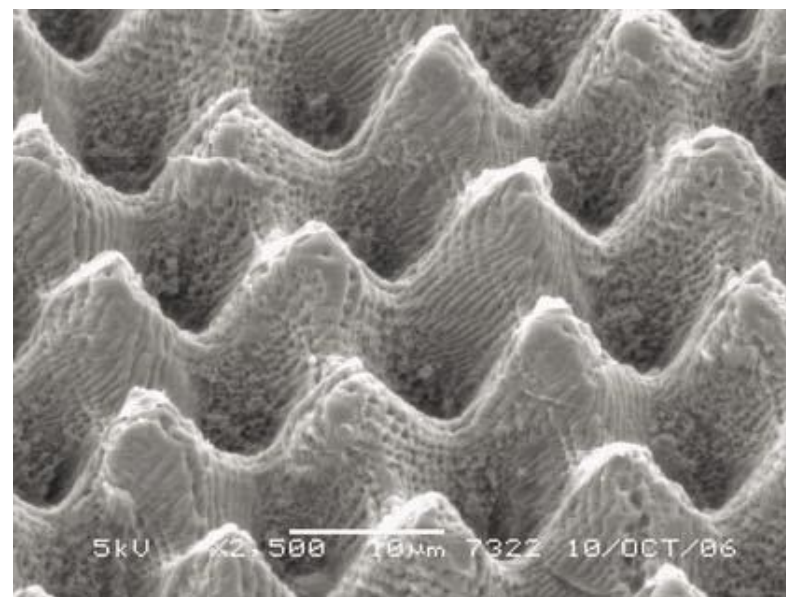
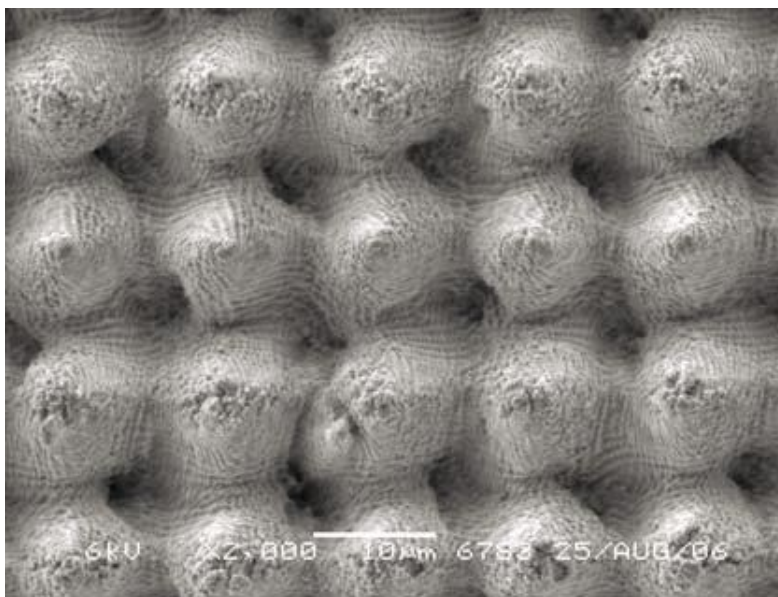






SEM snimak teksture lista lokvanja koja ima hidrofobni efekat

SEM snimak kalupa izrađenog od čelika sa mikro strukturama koje odgovaraju teksturi lista lokvanja



SEM snimak površine dela izrađenog od polimera presovanjem u kalupu

SKENIRAJUĆA MIKROSKOPIJA MERNIM PIPKOM - *SCANNING PROBE MICROSCOPY (SPM)*

- Koristi merni pipak za skeniranje površine uzorka (liniju po liniju) snimajući interakciju pipka i površine kao funkciju pozicije
- Familija mikroskopijskih tehnika zasnovanih na različitim interakcijama mernog pipka sa silama na površini ispitivanog materijala
 - Skenirajuća tunelska mikroskopija *Scanning Tunneling Microscopy (STM)* je bazirana na kvantnom tunelovanju elektrona između vrha pipka i provodne površine uzorka
 - Skenirajuća atomska mikroskopija *Atomic Force Microscopy (AFM)* radi na principu osetljivosti na mehaničke kontaktne sile, Van der Waals-ove sile, kapilarne sile, hemijske veze, elektrostatičke sile, magnetne sile, itd.
 - Mikroskopija magnetnim silama (MFM) prati promene u magnetnoj interakciji između magnetnog pipka i površine magnetnog materijala
 - Skenirajuća termalna mikroskopija (S_{Th}M) koristi pipak funkcionalizovan u minijturni termopar čijim se skeniranjem dobija visokorezoluciona temperaturska raspodela na ispitivanoj površini materijala
 - Skenirajuća kapacitivna mikroskopija (SCM) meri promenu električne kapacitivnosti između pipka i površine
 - Mikroskopija Kelvinovom probom (KPM) koristi prostorno lokalizovana merenja hemijskog potencijala

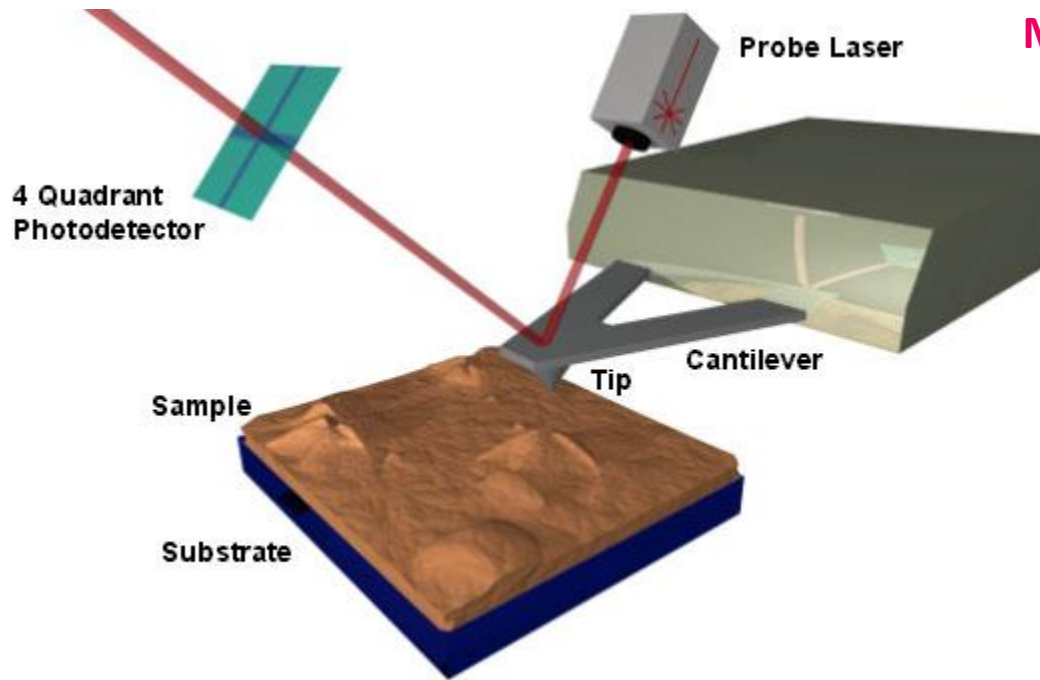
Skenirajući mikroskop sa mernim pipkom - *Scanning probe microscope (SPM)*

