

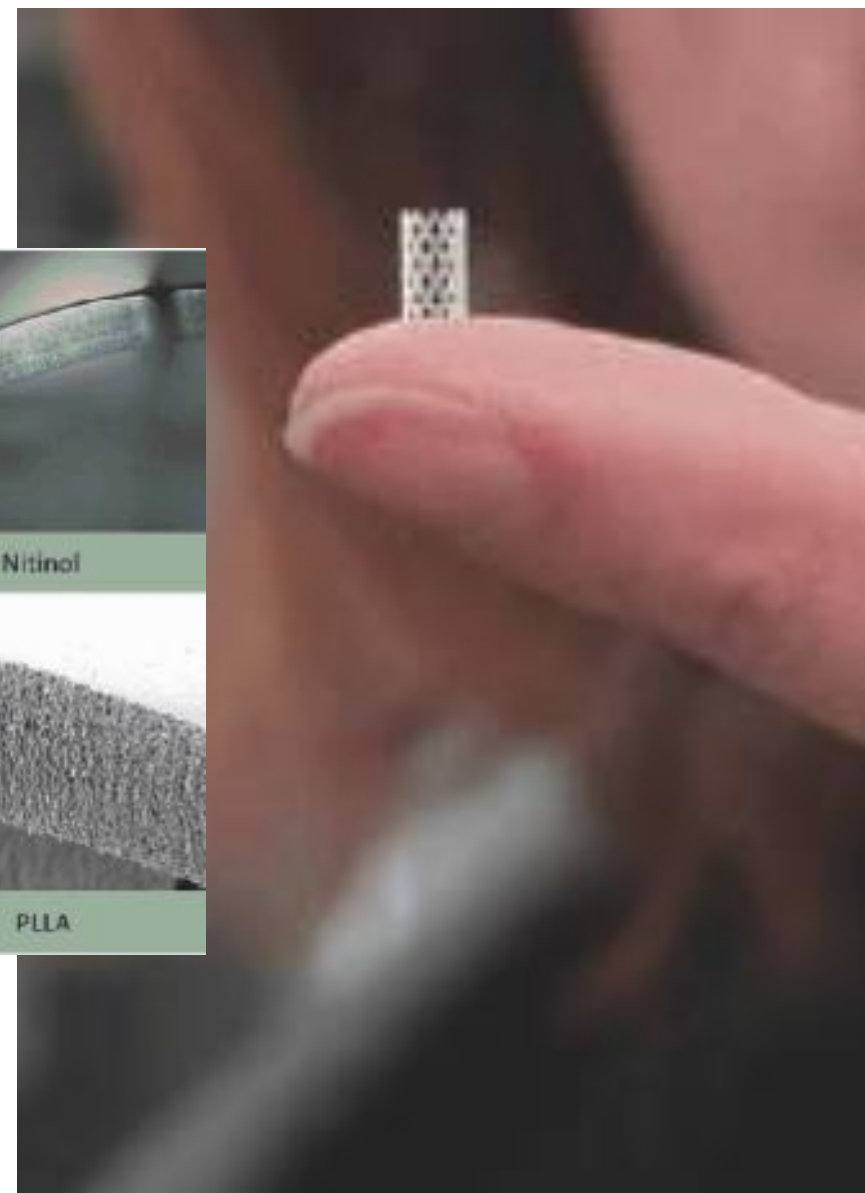
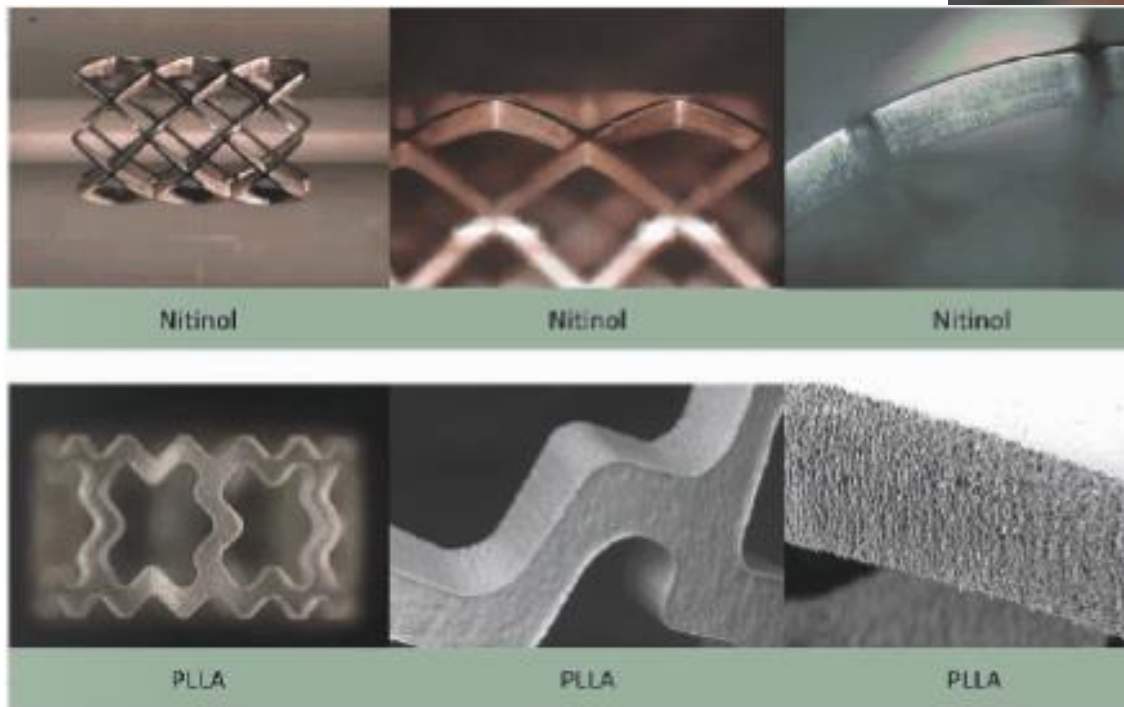
**LASER** je akronim od *Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*. Do emisionog zračenja dolazi pri povratku pobuđenih atoma na osnovni nivo. Mogu biti:

- gasni He-Ne (IR, crveni); Ar (zelena); CO<sub>2</sub> (IR),
- čvrsti (rubin, neodijum, hrom, Nd:YAG...) i
- excimer (plemeniti gasovi)

**LASERSKI METOD OBRADJE** je nekontaktni metod i koristi se za uklanjanje malih zapremina materijala usled čega je pogodan za mikro skalu. Prilikom interakcije laserskog zraka sa materijalom dolazi do kidanja hemijskih veza i materijal se pretvara u plazmu (jonizovani gas), koja se prikuplja i eliminiše.

**PROCESI OBRADJE PRIMENOM LASERA SU POGODNI**

- Za obradu površina, otvora i primitiva reda veličine 10-100um velike tačnosti sa minimalnim zagrevanjem materijala i sa malom zonom uticaja toplote (ZUT) ili bez nje
- Za teškoobradive i neprovodne materijale
- Jer nema trošenja alata



## CW LASERI

- Laseri sa kontinualnim zrakom (*continuous wave-CW*) emituju stabilan tok fotona fokusiran na obradak, koji stalno donose energiju molekulima dok se ne istope, ispare ili sagore.
- Ovaj proces se zove termalna ablacija.
- Materijal van zone obrade –fokusa, apsorbuje toplotu i nastaju oštećenja

c.w. laser

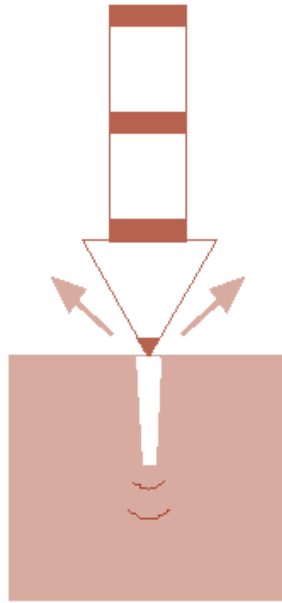


ns laser



Shock waves

ps/fs laser

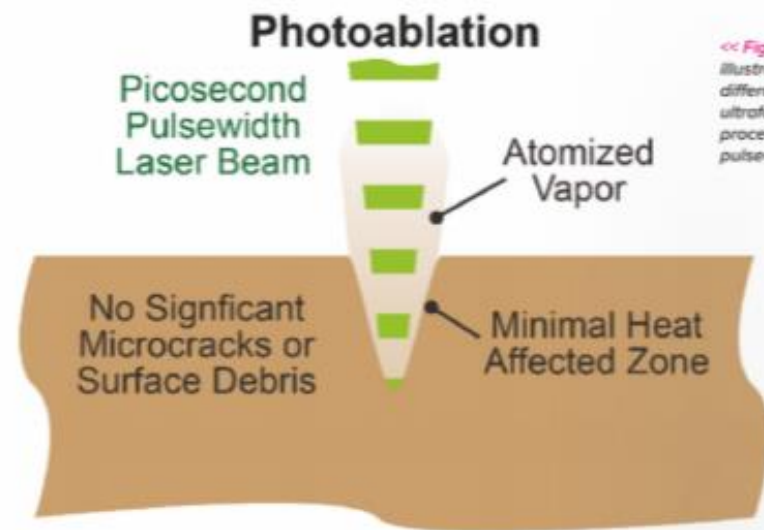
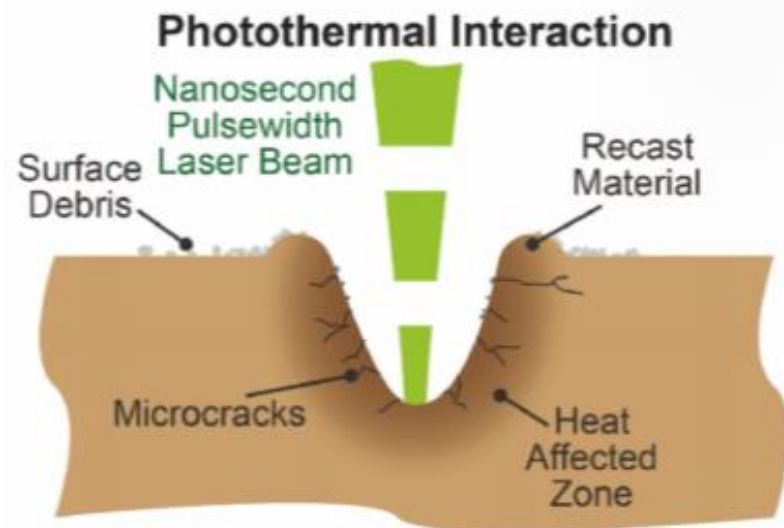


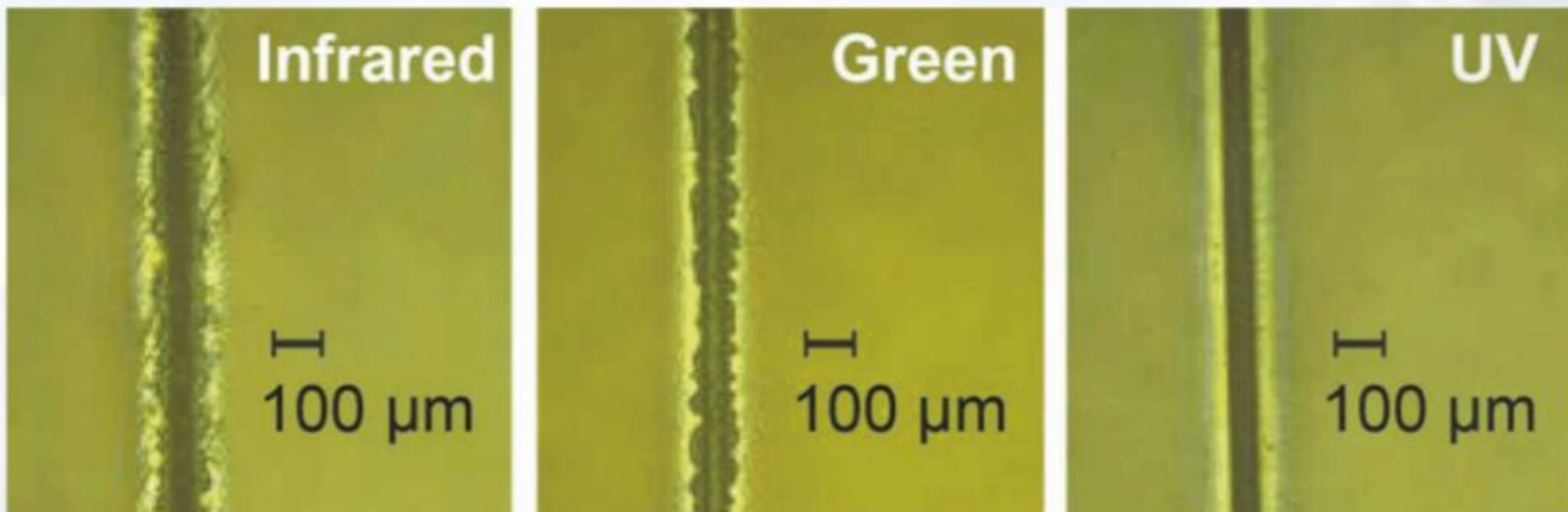
## NEDOSTACI:

- Zaostali naponi i toplota u zoni obrade
- Naprsline
- Očvršćavanje otopljenog materijala
- Pukotine ispod površine
- Neophodna naknadna obrada
- Veličina primitiva je veličine do desetine um
- Obrada samo metalnih materijala

Nekonvencionalna upotreba lasera podrazumeva vidljivo i NIR (blisko infra crveno) područje talasnih dužina. Takvi laseri uklanjaju materijal putem fototermalne interakcije, jer je laserski zrak intenzivan toplotni izvor prostorno ograničen. Materijal pogođen laserskim zrakom se brzo zagreje i ispari. Velika količina materijala se brzo uklanja na ovaj način, pogotovo kad je učestalost nekoliko kHz. Ovi laseri ostavljaju iza sebe očvrslu materijal, mikronaprsline i veliku ZUT. Ovi se nedostaci donekle mogu prevazići ultraljubičastim zrakom.

Kod kratkopulsnih lasera (Ultra Short Puls -USP) se interakcija sa materijalom zove fotoablacija. Kratkotrajno, a intenzivno dejstvo laserskog zraka (reda veličine megaW) izaziva apsorpciju fotona koji uklanjaju elektrone iz materije, razarajući molekulske i atomske veze, te pogođeni materijal nestaje ablacijom, a toplota se ne prenosi na okolni materijal.





Najvažnija dva parametra procesa su :

- **Talasna dužina (*wavelength*)** je direktno proporcionalna minimalnoj veličini fokusne tačke. Stoga je opšte uzevši, lakše proizvesti manje primitive (ispod 50µm) sa zelenim (obično 532nm) ili ultraljubičastim (obično 355nm, 266nm) laserima, nego laserima sa većim talasnim dužinama. Takođe, laserski zrak kraće talasne dužine se više apsorbuje od strane materijala, te ne prodire duboko, lakše se kontroliše i stvara manju ZUT
- **Trajanje pulsa (*pulse length*)** od ms do ps omogućava veoma kontrolisanu primenu laserske energije, što umanjuje ZUT.

Primena **PULSNIH LASERA** je omogućila obradu materijala koji imaju nisku optičku apsorpciju ili su providni (staklo, safir, polimeri).

