

MAŠINSKI FAKULTET UNIVERZITETA U NIŠU

**PRIMENA LASERA NA POLJU  
MIKROELEKTROMEHANIČKIH SISTEMA**

Seminarski rad

Predmetni nastavnik

Dr. Miloš Milošević

Student

Marko Kovandžić

## Uvod

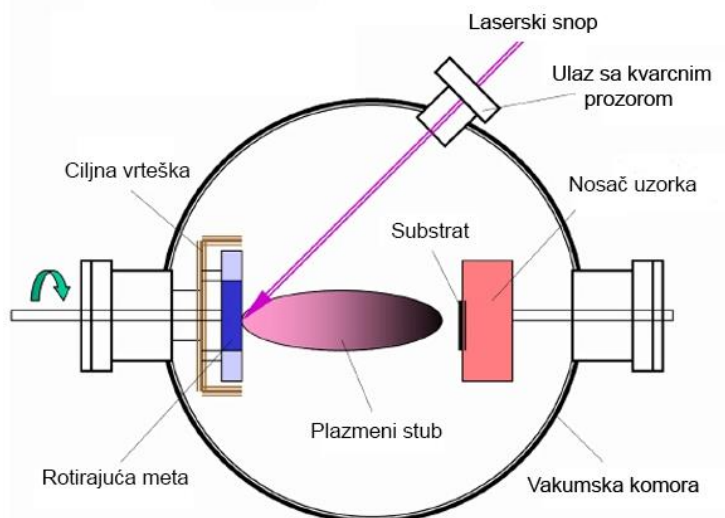
Laser je tehničko sredstvo koje emituje svetlost zahvaljujući procesu optičkog pojačanja baziranom na stimulisanoj emisiji elektromagnetnog zračenja (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Zahvaljujući svojim osobinama (veliki intenzitet zračenja, koherentnosti spektra, usmerenosti zraka) laseri su, od svog nastanka početkom šesdesetih godina pa do danas, doživeli veliku primenu u industrijskoj proizvodnji.

Lasери naročito nadmašuju konkurentne tehnologije (kao što je tehnologija plazme) u proizvodnji mikroelektromehaničkih sistema (MEMS) ili mikrosistema. Ovo su elektromehaničke naprave izuzetno malih dimenzija (reda veličine 1-100  $\mu\text{m}$ ). Mikrosistemi doživljavaju široku primenu u savremenoj tehnici zahvaljujući prirodi materijala kao što su  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , polimeri, keramika i drugi. Tehnologija za izradu mikrosistema nastala je modifikacijom različitih tehnika izrade poluprovodnika koje su inicijalno razvijene u svrhu proizvodnje elektronskih komponenti.

Pored upotrebe lasera u tehnologiji proizvodnje mikrosistema, oni mogu biti primenjeni za njihovu karakterizaciju i testiranje. U sledećim tekstu biće pomenute najznačajnije tehnike primene lasera u oblasti mikrosistema.

## Laserom izazvano taloženje

Tehnika laserom izazvanog taloženja koristi se za nanošenje kvalitetnih filmova materijala na substrat (podlogu). Proces se inicira pogađanjem ciljanog materijala fokusiranim laserskim snopom usled čega se material topi, isparava, jonizuje i burno odvaja od ciljane površine u vidu plazmenog mlaza. Oslobođeni materijal se kondenzuje i taloži na površinu substrata koja postepeno biva prekrivena filmom ciljanog materijala.



Sl.1 Šematski prikaz opreme za laserom izazvano taloženje

Kada laserski zrak pogodi material on biva apsorbiran tako da se njegova energija prvo konvertuje u elektronsku ekscitaciju, nakon toga u termičku, hemijsku i mehaničku energiju što rezultuje isparavanjem, ablacijom, formiranjem plazme pa čak i eksfolijacijom materijala. Pre nanošenja na, najčešće zagrejani, substrat isparenje sadrži najrazličitije čestice kao što su atomi, molekuli, elektroni, joni, klasteri, aerosoli, rastopljene kapi. Obično se unutar komore za laserom izazvano taloženje ostvaruje ultra vakum ali u nekim slučajevima komora može da sadrži nitrogen ili neki drugi inertan gas. U slučaju kada je potrebna oksidacija filma komora se se puni kiseonikom.