JEOL JSPM -5200



NT-MDT NEXT





MIKROSKOPIJA ATOMSKIM SILAMA AFM

- Razvijena je za prevazilaženje ograničenja STM, odnosno za istraživanje neprovodnih materijala
- Pipak se nalazi na konzoli čija se ugibanja mere optički primenom lasera ili električno primenom piezoelektričnog davača
- Meri sve sile koje se javljaju na između atoma na površini uzorka i atoma na vrhu mernog pipka

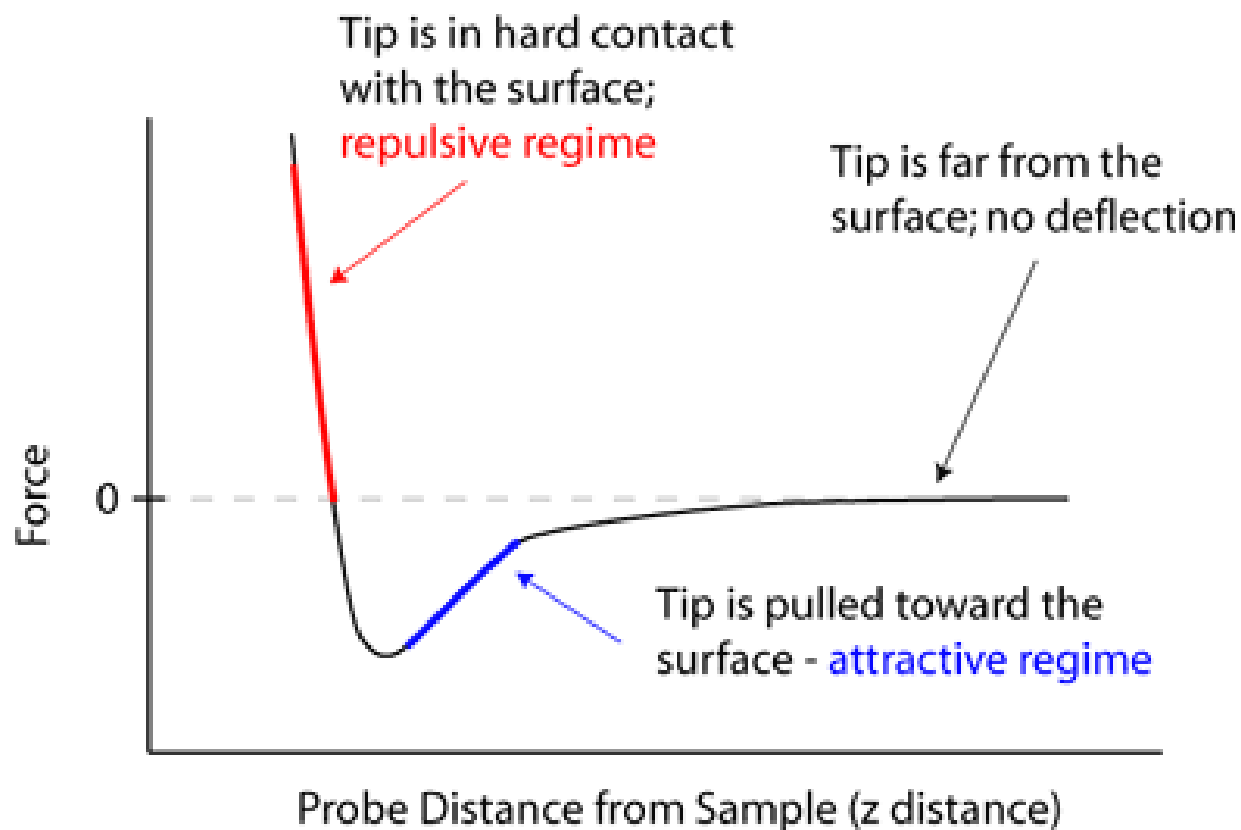
•Najjača energija veze između atoma je $16 \times 10^{-19} \text{J}$, a najslabija $16 \times 10^{-16} \text{J}$ (10eV -10 meV)
 $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

•Kada se merni pipak približi površini na rastojanju od 0.16 \AA , tada među atomske sile variraju između 10^{-8}N (jonske) i 10^{-11}N (van der Waals-ove)

•Rezolucija je $\sim 0.1 \text{nm}$ lateralno (XY ravan) i $\sim 0.007 \text{nm}$ vertikalno (Z osa) uz ekstremno čistu površinu i oštar vrh

•Može da radi u ambijentalnom okruženju – vazduh, fluid

Na malim rastojanjima između vrha pipka i površine materijala preovladavaju kratkodometne sile (van der Valsove), dok na većim rastojanjima dominantan uticaj imaju dugodometne sile (elektrostatičke)