- Zbog visoke cene i niske stope uklanjanja materijala nisu široko rasprostranjeni u nekonvencionalnoj obradi , ali se primenjuju za preciznu mikro obradu.
- Koriste se za obradu primitiva koji imaju dimenzije i tolerancije reda veličine mikrometra
- Kratko pulsni laseri fokusiraju na deo površine obratka kratak puls visokog energetskog pika
- Materijal obratka koji se nalazi u fokusu laserskog zraka se brzo topi i isparava
- Rezultujući talas pritiska izbacuje istopljeni materijal u obliku kapljica velikom brzinom

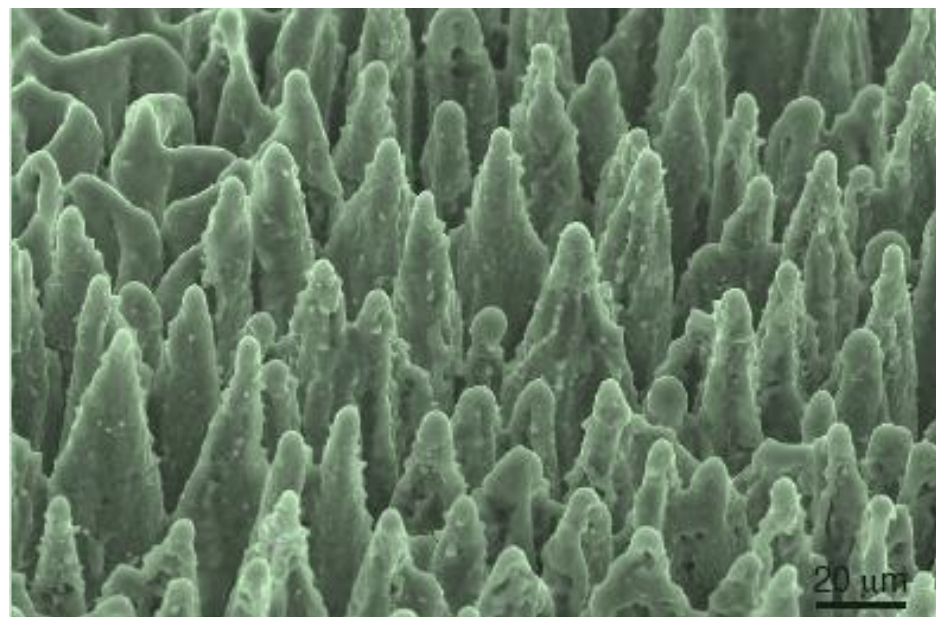
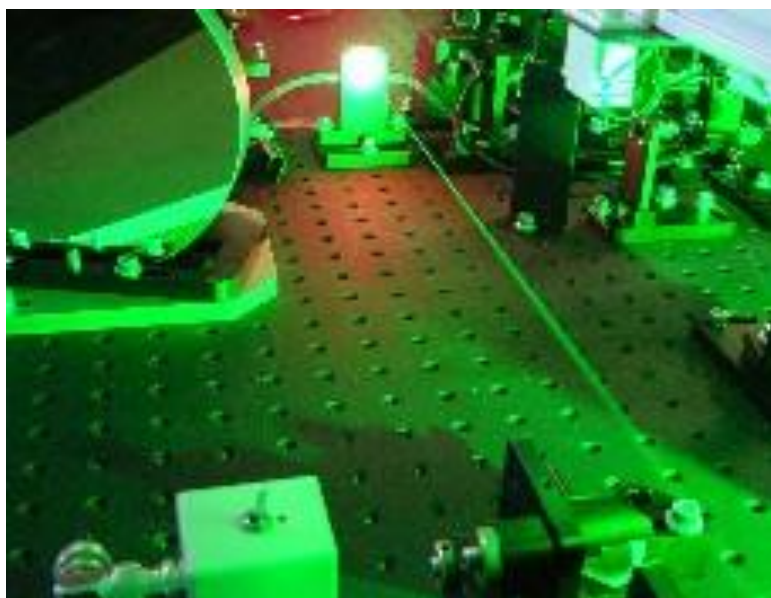
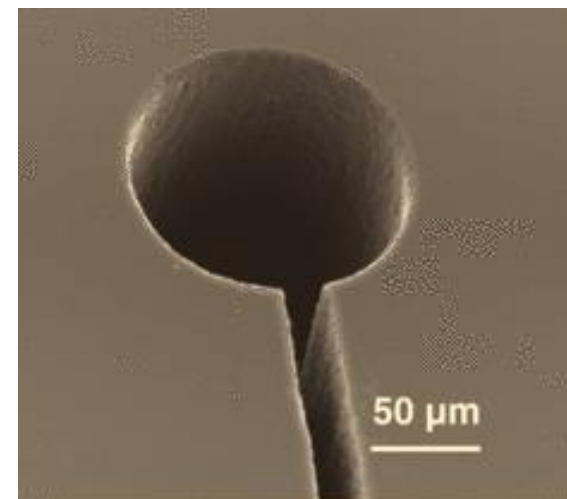
### POREĐENJE karakteristika pulsnih lasera za mikro obradu

	Nanosecond	Picosecond	Femtosecond
Pulse duration	10–100 ns	10 ps	30–500 fs
Pulse energy (mJ)	0.1–40	0.005–2.0	Up to 1
Repetition rate (kHz)	0–100	0–500	Up to 500
Average power (W)	<20	<8	Up to 3
Wavelength (nm)/Power	1064, 532, 355, 266	1064, 532, 355	1035, 775
Beam quality ( $M^2$ )	<1.3	<1.3	<1.3

**NANOSEKUND PULSNI LASERI** - trajanje pulsa u intervalu 10 do 100 ns i izlazna snaga do 20 W.

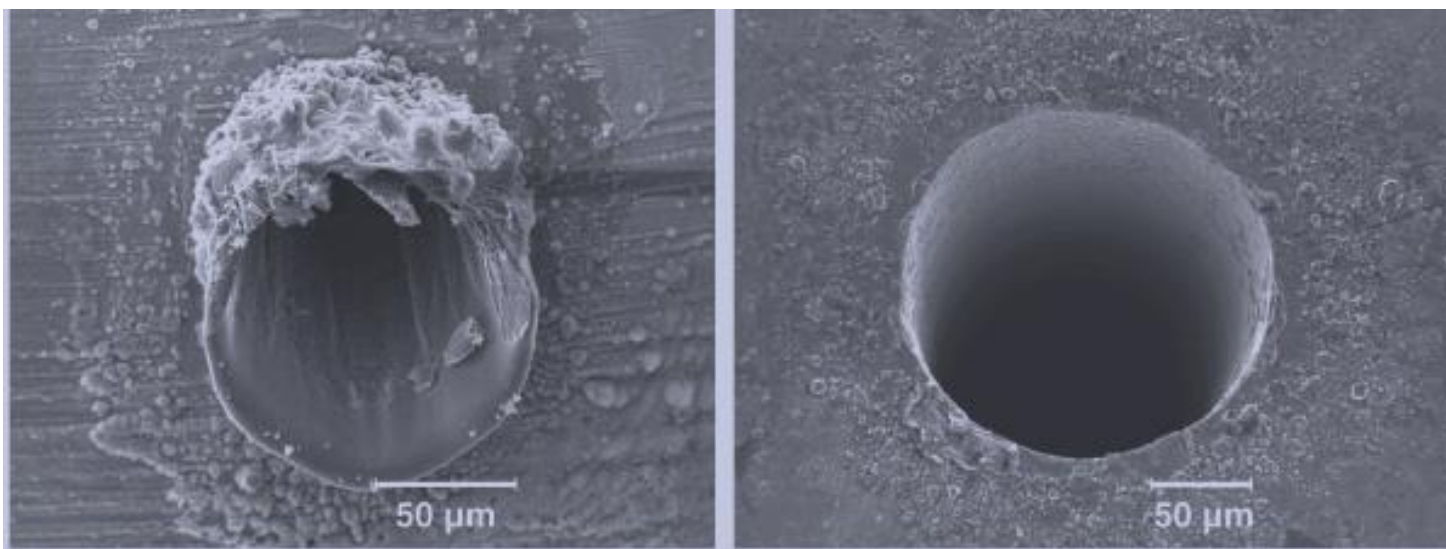
➤ Zbog pouzdanosti i isplativosti su mnogo prisutni u industrijskoj primeni. Primena kod industrijskih robota podrazumeva mikro bušenje, mikro rezanje i mikro glodanje metala i keramike

➤ Nanosekund pulsni UV laseri se koriste za obradu plastike i u mikroelektronici da bi se izbegla štetno dejstvo toplote. Dobri rezultati se dobijaju pri obradi teflona i stakla

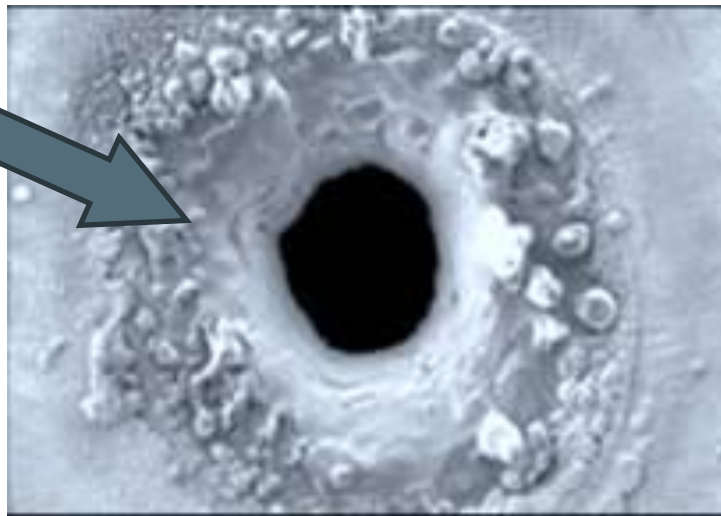


Trajanje pulsa i talasna dužina utiču na sledeće **faktore**:

- očvrstnut materijal (*recast*) - materijal koji je prešao granicu topljenja pod dejstvom laserskog zraka, ali je ponovo očvrstnuo u nastalom otvoru
- naprsline (*cracking*) - nastaju u očvrstlom sloju materijala
- zgura, troska, šljaka (*dross*) –sastoji se od kapljica izbačenih iz otvora a očvrstlih uz ivicu
- zona uticaja toplote (*heat-affected zone-HAZ*) -nalazi se u okolini otvora gde zaostala toplota izaziva temperaturske promene u strukturi materijala
- brzina uklanjanja materijala i vreme obrade.



- ❖ Obradom **MIKRO I NANO SEKUND LASERIMA** predaje se toplota obratku
- ❖ Dugi pulsevi omogućavaju predavanje veće količine toplote materijalu obratka, čime se stvaraju neželjeni temperaturni efekti
- ❖ Naknadna obrada je neophodna da bi se dobila čista i glatka površina
- ❖ Dolazi do očvršćavanja materijala koji je isprskan u blizini otvora, mikro pukotina i rečkavih ivica



- ❖ Kratki pulsevi sem što smanjuju uticaj toplote, imaju visok energetska pik, koji čini da materijal više isparava a manje topi
- ❖ Manja količina otopljenog materijala znači i manje očvrstlog izbačenog materijala, manje naprslina i otpadnog materijala, očuvan sloj ispod površinskog jer ne dolazi do rekristalizacije usled dejstva toplote
- ❖ Mikro obradom **KRATKO PULSNIM LASERIMA** dobijaju se čisti primitivi
- ❖ Nema potrebe za dodatnom obradom, što proces čini jeftinijim i bržim

## FEMTOSEKUND PULSNI LASERI

Su za tri reda veličine kraćih pulseva u odnosu vreme absorpcije toplote ( $10^{-15}$ s nasuprot  $10^{-12}$ s). Na taj način se obradom femtosekund pulsni laserom izbegavaju termalna oštećenja. Ovi laseri čistom ablacijom uklanjaju materijal koji bi se inače topio. Izuzetno visoki pikovi snage čine da nelinearni efekti izazovu jaku absorpciju čak i kod transparentnih materijala.

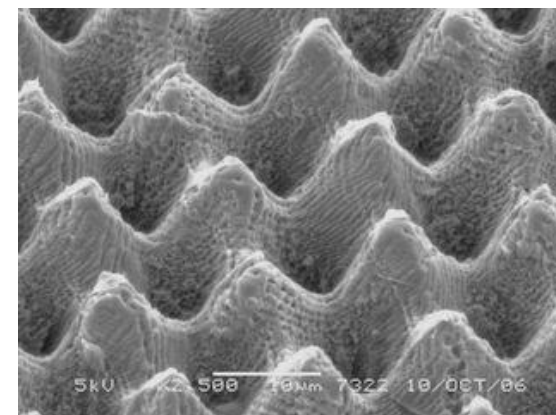
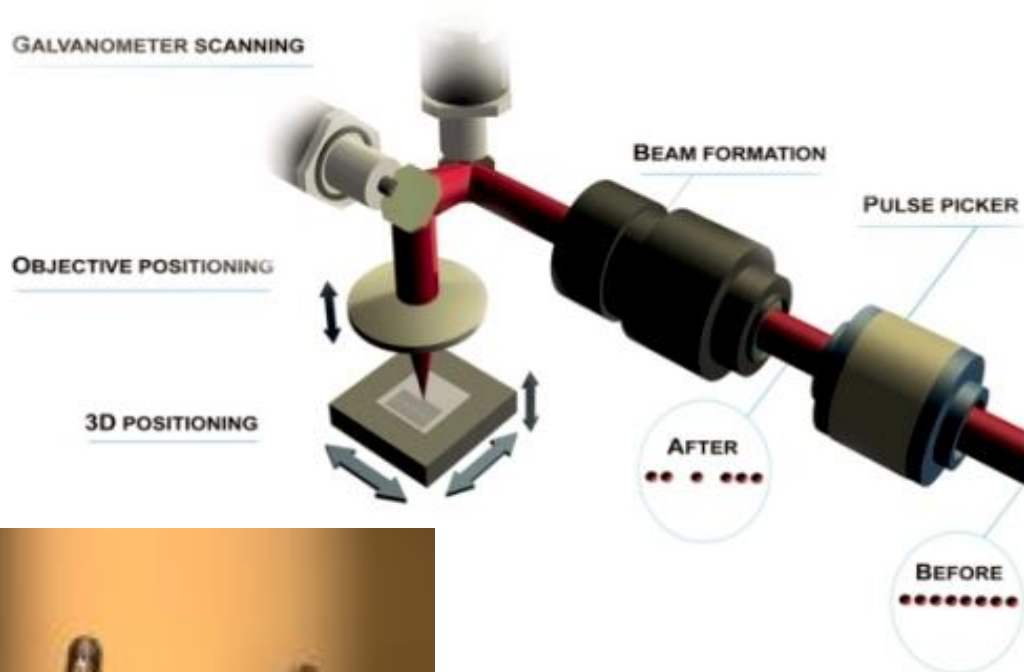
- Nema očvrslog materijala, zone uticaja toplote, zaostalih napona, naprslina,...
- Mogu na lakozapaljivim materijalima vršiti obradu, kao što je to glava šibice.
- Mogu obrađivati primitive u submikronskom području.

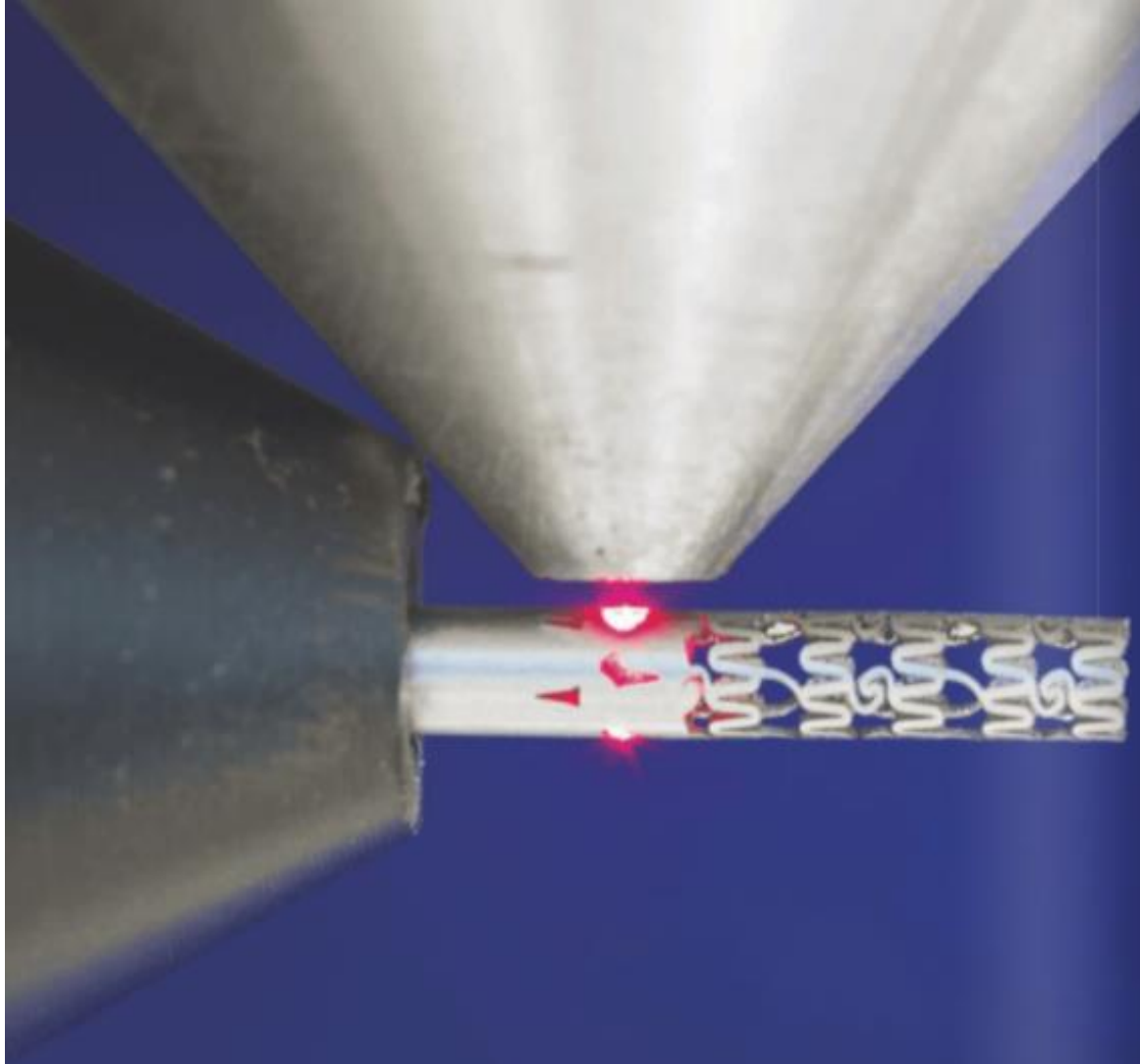


## NEDOSTACI:

- Današnji femtosekund pulsni laseri daju visoko pulsnu energiju u poređenju sa malom učestanošću pulseva.
- Visoki energetska pik stvara plazmu u fokusu. Znatna temperaturna oštećenja mogu nastati zbog dugotrajnosti vatrene lopte plazme. Smanjenjem pulsne energije se smanjuju ili eliminišu ti efekti, ali se time smanjuje proizvodnost.
- Femtosekund pulsni laseri su složeni i skupi sistemi, teški za održavanje, što ih čini nepogodnim za industrijsku primenu. Samo u slučajevima kada su oni jedino rešenje uz sva svoja ograničenja, koriste se u industriji.
- Uglavnom se koriste u laboratorijskim uslovima.

## Femtopulsni laserski sistem za mikroobradu

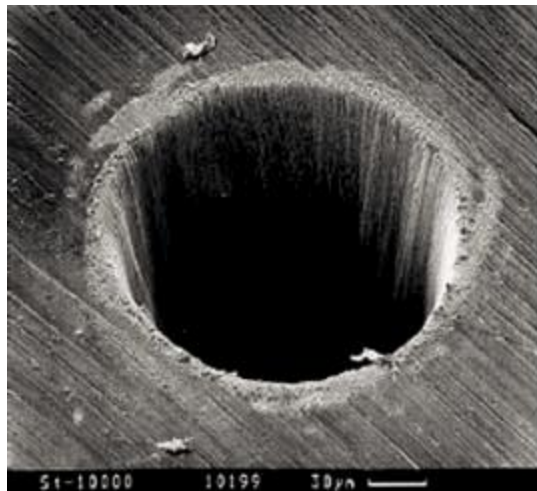




Mikro obrada uključuje USP lasere za obradu rupa, usecanje žljebova, izrada tekstura i složenih oblika.

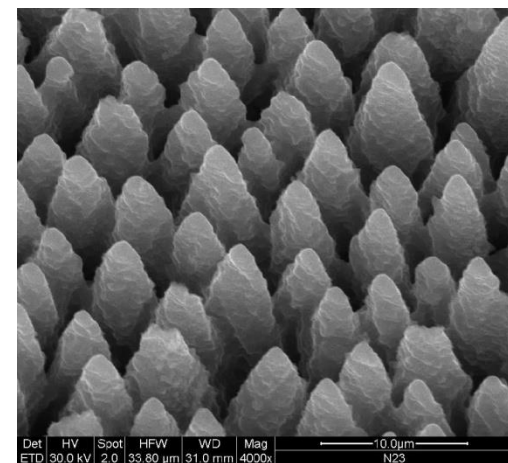
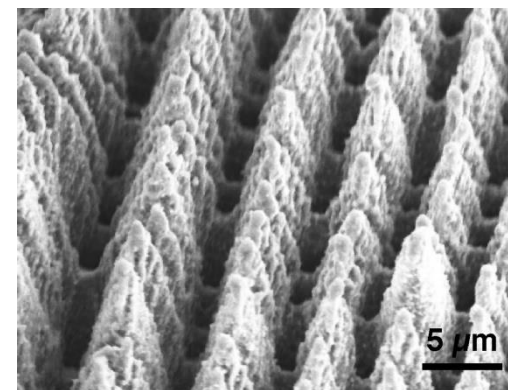
Energija koju nosi puls je manja (60W) u poređenju sa nanosekund laserima, a učestalost je od 1 do 50MHz.

Čista površina, bez prskotina, pukotina i pregrevanja je razlog za upotrebu femtosekund lasera u preciznoj mikro obradi.



Femtopulsnim i nanopulsnim laserom dobijen otvor

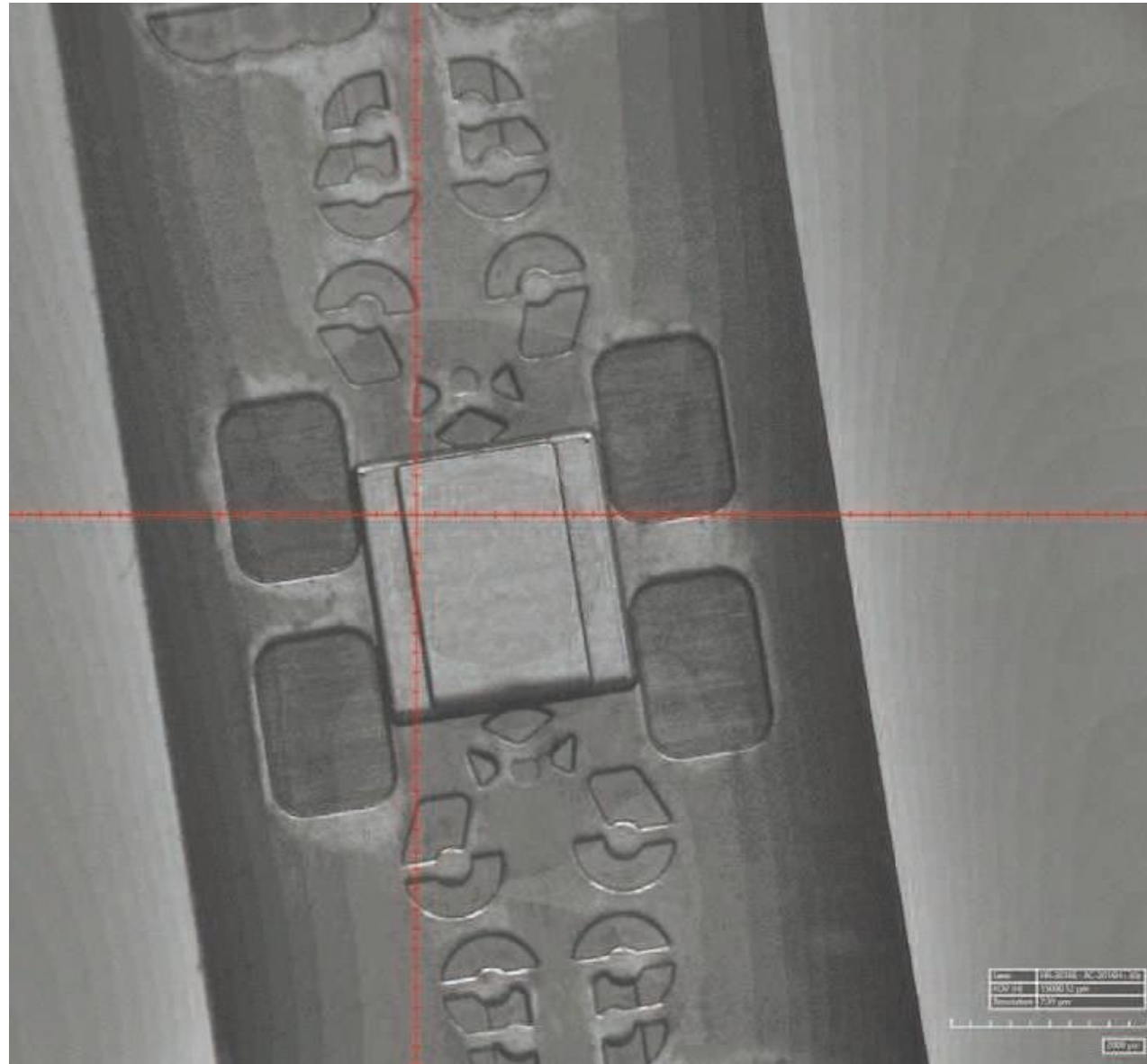
- Femtopulsnim laserom dobijeni konusni šiljci Si kristala pod određenim uslovima mogu biti 10-100 μm visoki sa vrhovima od nekoliko stotina nanometra.
- Nanopulsnim laserom dobijeni konusni šiljci Si kristala pod određenim uslovima mogu biti veći od 100 μm sa vrhovima od nekoliko mikrometra. Najbolji odnos dobijen do sada je 10 nm vrh na 100 μm visokom stubiću.
- Šiljci se mogu praviti od Ge i Ti.

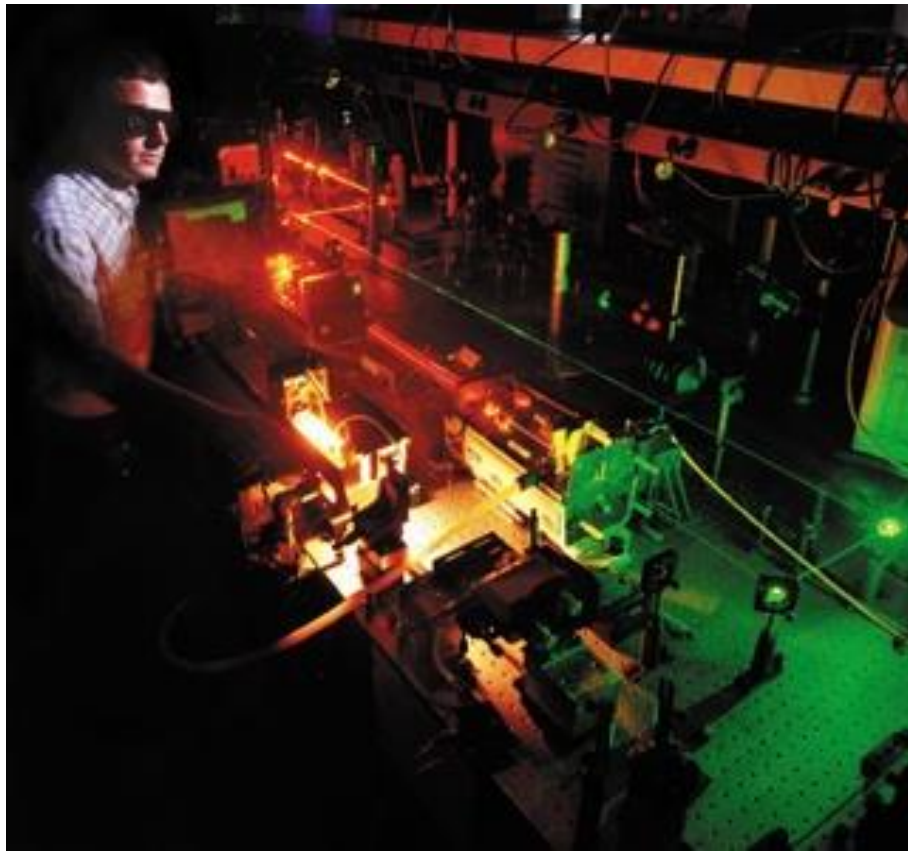


## Svojstva laserske ablacije

- Kvalitet obrađene površine
  - Ra 0.15  $\mu\text{m}$  (femtosek)
  - Ra 0.4  $\mu\text{m}$  (nanosek)
- Max dubina
  - 5 mm (femtosek)
  - 3 mm (nanosek)
- Max debljina sečenja
  - 0.5 mm (femtosek)
- Poziciona tačnost: 2  $\mu\text{m}$

Keramički insert  
SiC silicijum karbid

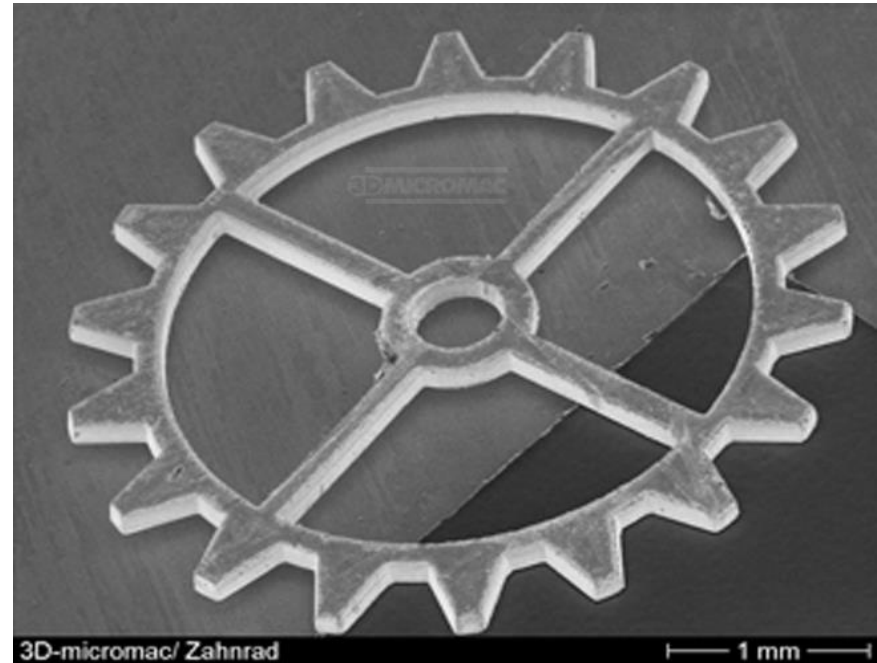


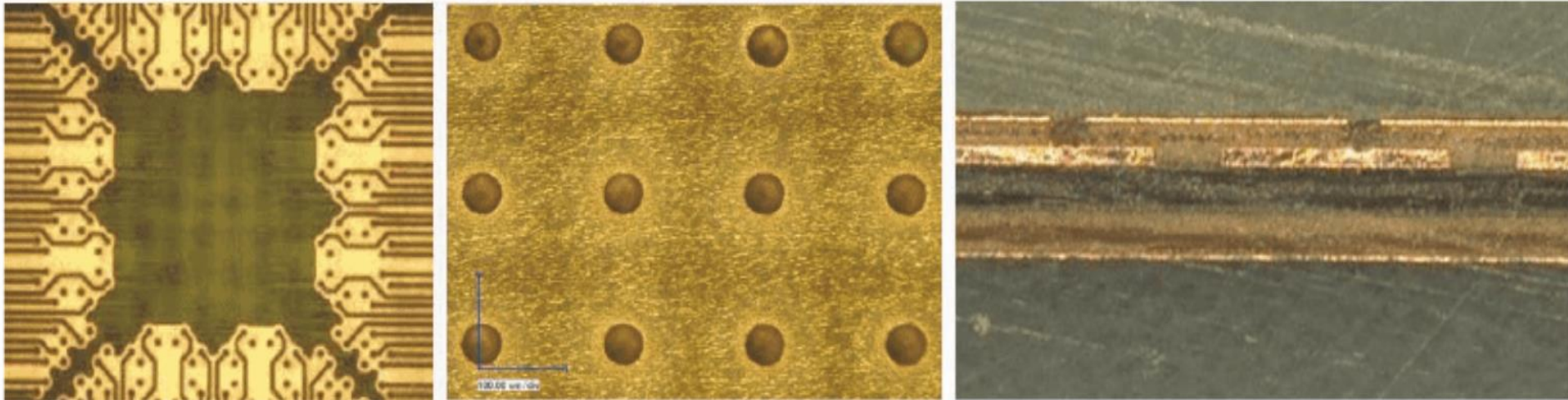


Jako su dobri za bušenje, struganje i glodanje teškoobradivih materijala (alatni čelik, keramika, W, SiO<sub>2</sub>), koji se ne mogu obraditi nanosekund pulsni laserima npr. silika sa kvalitetom obrađene površine od 0.1μm.

## PIKOSEKUND PULSNI LASERI

- imaju relativno nisku pulsnu energiju sa velikom učestalošću pulsa, te su precizni i sa malim termalnim oštećenjima, ali sa velikom proizvodnošću.
- su se pokazali kao najbolje rešenje jer su dobri kao i femtosekund pulsni a nemaju problema sa plazmom.





- Izrada otvora kod štampanih kola
- Otvori prečnika  $40\ \mu\text{m}$  i dubine  $40\ \mu\text{m}$  su napravljeni na bakru
- Zeleni pikosekund laser sa pulsevima od 1MHz i učinkom od 1000 otvora u sekundi

Optimizacija procesa je neizbežna za uspešno izvođenje procesa mikro obrade laserom.