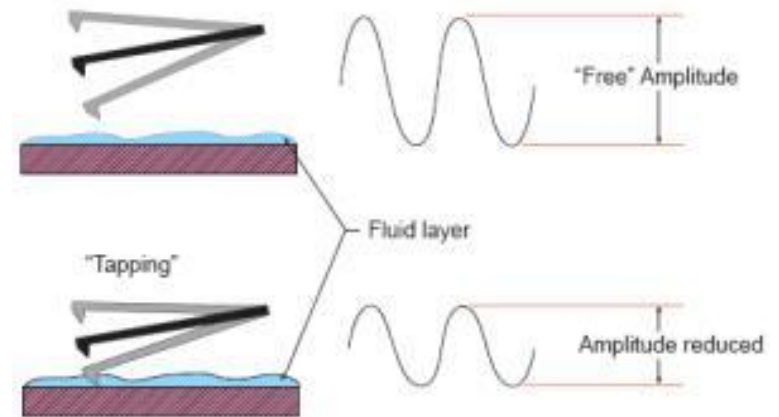
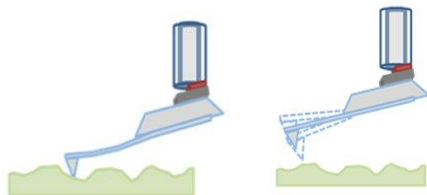
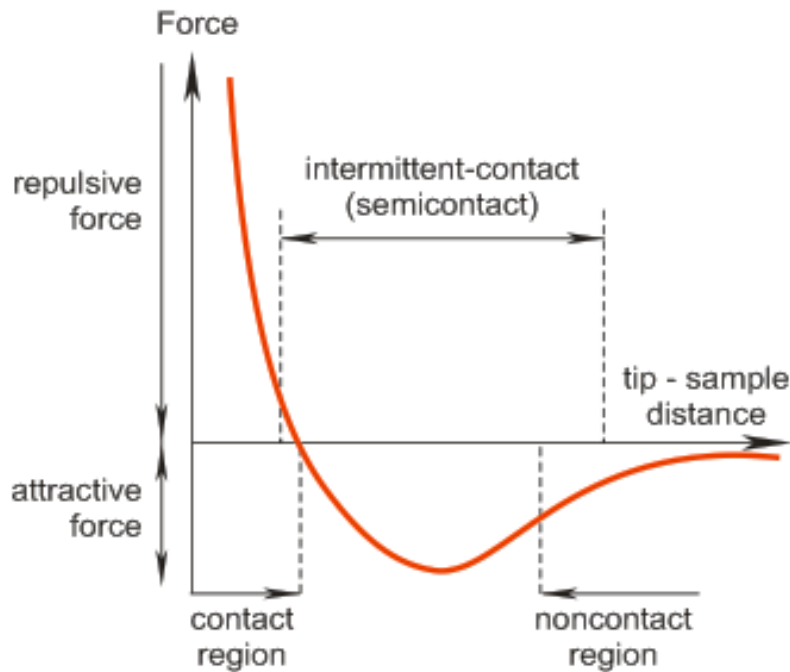


KONTAKTNI AFM MOD

- može da ošteti površinu uzorka
- neophodan je kod triboloških merenja LFM, FFM

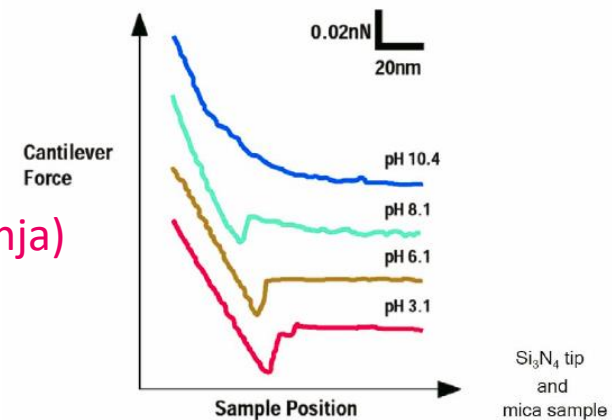
TAPING (POLUKONTAKTNI) AFM MOD

- koristi se osetljive površine i meke materijale

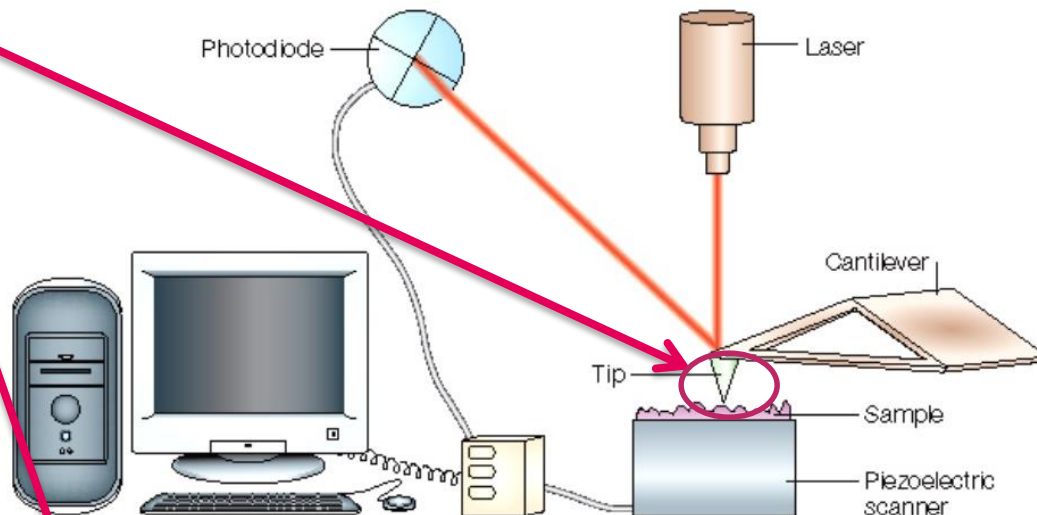


Mogu se snimati:

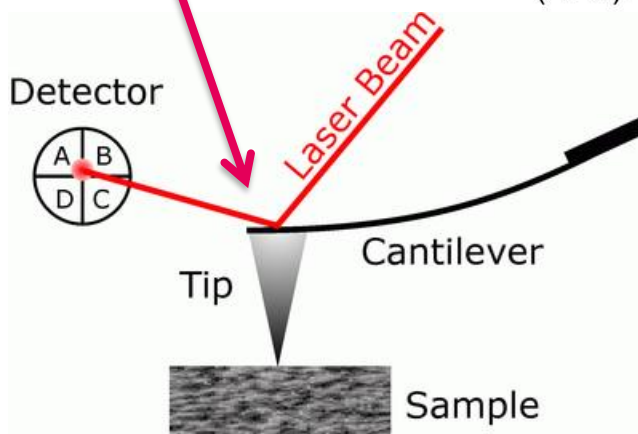
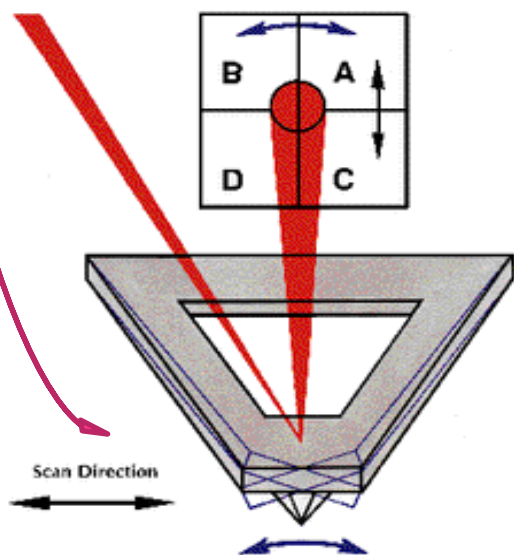
- Određivanjem zavisnosti sila-rastojanje - lokalizovana merenja elastičnosti i viskoznosti površine materijala
- Topografski snimci
- Fazni snimci
- Magnetna polja
- Sile (lateralne i trenja)



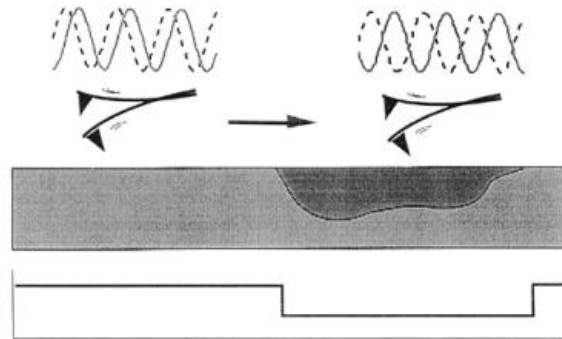
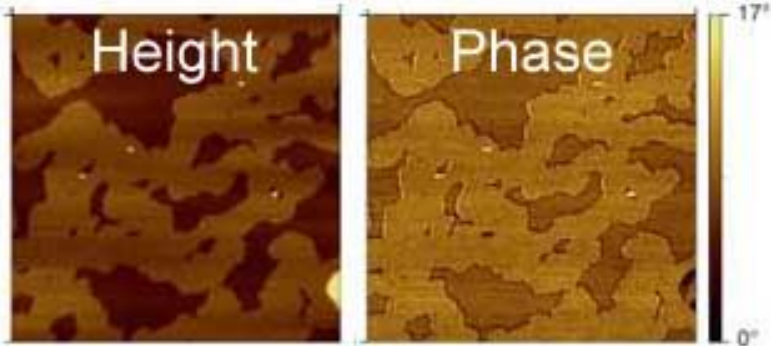
Kod AFM merni pipak se nalazi na kraju lagane, veoma elastične i visokoreflektujuće konzole (kantilever) pod uglom od 90° , tako da prati promenu nagiba ili uvijanja kantilevera koji se menja pri skeniranju površine materijala pipkom, čime se menja i ugao reflektovanog laserskog snopa usmerenog na kantilever, ...



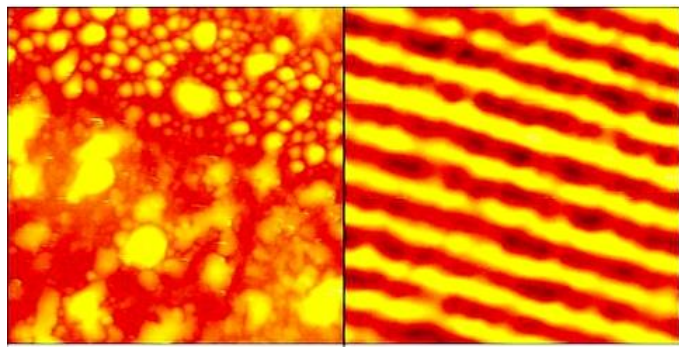
Schematic representation of the components of an atomic force microscope (AFM).



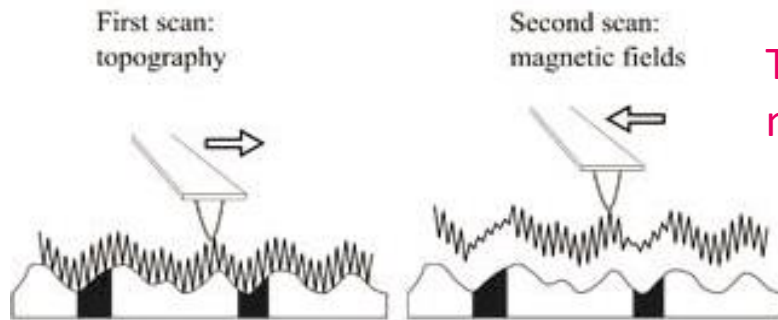
...što se softverski pretvara u 3D sliku ispitivanog uzorka



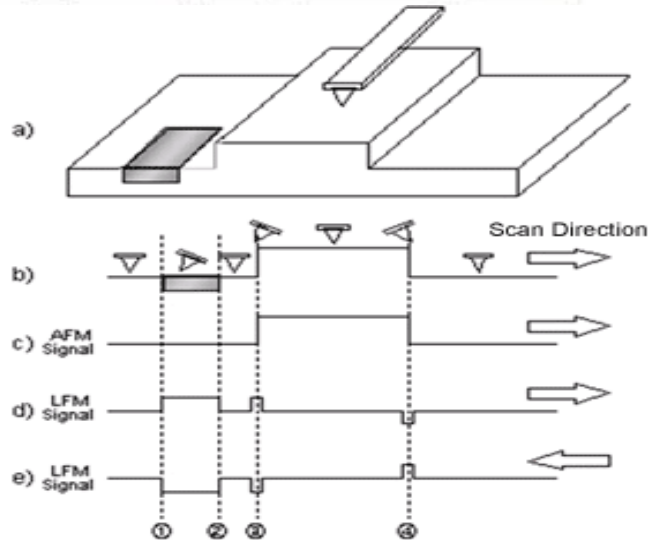
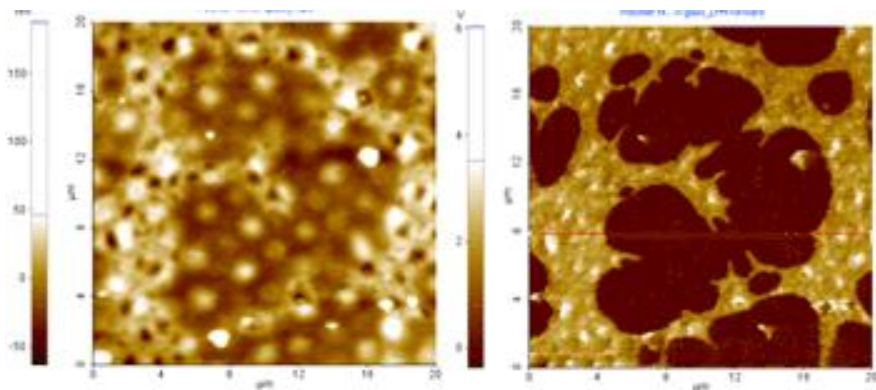
Topografski i fazni snimak