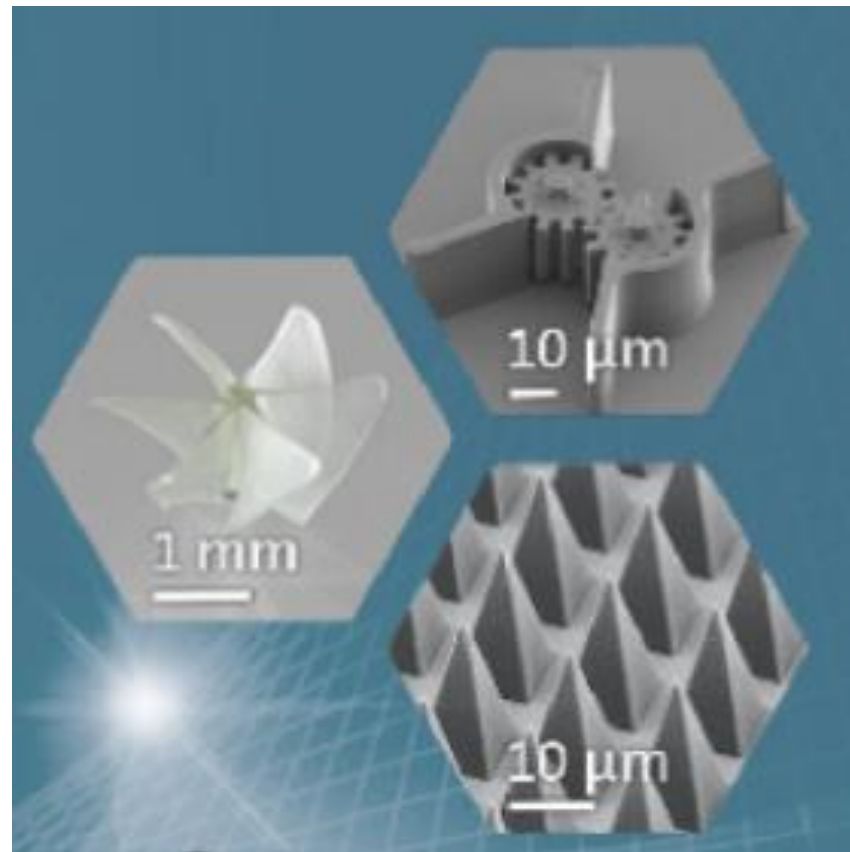
Sprovedena su istraživanja obrade različitih materijala za izabrani laser od 15W snage, kod koga je promenljiv parametar obrade bilo trajanje pulsa u dijapazonu od **240fs do 10ps**.

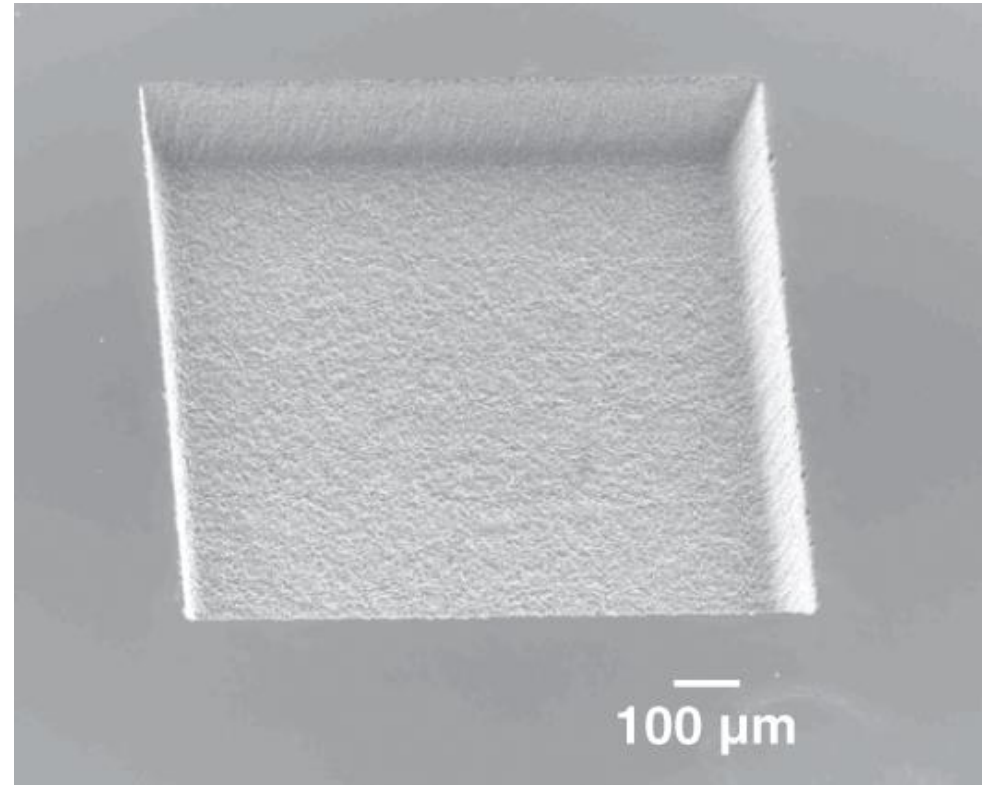
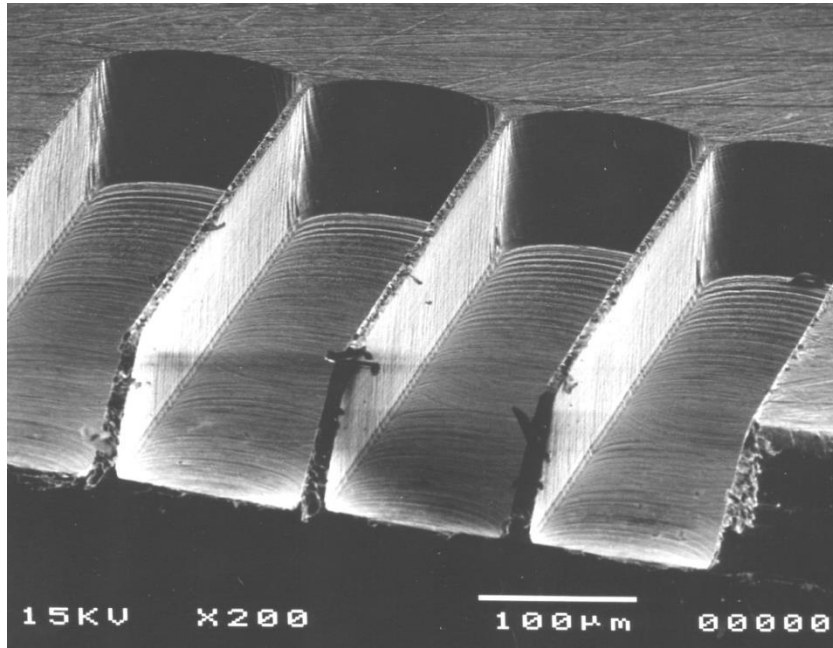
Rezultati istraživanja su ukazala da brzina uklanjanja materijala ( $\text{mm}^3/\text{min}$ ) zavisi od vrste materijala (nerđajući čelik, keramika).

- Za čelik je utvrđeno trostruko povećanje brzine uklanjanja materijala smanjenjem trajanja pulsa sa 10ps na 900fs.
- Suprotno se desilo sa keramikom.

Metalni i dielektrični materijali imaju različito optimalno trajanje pulsa. Za metale je to 900fs, a za dielektrike 10ps.

Povećanje učestalosti utiče nepovoljno na kvalitet obrade, te je optimalna vrednost 1.1MHz.

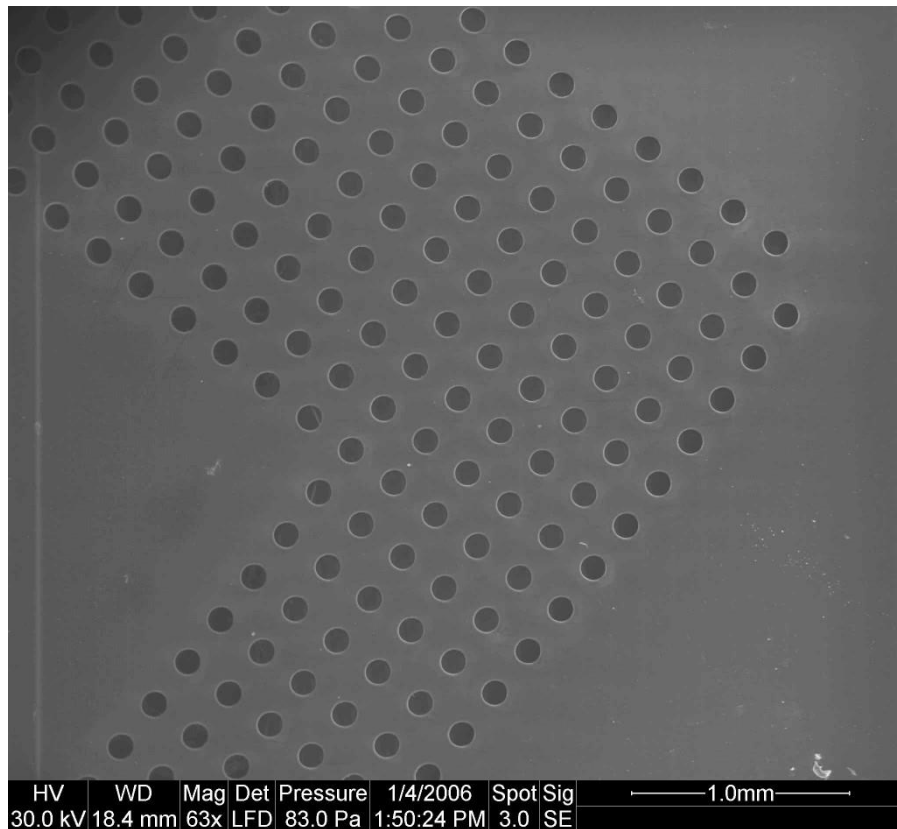




Nanopulsnim laserima je, npr. teško izvodljivo glodanje, tj. bočne strane su dobre, ali na dnu ostaje sloj sa očvrslim materijalom. Pikopulsni laser daje izuzetne rezultate i glatku površinu, jer ima mali korak s obzirom na veliku učestalost pulsa. Primena ovog lasera u izradi kalupa za mikro livenje i presovanje je velika.

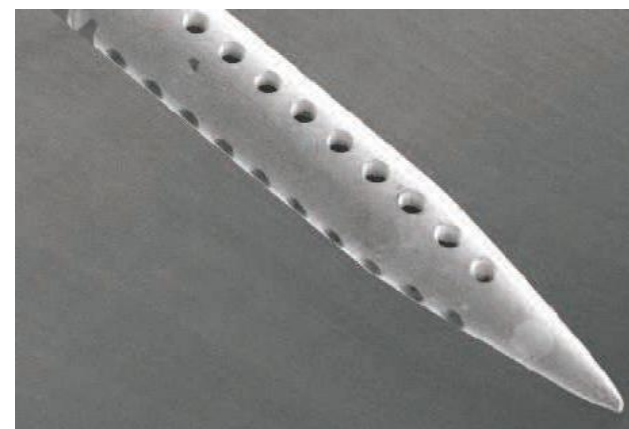
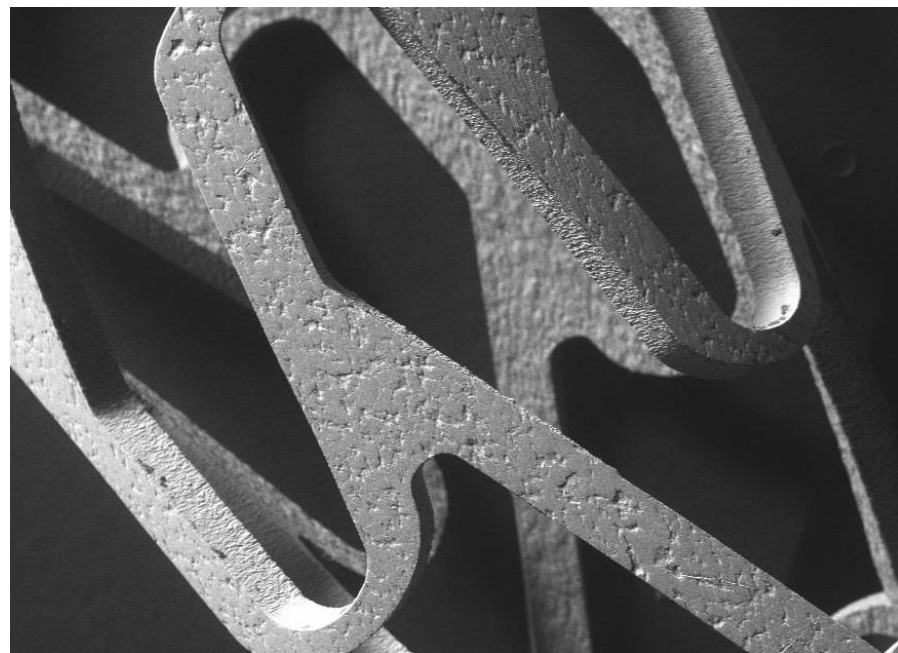
## PRIMERI

Mikro otvori prečnika mikrona u poliamidu se mogu obraditi laserom sa submikronskom tolerancijom i sužavanjem.

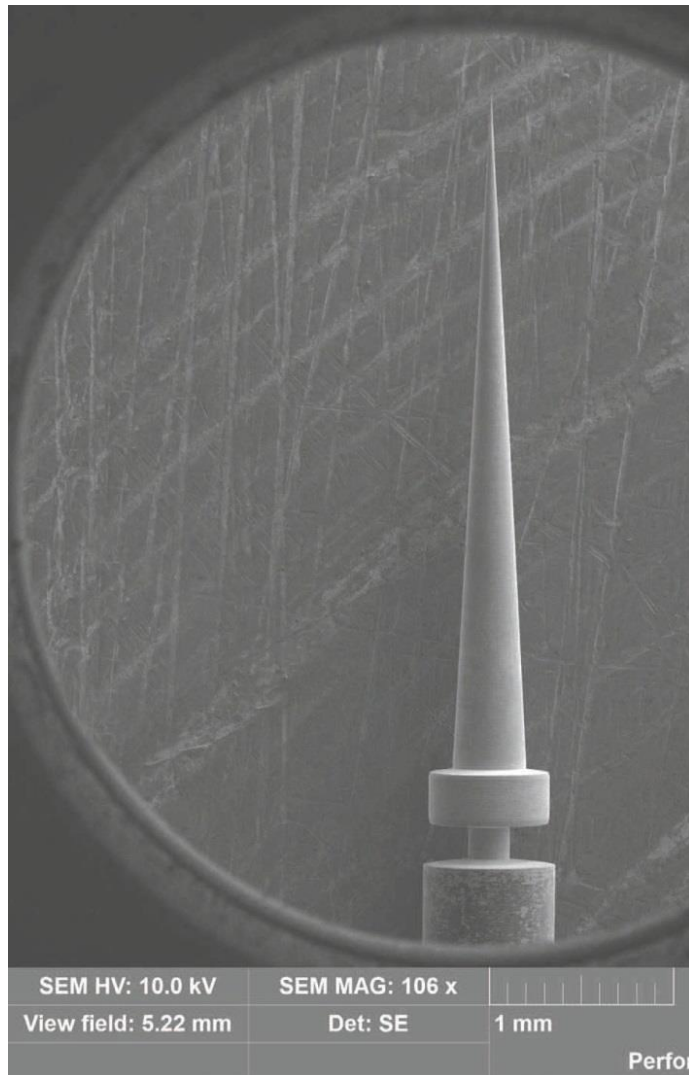


Otvori za fluid na kanili su 100 mikrona

Stent spoljašnjeg prečnika od 3.3mm



Iglica (pin) dužine 3.5 mm sa prečnikom na vrhu od 0.4 mm



Kalem (bobbin) prečnika 0.7 mm sa žljebovima širine 50  $\mu$ m i 14  $\mu$ m dubine



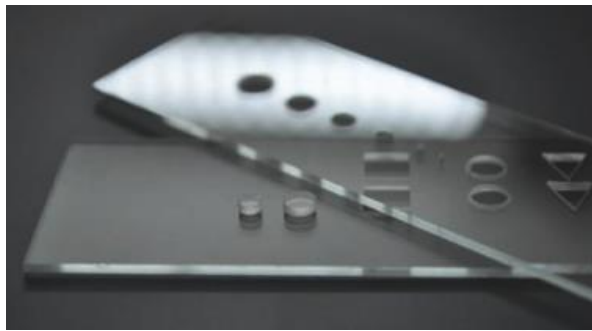


Laserski obradni centar

Veći primitivi se obrađuju pomeranjem laserskog zraka ili pomeranjem obratka.

Laserskom mikro obradom se postiže preciznost od  $\pm 5\mu\text{m}$  do  $\pm 2.5\mu\text{m}$  usled korišćenja pozicionih sistema visoke tačnosti.

Primenom robota postiže se poziciona tačnost od  $\pm 1\mu\text{m}$  i dvosmerna ponovljivost od  $\pm 500\text{nm}$ .



Ultrashort pulse laser (USP)  
micromachining centres LASEA LS5

USP se koristi u aerokosmotehnici,  
elektronici, juvelirstvu, biomedicini.  
7-osna mašina koja kombinuje USP  
laser sa 5 (x,y,z,a,c) mehaničkih osa i  
2 optičke ose (x,y) sa 2D skenerom  
koji omogućava upravljanje putanjom  
USP lasera

LASEA

[www.lasea.eu](http://www.lasea.eu)

Rainford Precision Machines

<https://rainfordprecision.com>



Obrada mikroudubljenja kod elektronskih mikrokomponenti i inserata za kalupe za brizganje

Laserska tehnologija obezbeđuje čist proces koji ne zahteva elektrode ili glodala, nema strugotine, potrošnog materijala.



LASER VS. EDM

PREDNOSTI lasera

- + Nema potrebe za potrošnim materijalima (dielektrikum, elektrode)
- + Neprovodni materijali se mogu obraditi (keramika SiC)
- + Uniformnost na velikim površinama
- + Prilagodljivost i fleksibilnost
- + Funcionalne teksture
- + Mikroskopske teksture sa femtosekund laserom

LASER VS. GLODANJE

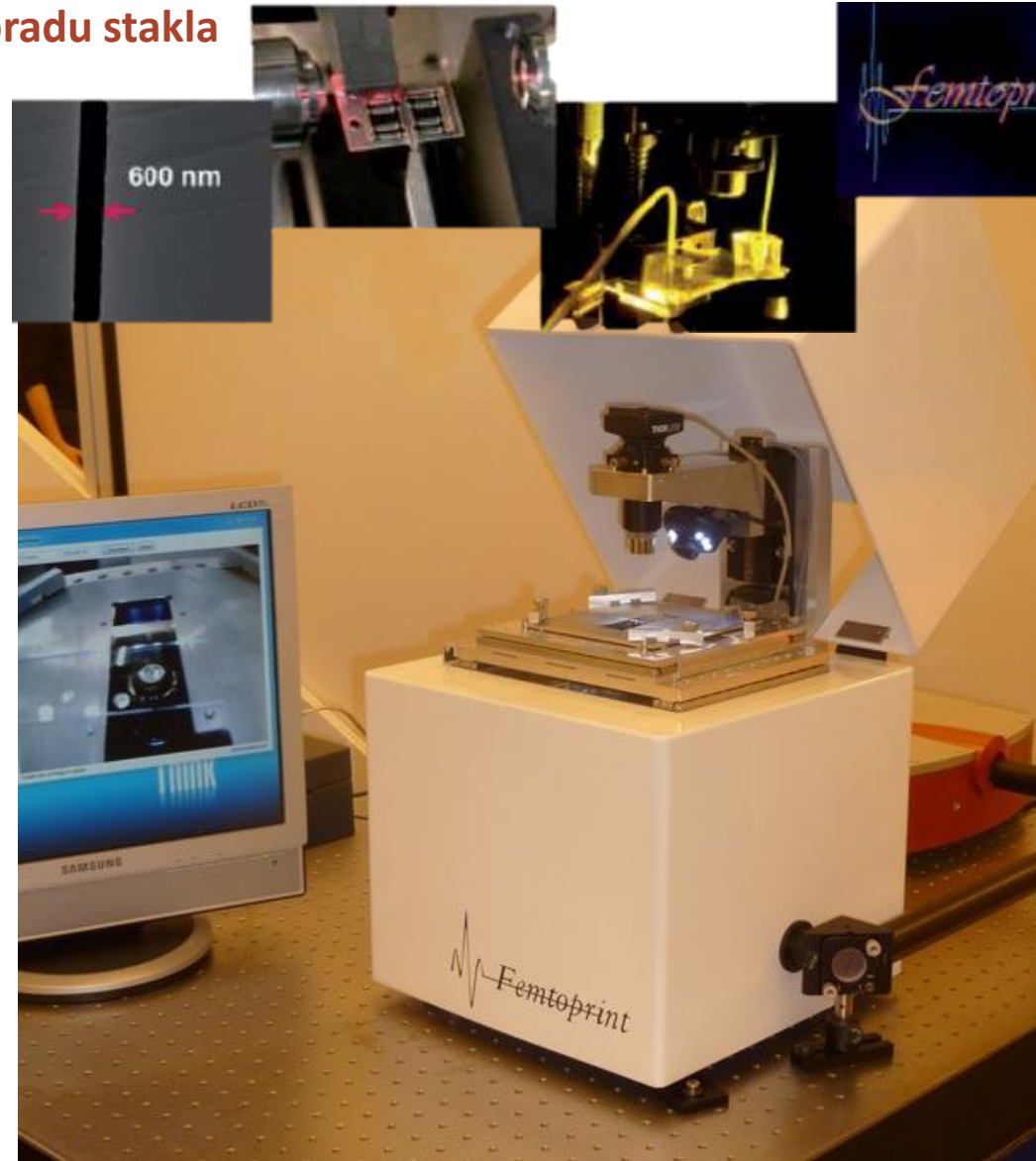
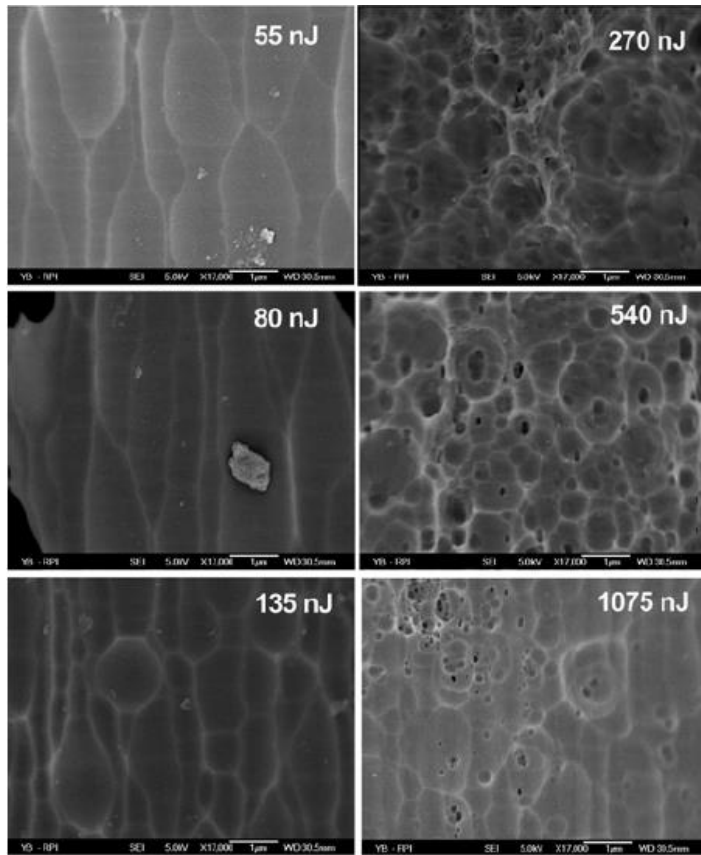
PREDNOSTI lasera

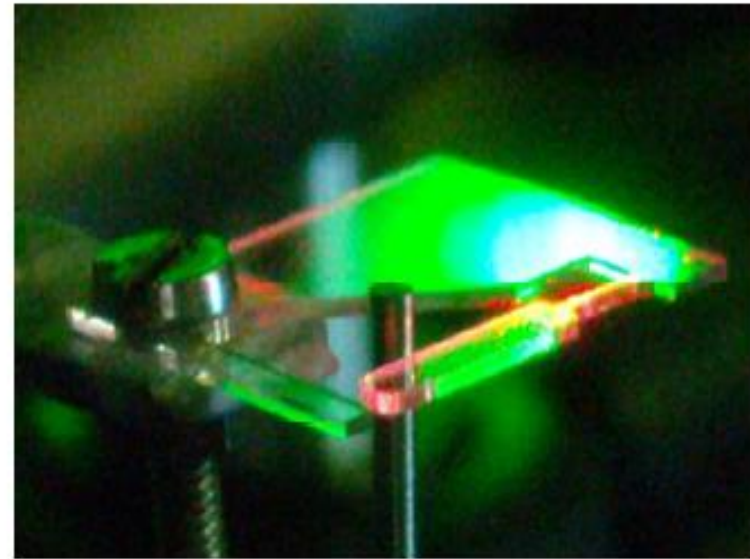
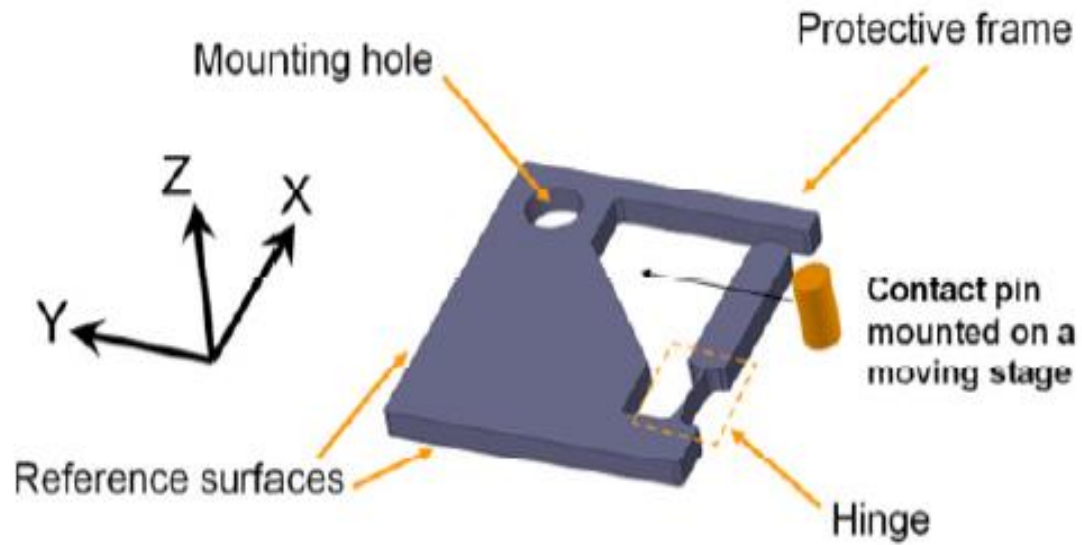
- + nema potrebe za potrošnim materijalima (alati, SHP)
- + Tvrdi i krti materijali se mogu obraditi
- + Obrada bez oštrih ivica sa femtosekund laserom
- + Uski snop, mali primitivi
- + Efikasnost

## Primena Femtoprint-a:

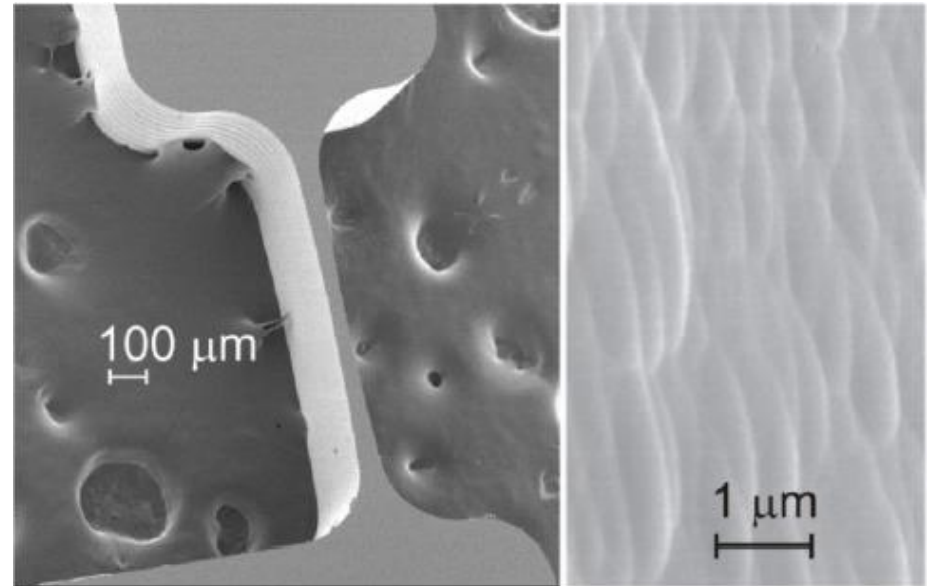
- Nanofluidika
- Mikro mehanički i optički senzori
- Laboratorija na čipu
- Nano graviranje

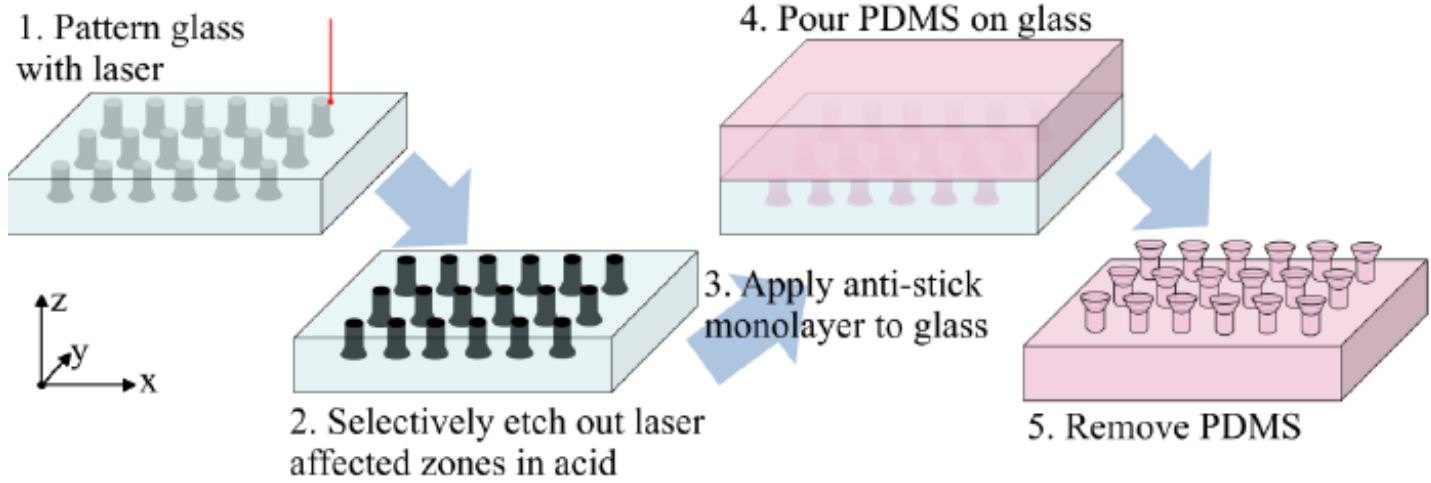
## Femtoprint – femtosekund pulsni laserski sistem za mikro-nano obradu stakla





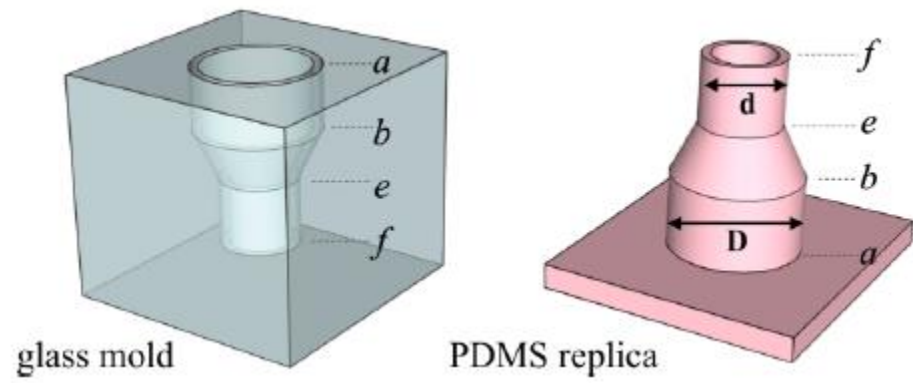
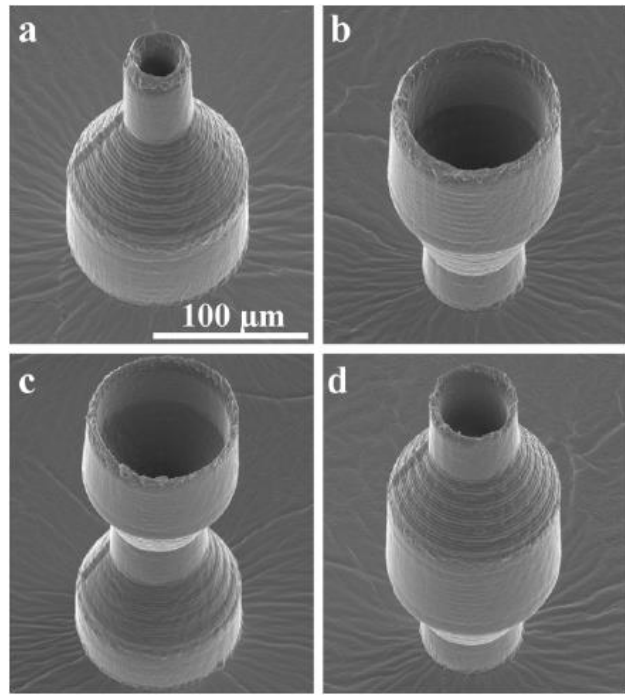
Mikro obrada šarke





Mikro obrada alata od stakla za zapreminsko oblikovanje polimernih delova

1. Laserom generisan šablon
2. Nagrizanje šablona
3. Nalivanje polimera u šablon
4. Uklanjanje polimera



## LASERSKO MIKRO ZAVARIVANJE

Veliki je izbor lasera sa kojim se može sprovesti spajanje u mikro području. Fajber (*Fiber*) laseri sa kontinualnim zrakom CW i nanosekund laseri se izdvajaju posebno.