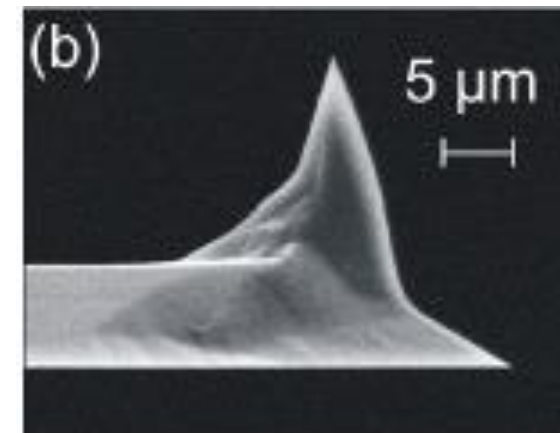
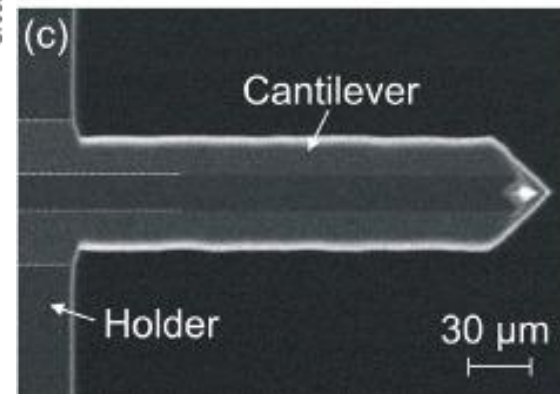
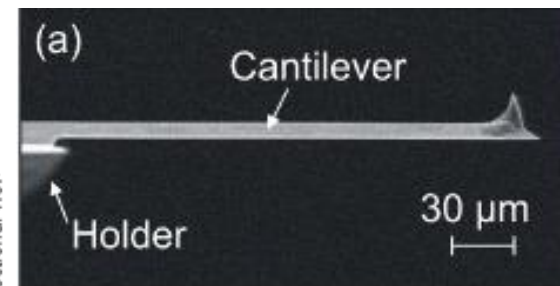
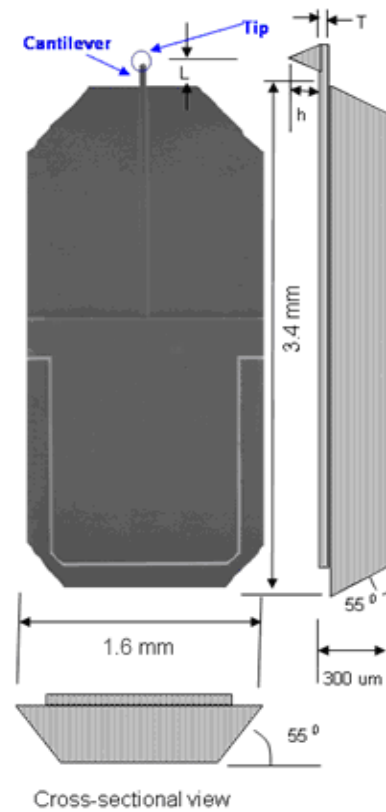
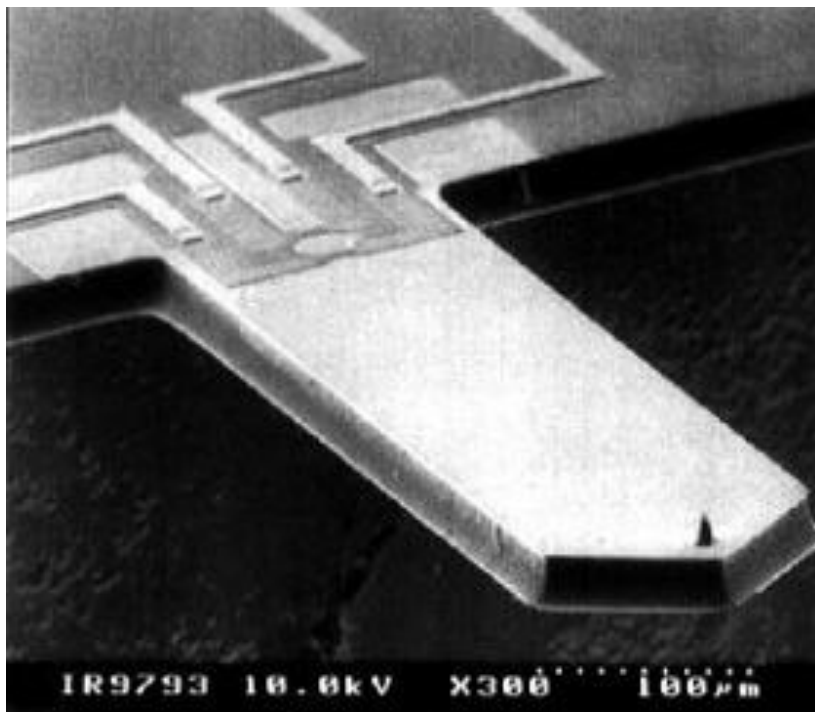
data type: Height, Z range: 150.0 nm, 5.00 um
 data type: Frequency, Z range: 40.00 Hz, 5.00 um



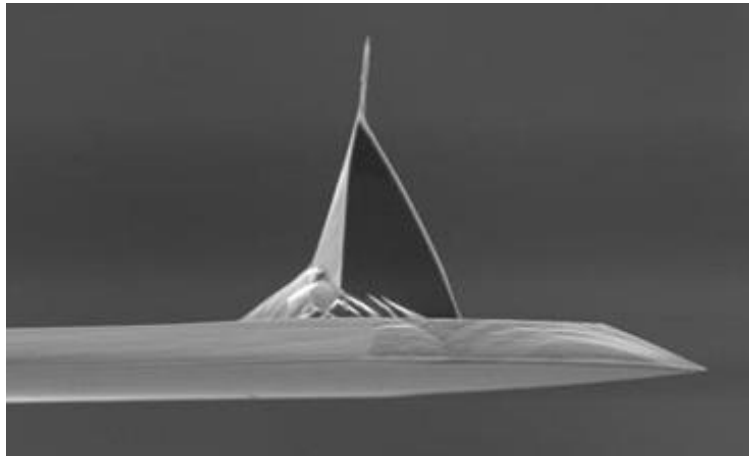
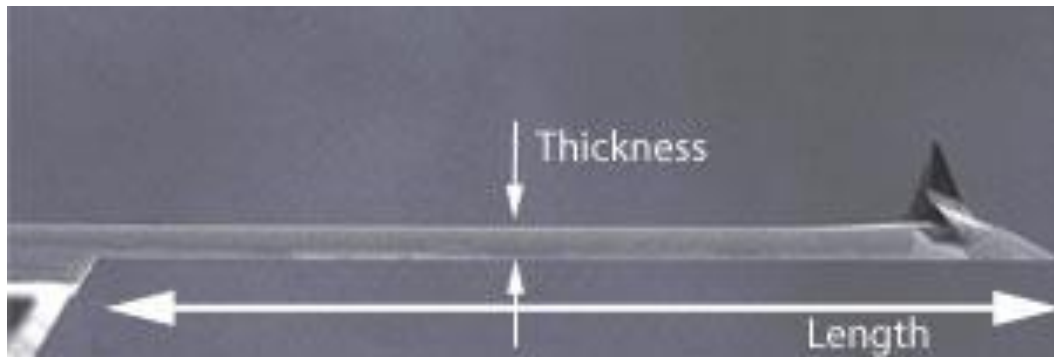
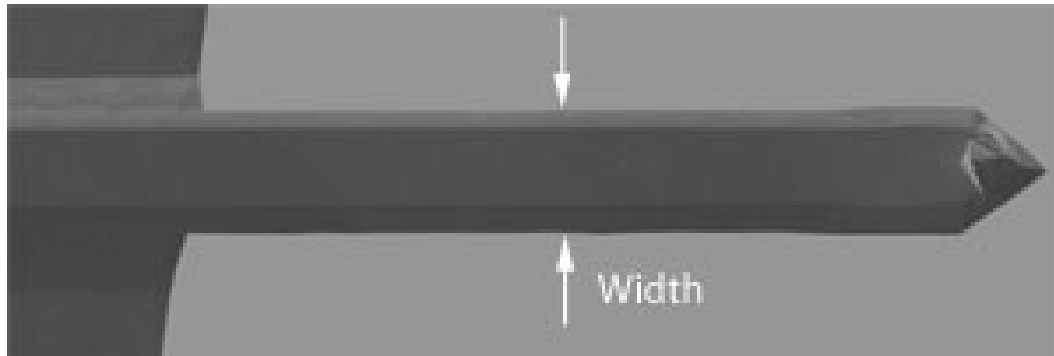
Topografski i magnetni snimak



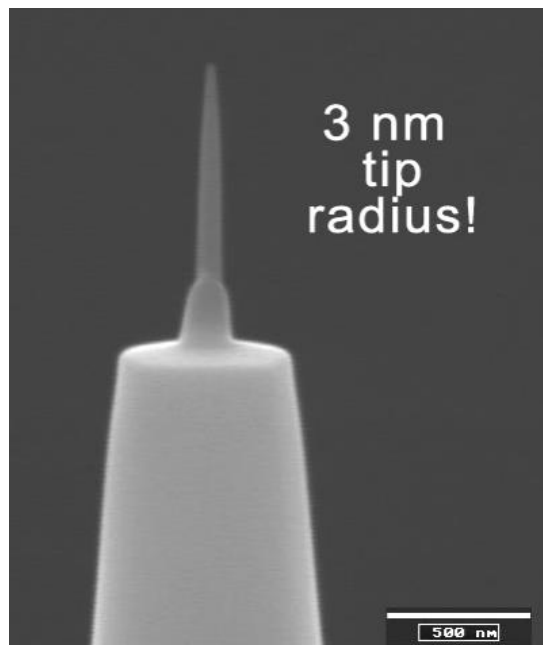
Topografski i lateralni snimak



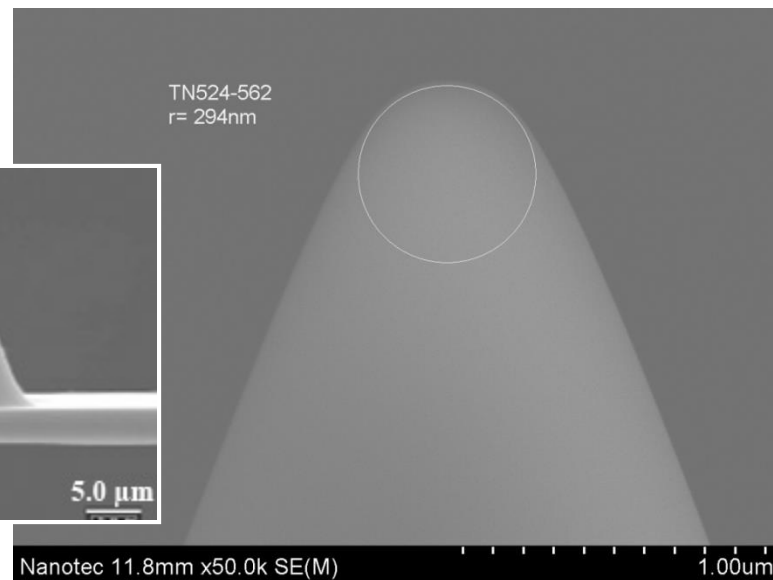
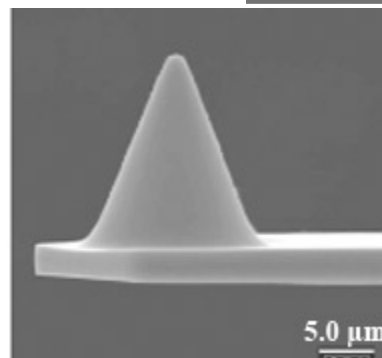
IZGLED KANTILEVERA I MERNOG PIPKA