**Pulsni** neodijum dopiran jitrjum aluminijum garnet **Nd:YAG** laseri su sa tipičnim 0.2-4kW max snage i 0.1-10ms pulsnog trajanja ustoličeni odavno kao dobar izbor uz potpuno servisiranje na terenu. Imaju fleš lampu koja omogućava dobru kontrolu max snage i trajanje pulsa. Na primer laser od 25W snage može da obezbedi 6kW snagu vrha laserskog zraka sa 600um optičkom tačkom, što je dovoljno za zavarivanje čelika i aluminijuma.

**Nanosekund laser** omogućava dobru kontrolu zraka na 60-250ns pulseva na učestalosti od 20 do 500kHz sa 10kW snage. Pogodan je za tanke materijale, raznorodne spojeve i fine tačkaste aplikacije.

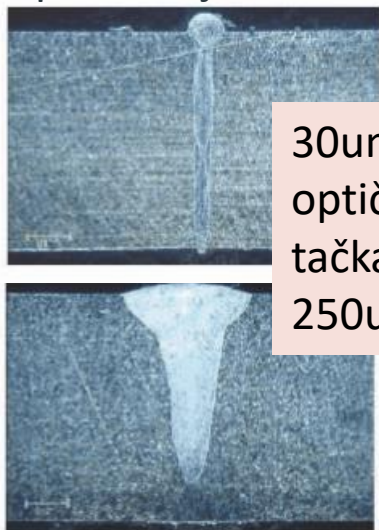


## MIKRO OBRADA I KARAKTERIZACIJA – MIKRO OBRADA LASEROM- 28

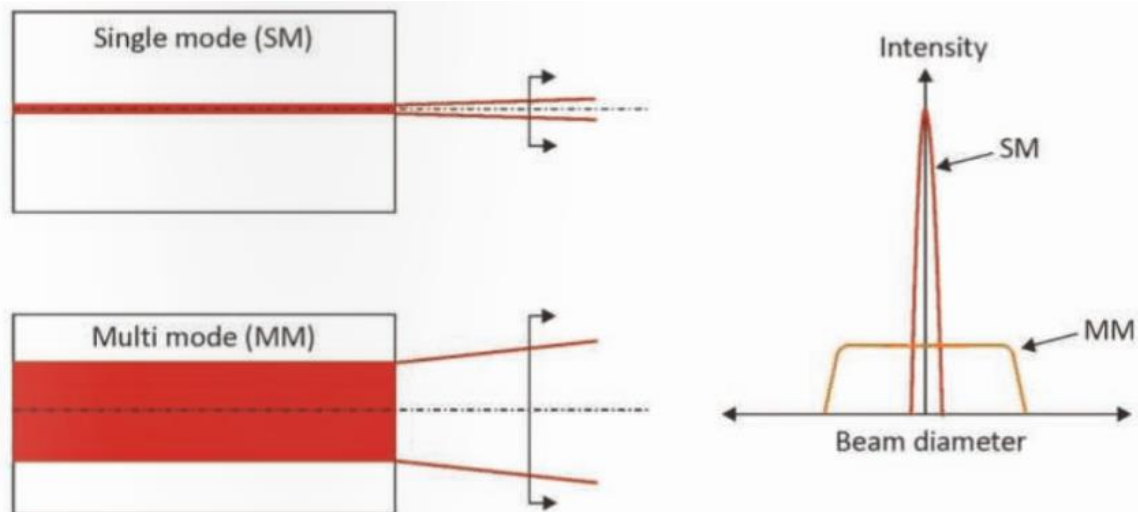
**Fajber laseri** sprovode laserski zrak kroz stakleno vlakno dužine do 10m i prečnika od 10 do 50 $\mu$ m. Iterbijum (Ytterbium) se koristi kao doping element sa talasnom dužinom od 1 $\mu$ m. Dodatna prednost ovih lasera je u fokusiranju i podešavanju kvaliteta zraka. Mogu da rade u pojedinačnom ili višestrukum modu, što definiše fokusiranost i gustinu distribucije zraka.

Fajber laseri sa kontinualnim zrakom CW imaju odličan odnos brzine i prodiranja zraka i sposobnost da zavaruju provodne i raznorodne materijale. Dodatno mogu isključivanjem i uključivanjem da se pretvore u pulsne lasere. Optička tačka je ispod 100 $\mu$ m sa dubinom prodiranja zraka od 1.5mm kod CW lasera od 500W.

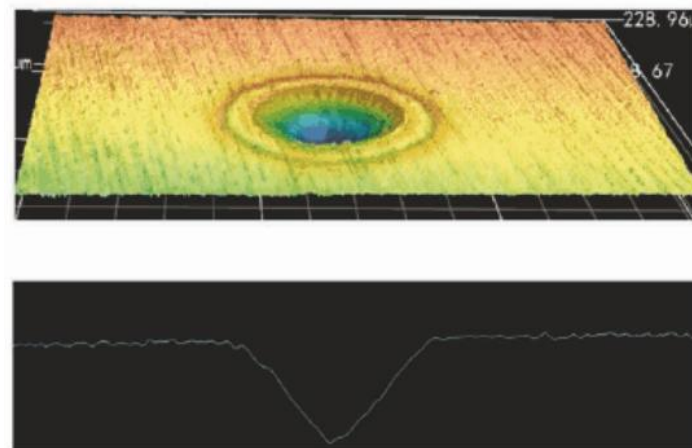
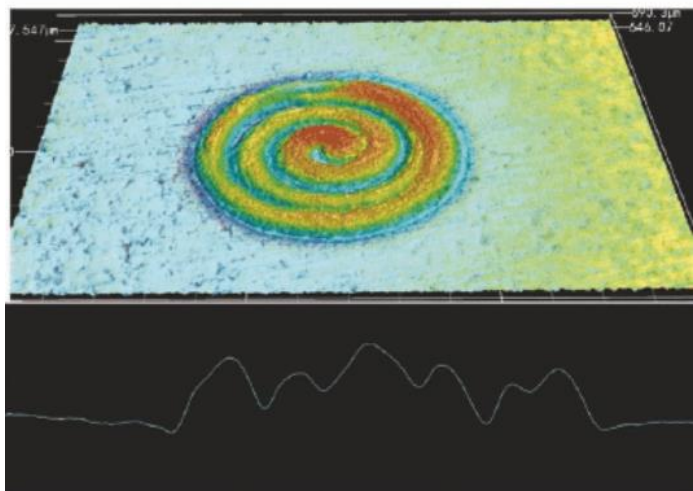
Fajber laseri sa kontinualnim zrakom CW su sličnih osobina kao Nd:YAG (sa tipičnim 0.2-4kW max snage i 0.1-10ms pulsnog trajanja) uz malu lasersku tačku (25 $\mu$ m do 1mm) i dobro prodiranje zraka. Nedostatak je cena nabavke i servisiranja, a prednost što nemaju fleš lampu.



30 $\mu$ m  
optička  
tačka  
250 $\mu$ m



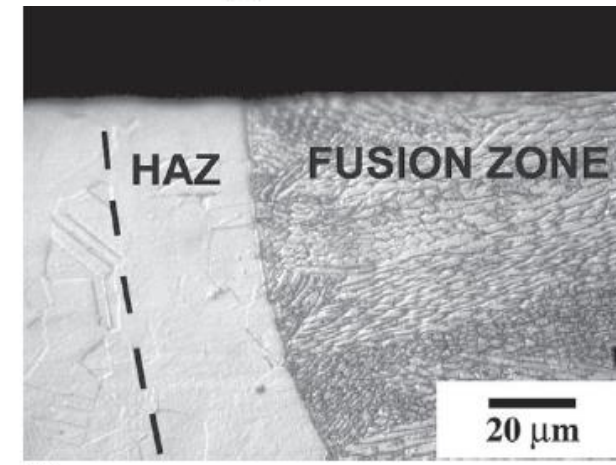
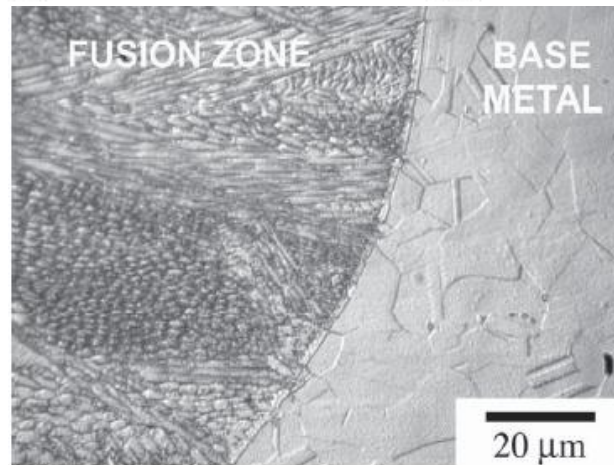
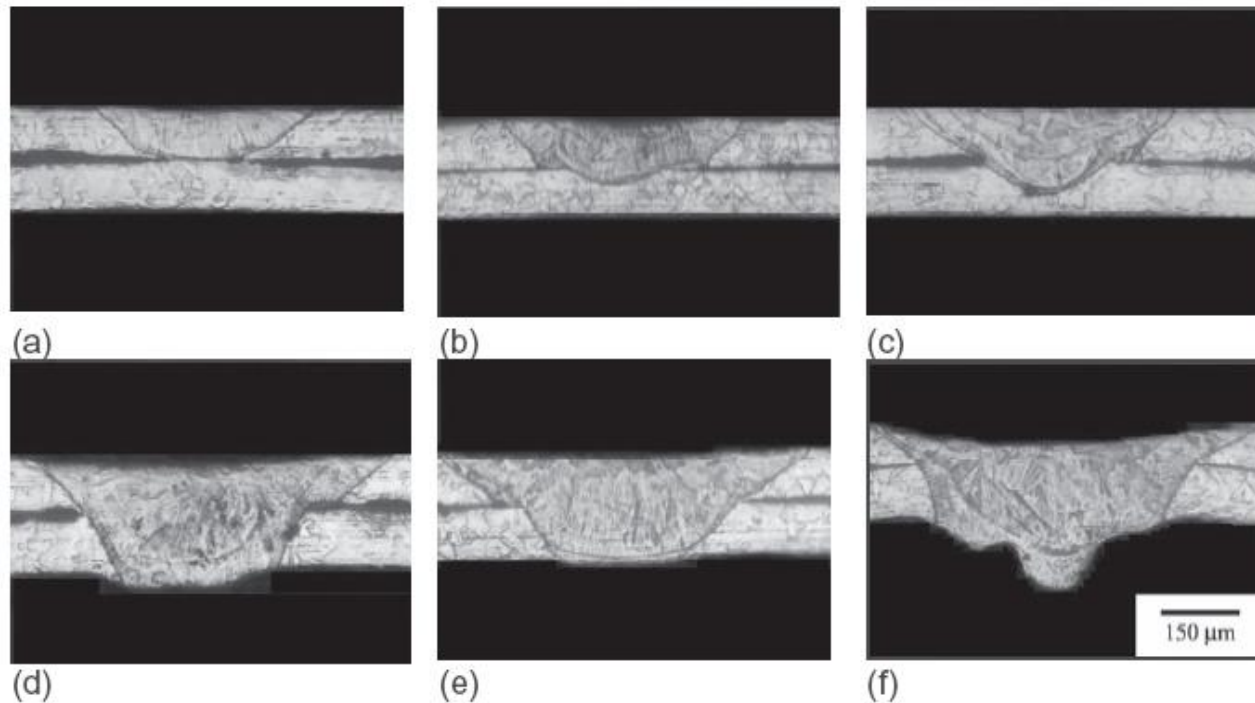
► *Figure 2:*  
Schematic  
of single and  
multi-mode fibre  
lasers. ►



Fajber nanopulsni laser u poređenju sa laserom sa kontinualnim zrakom CW na primeru zavarivanja čelika. Otopljeni materijal kod fajber nanopulsnog lasera je u obliku spirale i ravnomernije je dubine nego kod CW gde je konusnog oblika. CW laser je povoljniji za zavarivanje čelika od nanosekund lasera.

## PRIMER MIKRO ZAVARIVANJA LASEROM

Pulsni Nd:YAG laser za zavarivanje Monela (legure Ni i Cu sa otpornošću na koroziju koja je veća nego kod nerđajućih čelika)



(a)

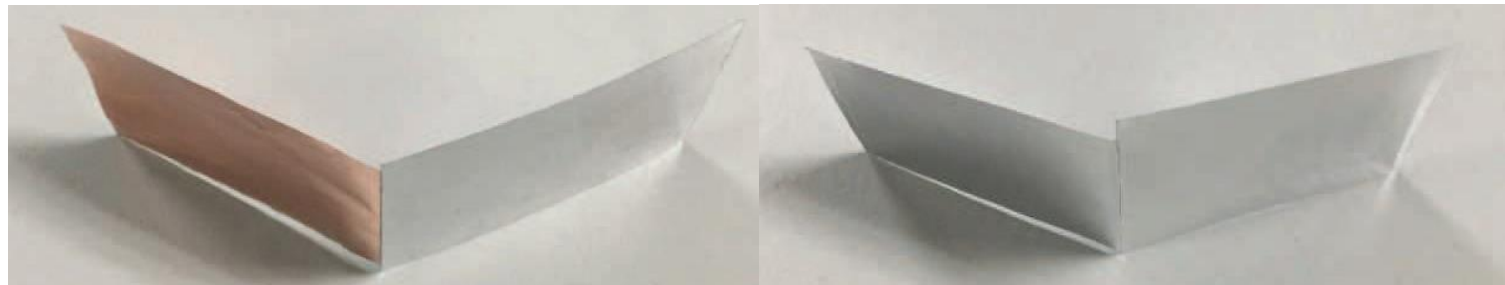
(b)

## PRIMER MIKRO ZAVARIVANJE RAZLIČITIH MATERIJALA LASEROM

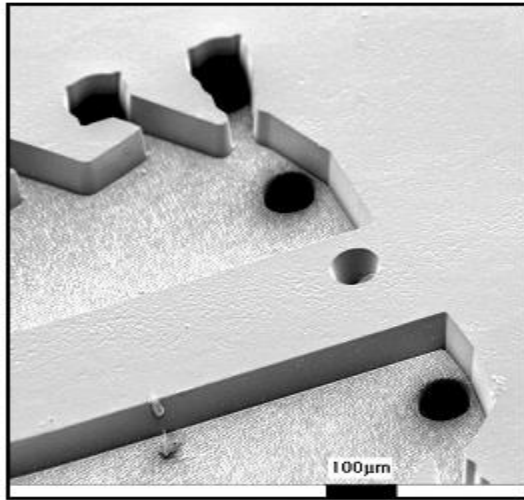
Spajanje u mikroskopskom području mera tankih metalnih materijala nije izvodljivo metodama zavarivanja, lemljenja, lepljenja ili mehaničkog spajanja. Primer primene kod baterija



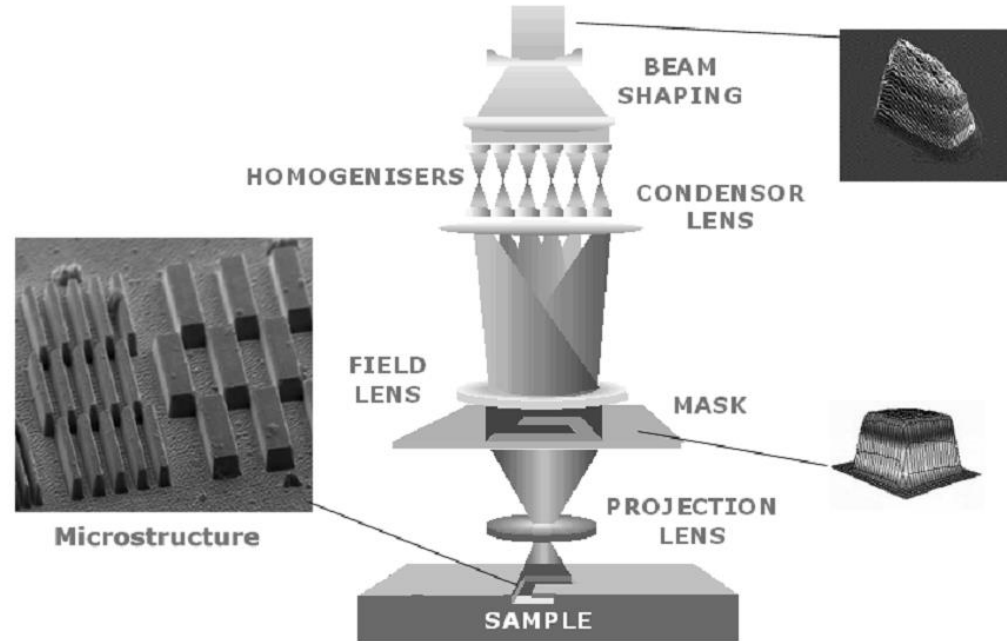
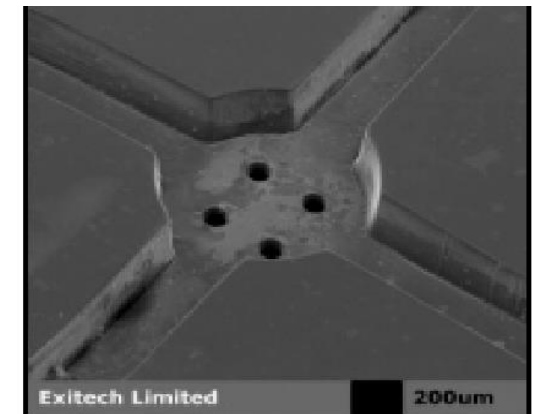
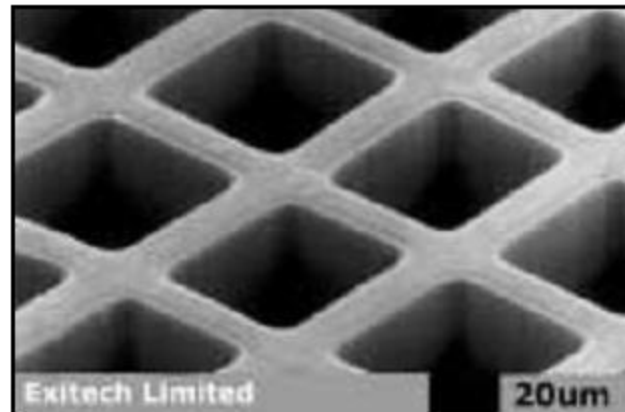
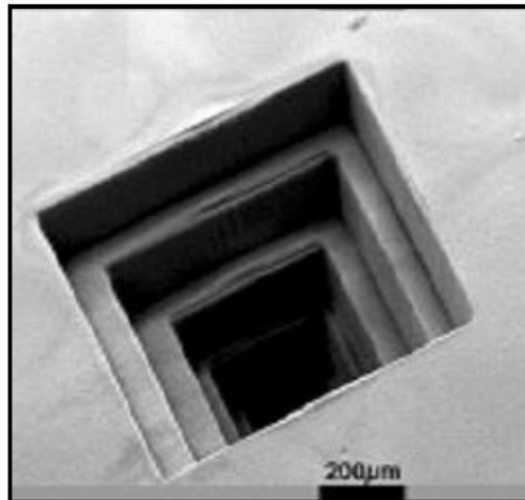
Infracrveni nanosekund pulsni laser je u stanju da spoji 20 folija i bakarnih i aluminijumskih koristeći 200 W. Jačina spoja je dobra zbog otopljenog materijala i u slučaju spajanja  $10\mu\text{m}$  bakarne sa  $25\mu\text{m}$  aluminijumskom folijom postiže se napon tečenja  $>2.5\text{ N}$ , a u slučaju spajanja dve aluminijumske folije debljine od  $50\mu\text{m}$  postiže se napon tečenja  $>25\text{ N}$ .

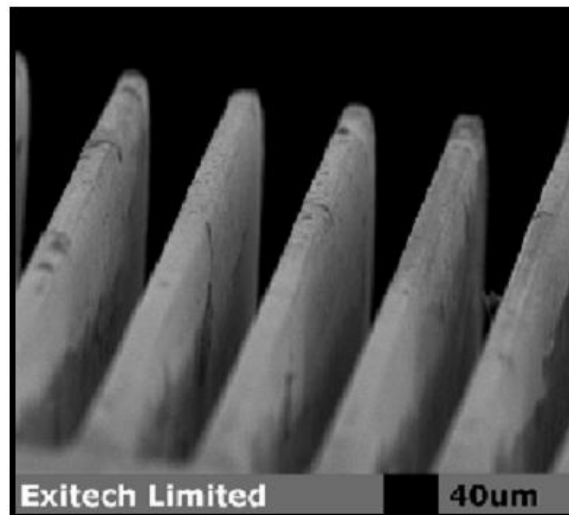
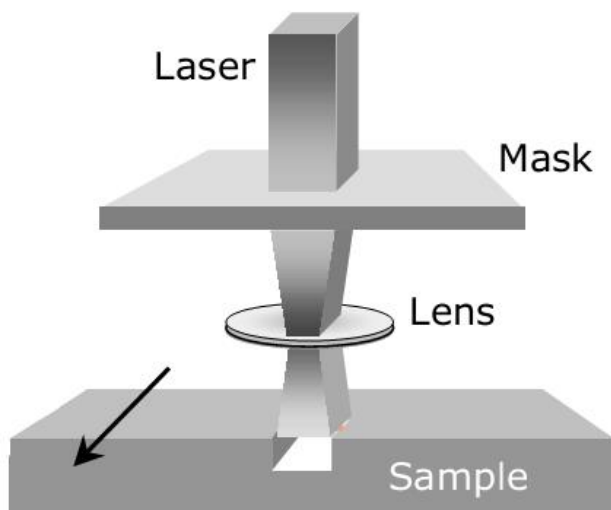


## PROJEKCIONA LITOGRAFIJA EKSCITACIONIM LASERIMA SA UV ZRAČENJEM

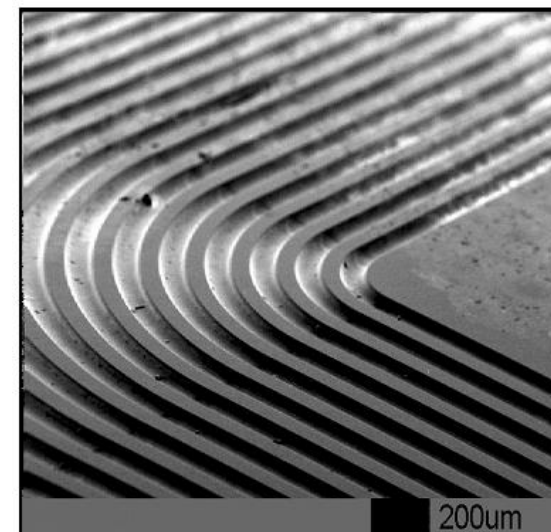
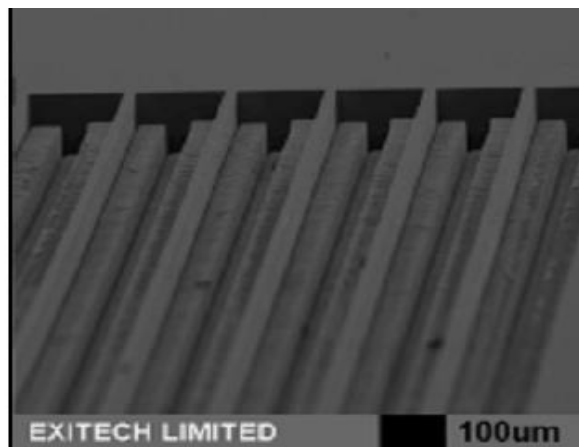
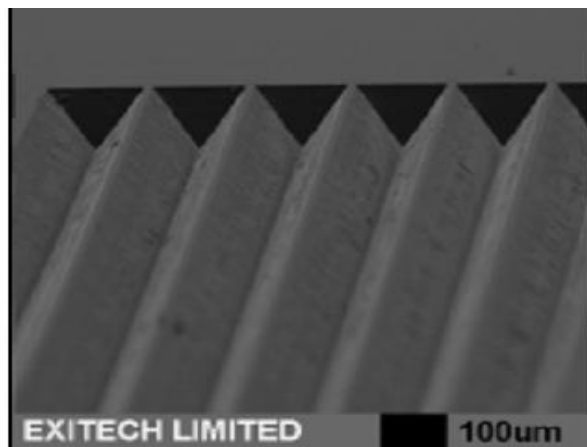


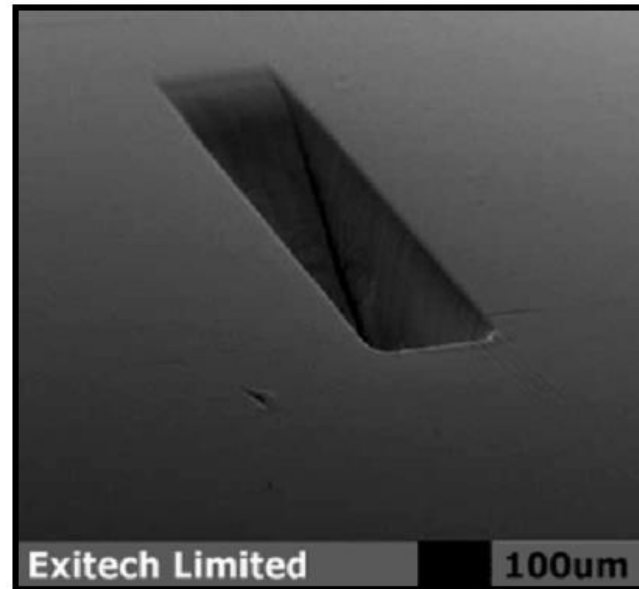
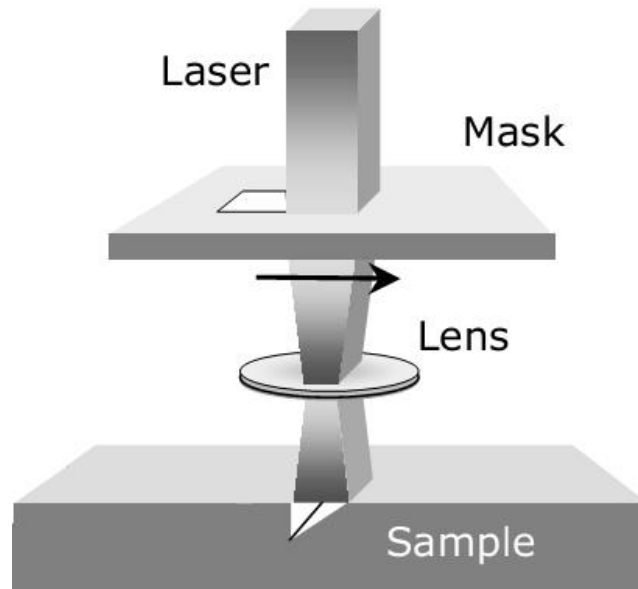
Sa statičnim višestrukim maskama, indeksna i tzv. step-and-repeat obrada



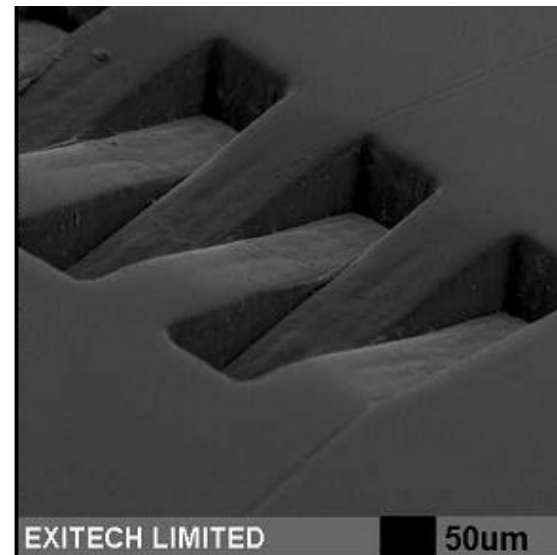
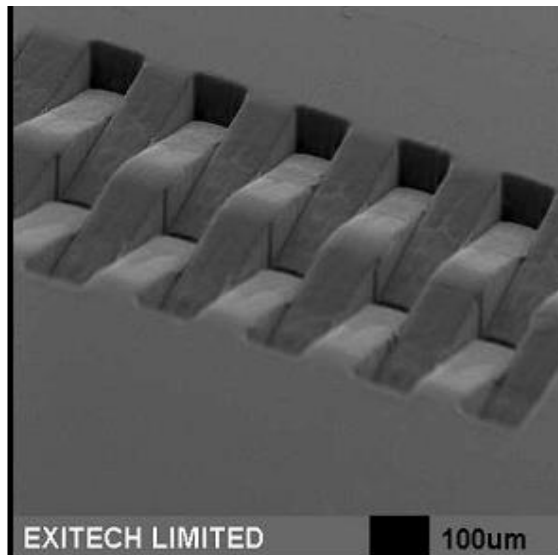


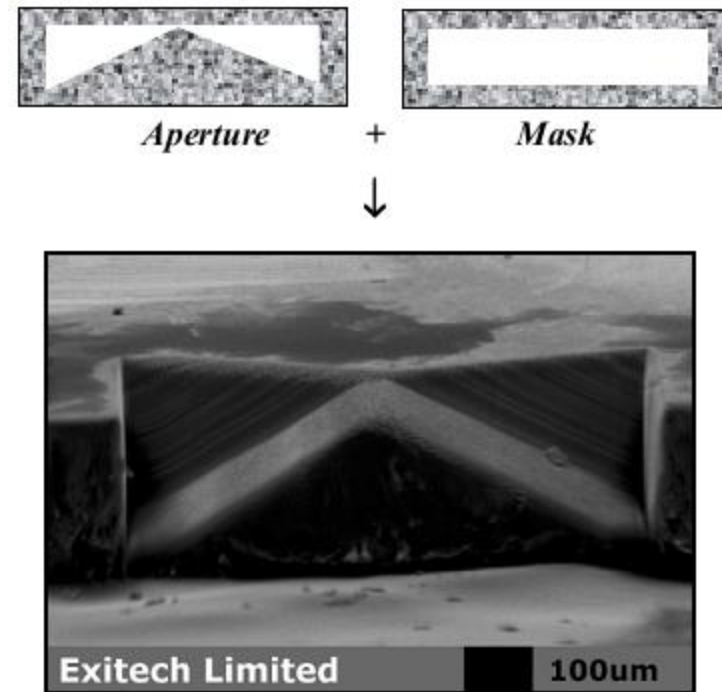
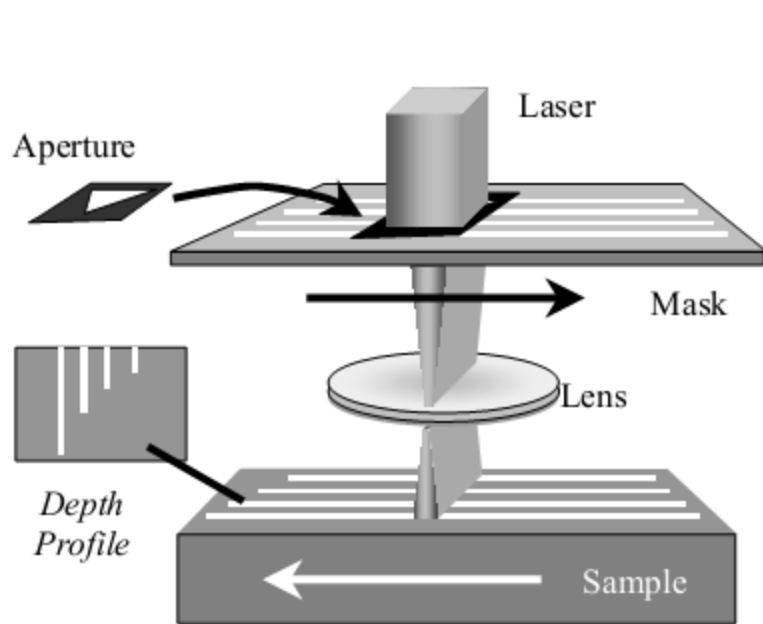
KANALI -Sa statičnom maskom trouglastog ili T oblika uz linearno ili nelinearno vučenje obratka