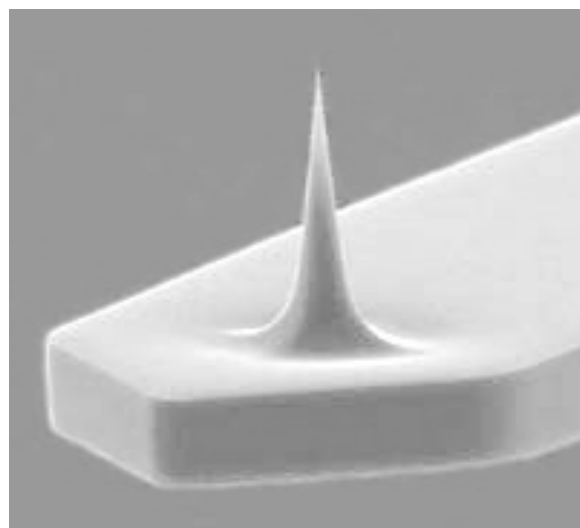
Moderni AFM uređaji koriste kantilivere izuzetno male mase čime je omogućena detekcija sila koje deluju na pipak reda veličine $\sim 10^{-18}$ N



Veliki radijus mernog pipka

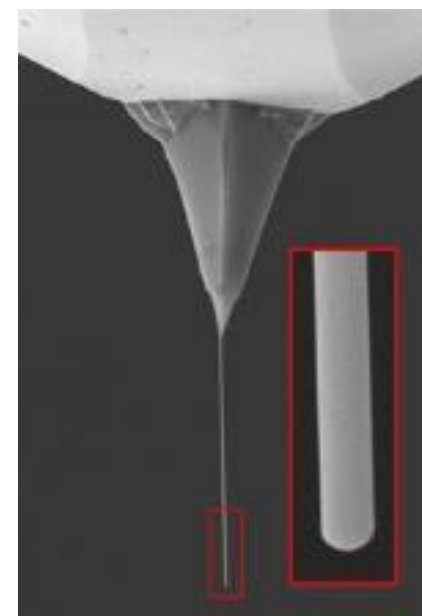


Ugljeni konus
Taping Mod Pipak 3nm radijus

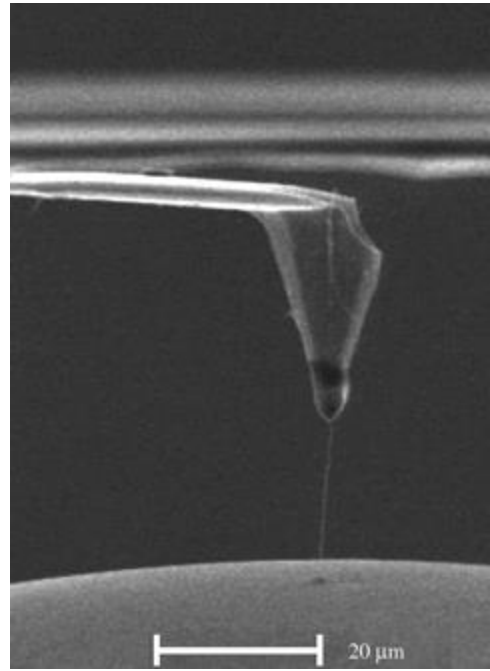
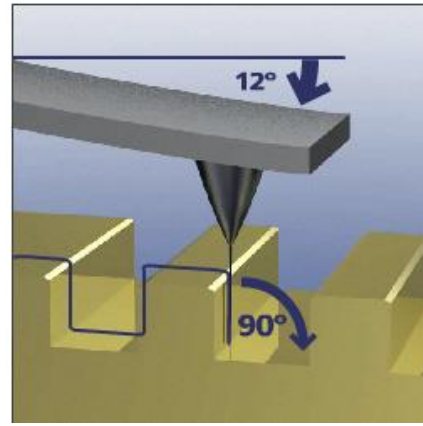
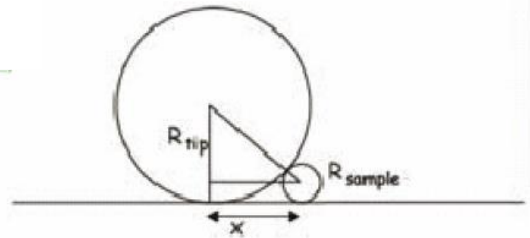
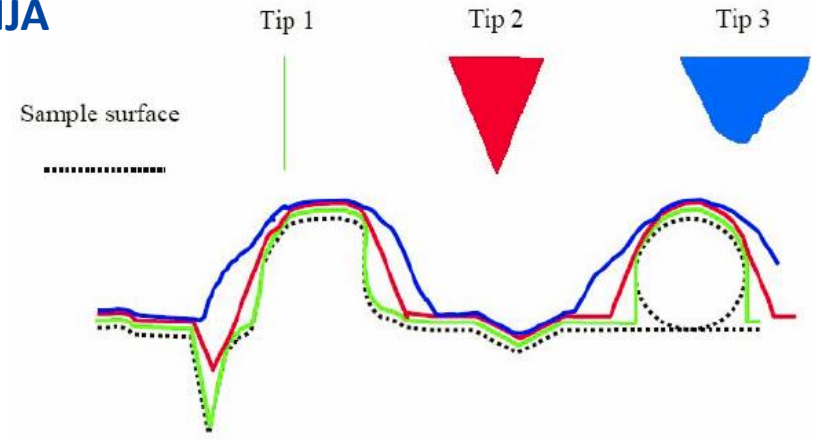
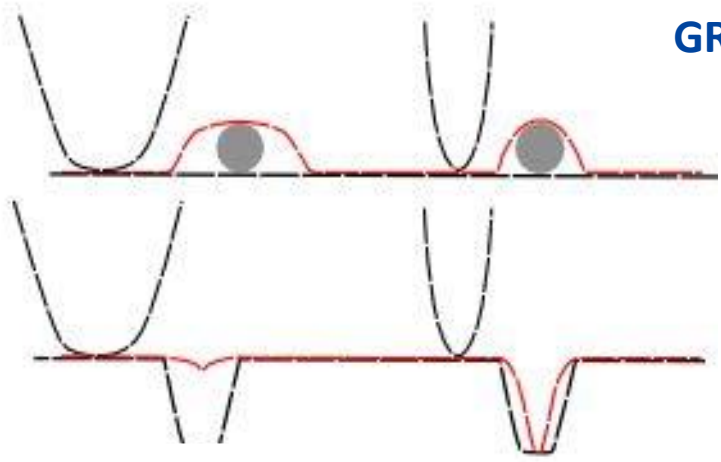


HR-MFM Pipak za visoku rezoluciju

Kontakt mod AFM pipak sa Ag_2Ga cilindričnom iglom dužine: 1 do 100 μm



GREŠKE MERENJA



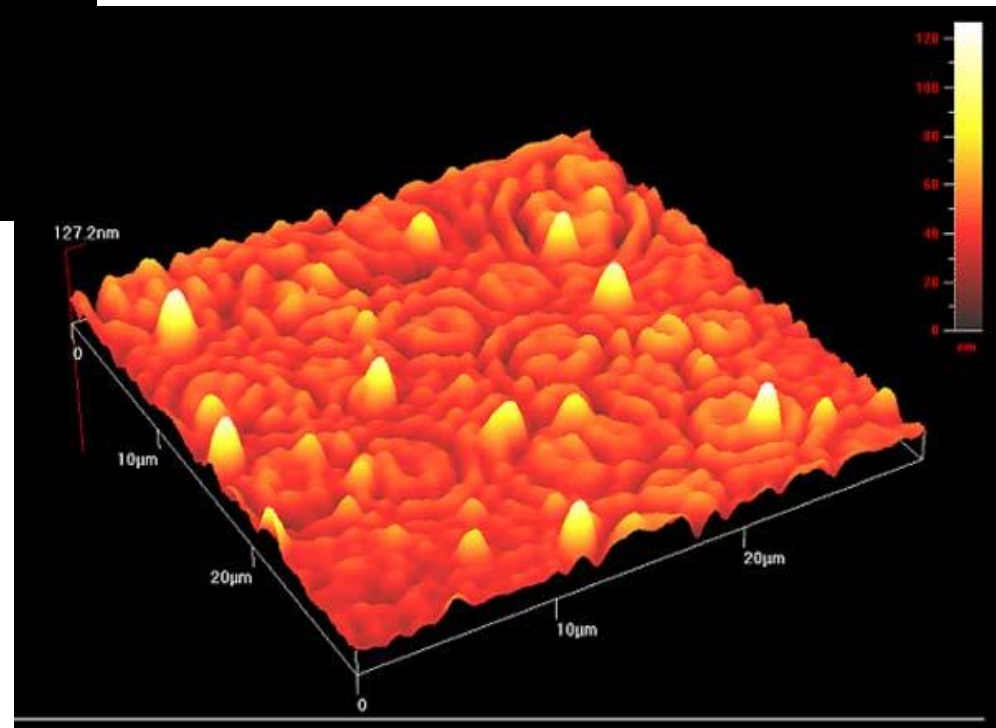
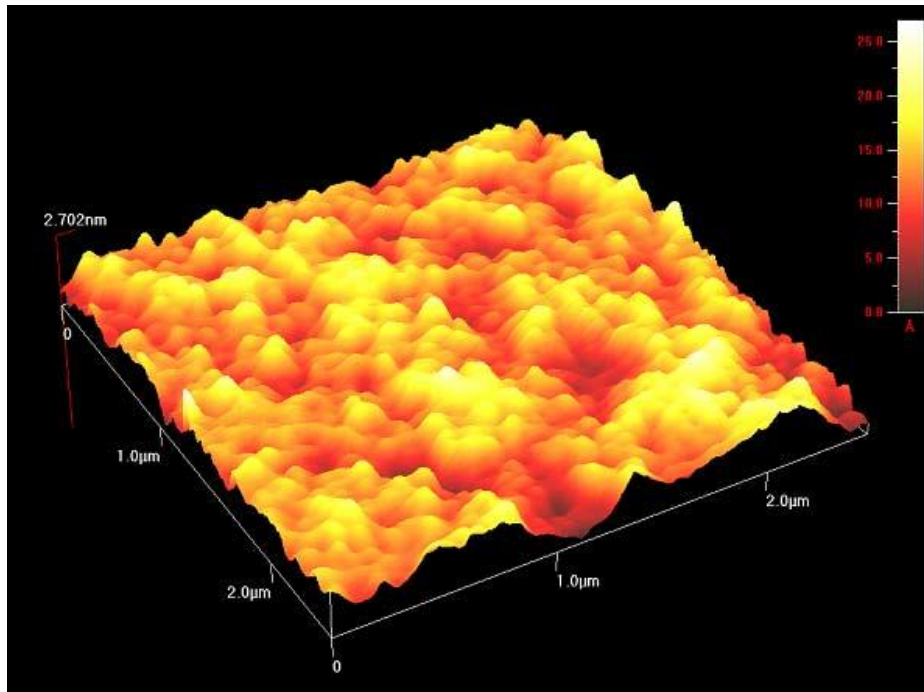
$$x^2 = (R_{tip} + R_{sample})^2 - (R_{tip} - R_{sample})^2$$

$$x^2 = R_{tip}^2 + 2R_{tip}R_{sample} + R_{sample}^2 - R_{tip}^2 + 2R_{tip}R_{sample} - R_{sample}^2$$

$$x = 2\sqrt{R_{tip}R_{sample}}$$

$$w = 2x = 4\sqrt{R_{tip}R_{sample}}$$

Greška merenja pri određivanju širine primitiva prečnika R_{sample} merenog pipkom sa vrhom zaobljenja R_{tip}



LITERATURA

“Uvod u nanotehnologije”, L. Matija, D. Kojić, A. Vasić,
B.Bojović, T. Jovanović, Đ. Koruga

Winter school 2008

CIRP Vol.55/2, 2006.

CIRP Vol.56/1, 2007.

Wear, Vol. 262, 2007

<http://www.parkAFM.com>

<http://www.jeol.com>

<http://www.ntmdt.com/>

<http://www.alicon.com/>

http://www.mdtmag.com/product-releases/2015/04/3d-fiber-probe?et_cid=4550939&et_rid=350879841&type=cta