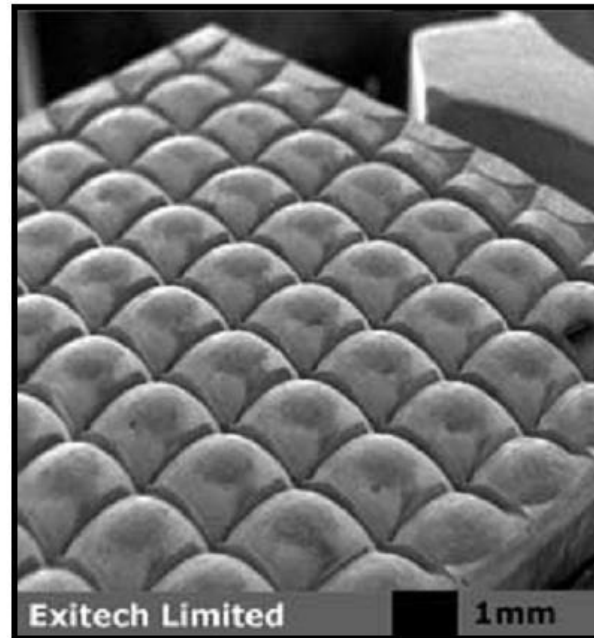
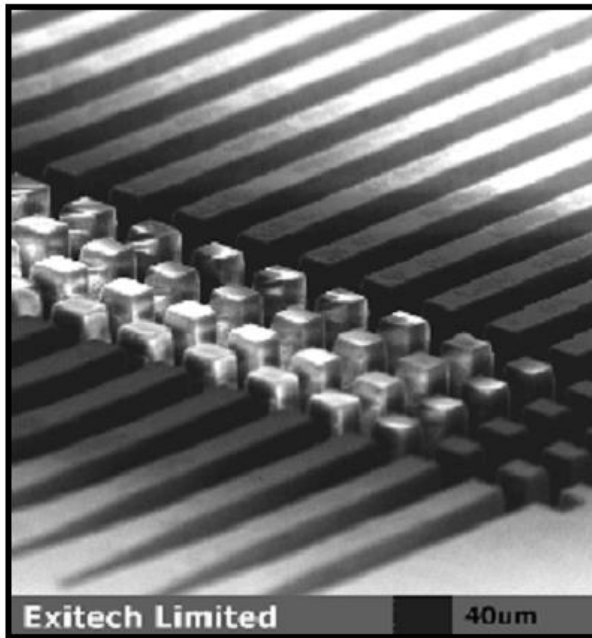


RAMPE - Sa maskom određenog oblika uz linearno vučenje neprovidne maske





Sinhronizovano - Sa maskama određenog oblika uz linearno vučenje maske i obratka



Površinsko struktuiranje- Sa maskama određenog oblika uz 2D linearno vučenje obratka

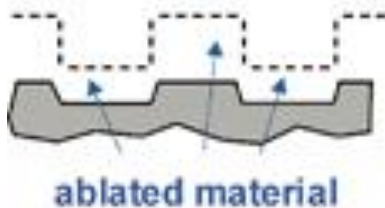
## POLIRANJE LASEROM VELIKIH POVRŠINA ILI LOKALNIH UZVIŠENJA ABLACIJOM ILI TOPLJENJEM

Poliranje velikih površina ablacijom se koristi za CVD dijamantske prevlake Ra se smanjuje do 4 puta

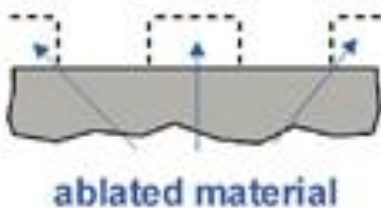
**Cross-section of initial profile**



Polishing by large-area ablation

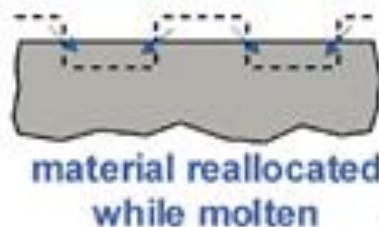


Polishing by localized ablation

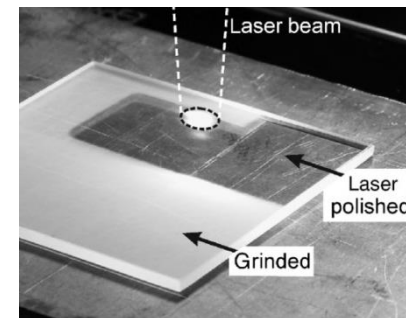


Lokalno poliranje komplikovano i slabo se upotrebljava

Polishing by remelting



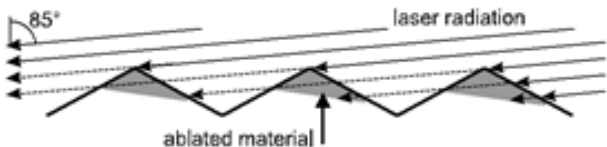
Poliranje topljenjem se koristi za metale i staklo i Ra se smanjuje do 500 puta



Profile of diamond layer before laser polishing



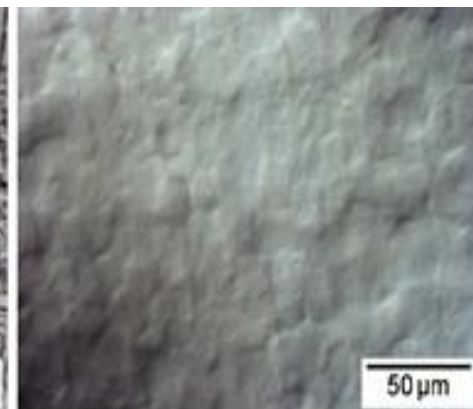
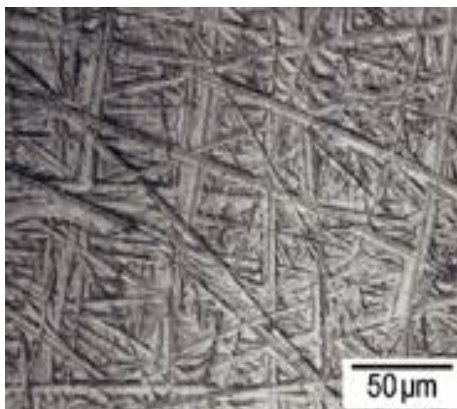
Material ablation with an angle of incidence of 85°



Material ablation after changing the irradiation direction

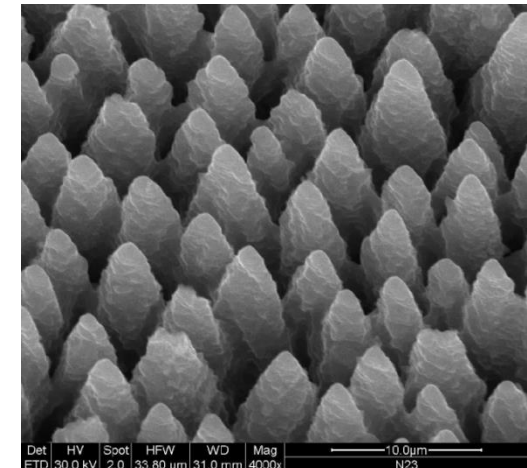
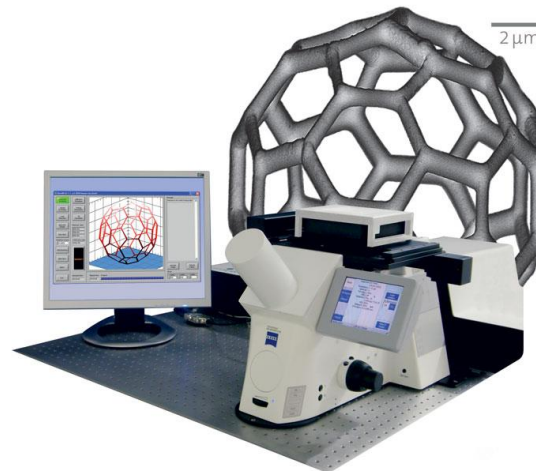
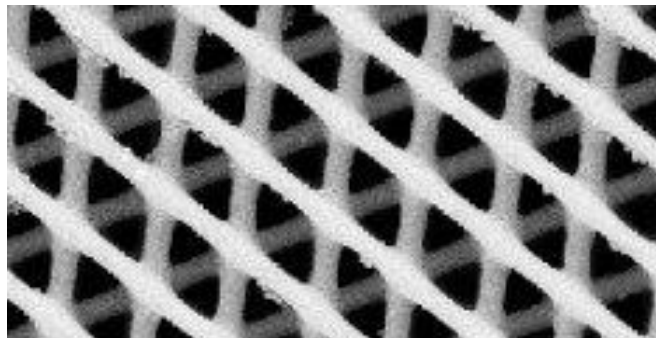
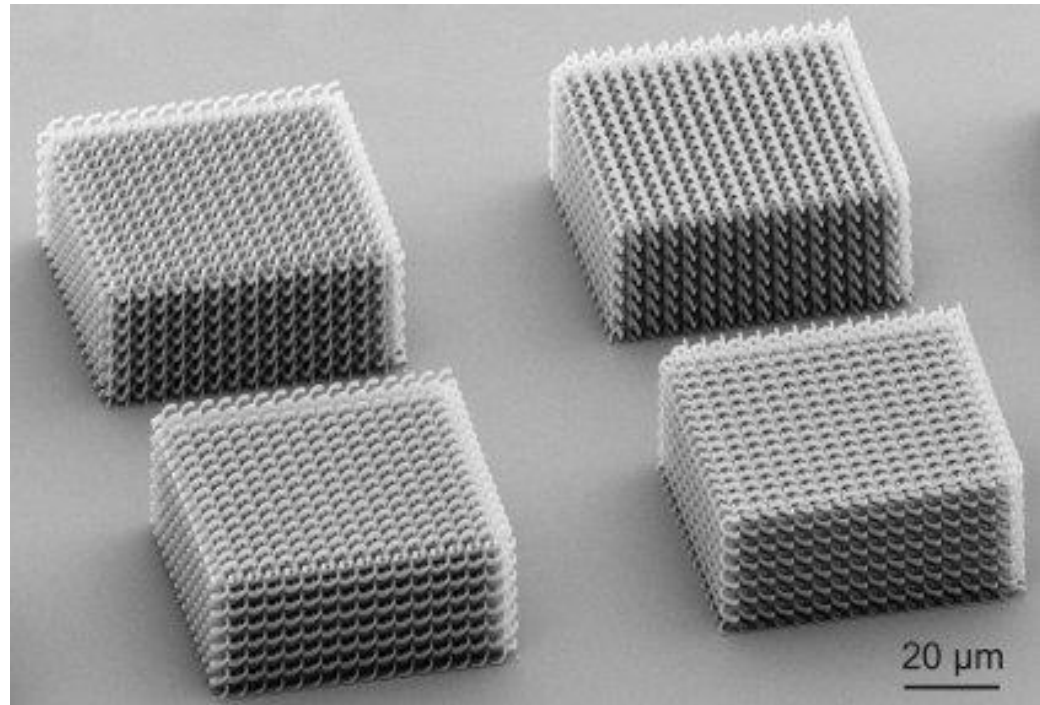


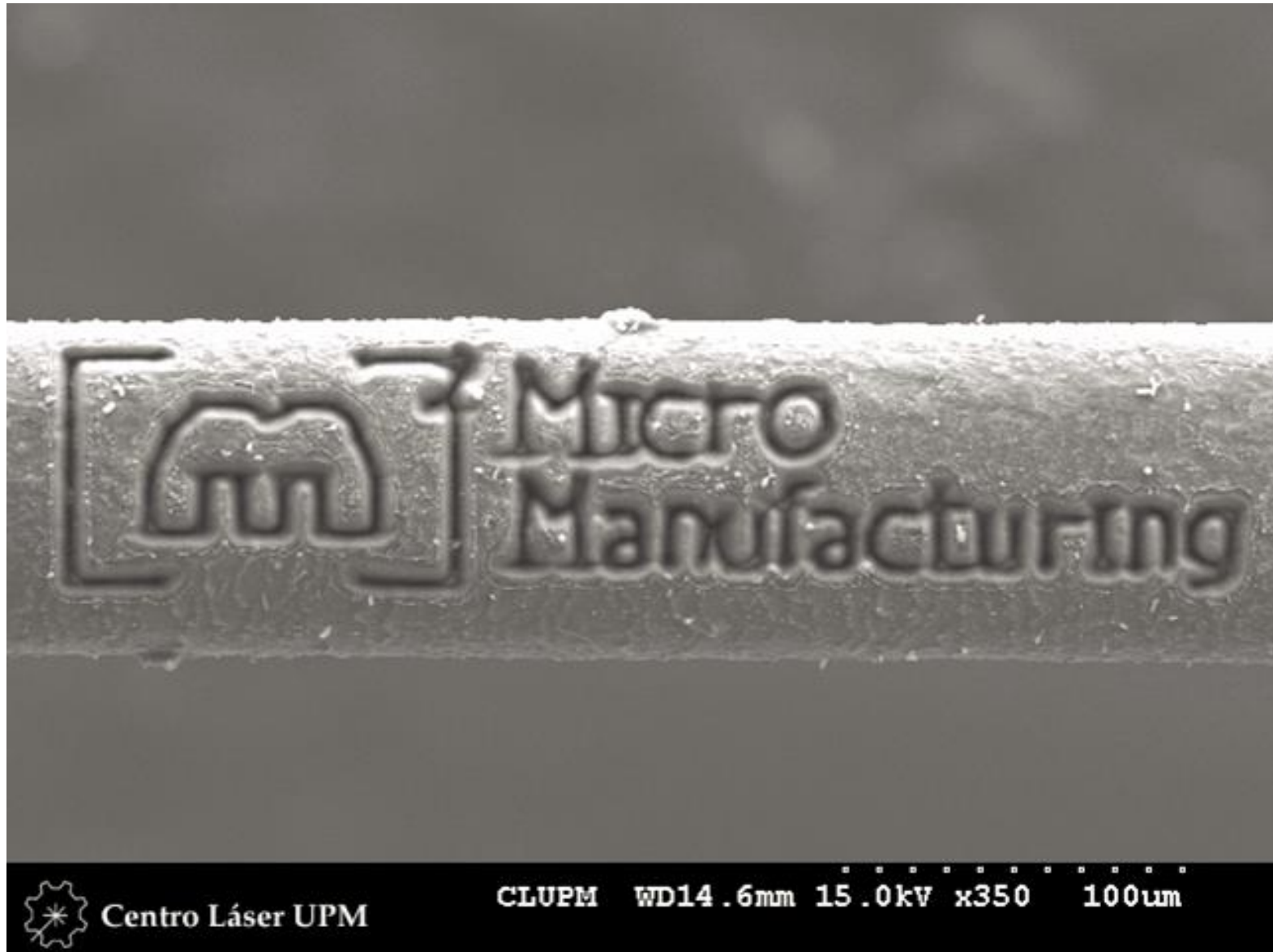
Profile of the diamond layer after laser polishing



## Femtopulsna laserska litografija

- POSTUPAK-Bazira se na direktnom “pisanju” na fotosenzitivnom materijalu. Femtopulsni laser fokusira kratak puls čija je energija ispod praga apsorpcije. Kod osvetljenog dela materijala dolazi do apsorpcije više fotona, te se hemijska modifikacija, tj. lokalna polimerizacija dešava prilikom procesa pečenja koji sledi. Primitivi koji se dobijaju su manji od 150 nm.
- PRIMENA-Koristi se za preciznu izradu 3D nano i mikro struktura, kao što su biološke skele za tkiva (*scaffolds*).





## Literatura

<http://www.micromanu.com>

[http://groups.ist.utl.pt/rschwarz/rschwarzgroup\\_files/PLD\\_files/](http://groups.ist.utl.pt/rschwarz/rschwarzgroup_files/PLD_files/)

<http://www.raydiance.com/getting-started/applications-spotlights>

<http://www.mlpc.com/laser-application-center/application-gallery>

[http://www.3d-micromac.com/Semi MEMS-en.html](http://www.3d-micromac.com/Semi_MEMS-en.html)

<http://www.3d-micromac.com/Publications-en.html>

<http://www.3d-micromac.com/MedicalApplications-en.html>

<http://exitech.org/Content.asp?Section=Gallery>

Nadeem Rizvi, Exitech Limited Papers

Y. Bellouard, Optic Express, 2004.

Y. Bellouard, Optical Materials Express, 2011.

A. Schaap, Y. Bellouard, Optical Materials Express, 2013.