S' obzirom da podrazumeva mnoge hemijske, termičke i mehaničke procese i sva moguća agregatna stanja, mehanizam laserom izazvanog taloženja je veoma složen i još uvek nedovoljno teoretski opisan. Međutim, na osnovu velike količine eksperimentalnih podataka koji su dobijeni pod strogo kontrolisanim uslovima moguće je, u meri dovoljnoj za praktičnu primenu, predvideti uticaj osnovnih parametara na rezultat procesa.

Osnovni parametar koji utiče na proces je frekvencija laserskih zraka. Frekvencija lasera je bitna jer para koja se formira na površini materijala delimično apsorbira laserski zrak i time smanjuje njegov dalji uticaj na proces isparavanja. Zbog ovoga je potrebno izvršiti preliminarno ispitivanje uticaja lasera na proces isparavanja za svaki materijal posebno.

U praksi se koristi pulsirajući laserski zrak dužine pulsa koja se kreće u granicama od  $fs$  do  $\mu s$ , frekvencija od nekoliko  $Hz$  do nekoliko stotina  $kHz$ . Zavisno od talasne dužine laserskog zraka mehanizam isparavanja je različit. Tako, u slučaju primene IC laserskih zraka, proces isparavanja ciljanog materijala ima termički karakter. U slučaju UV opsega laserskih zraka osnovnu ulogu u mehanizmu isparavanja igra pucanje hemijskih veza, usled čega se atomi oslobađaju i napuštaju površinu materijala. Tek nakon toga supstanca podleže mehanizmima termičkog isparavanja. U slučaju metala koriste se UV laserski zraci jer se manje reflektuju od metala u odnosu na IC laserske zrake.

Na proces isparavanja takođe utiče dužina laserskog pulsa. Isparavanje je bliže apsolutno termičkom isparavanju ako je dužina pulsa dovoljno velika. U protivnom, ako je dužina pulsa relativno mala, glavnu ulogu u procesu isparavanja preuzima mehanizam pucanja hemijskih veza između čestica materijala. Razlog je što duži puls uzrokuje difuziju toplotne energije kroz strukturu materijala dok kratki omogućava fokusiranje ove energije na usku zonu u okolini mesta uticaja lasera. Laserski pulsevi reda veličine  $fs$  imaju veliki intenzitet tako da su poželjni kao izazivači procesa isparavanja. Sa druge strane pulsevi čije je trajanje reda veličine  $ps$  pokazuju bolje rezultate ako je potreban visok kvalitet isparavanja.

Još jedna varijanta laserom izazvanog taloženja je isparavanje materijala je pod uticajem dva laserska pulsa različitih talasnih dužina. Izeđu pulseva postoji vremensko kašnjenje. Na primer, prvi puls je iz IC spektra i ima zadatak da izvrši predhodno zagrevanje materiala. Drugi puls, veće energije, je iz UV spektra i za nekoliko  $ns$  kasni u odnosu na prvi. Obično se ova dva pulsa

vremenski preklapaju, odnosno kraj prvog pulsa se poklapa sa početkom drugog. Ova tehnika omogućava bolju kontrolu isparavanja i kvaliteta taloženja ciljanog materijala podešavanjem vremenskih i energetske parametara dva laserska snopa.

Tehnika laserski izazvanog taloženja je jednostavna za izvođenje i primeljiva na čitavu klasu materijala kao što su silicijum, germanijum, staklo, oksidi, nitridi, soli, legure, halogenidi, binarni i ternarni složeni materijali i metali. Stihiometrija ciljanog materijala se ne narušava, prilikom prelaska na substrat, tako da struktura kompleksnih materijala može biti potpuno reprodukovana u nataloženom filmu. Relativno malim intenzitetom laserskih zraka može biti postignut veliki intenzitet taloženja a debljina filma može biti jednostavno kontrolisana promenom parametara lasera. Proces je izuzetno čist jer se izvor zračenja nalazi izvan komore za laserom izazvano taloženje. Korišćenjem vrteške, koja nosi veći broj ciljanih materijala, omogućeno je taloženje višeslojnih filmova bez potrebe za otvaranjem komore odnosno narušavanjem atmosfere u kojoj se proces odvija.

Nasuprot prednostima postoje i mane laserom izazvanog taloženja koje utiču na to da ova tehnika, još uvek, nije doživela veću praktičnu primenu. Pre svega plazmeni mlaz, koji nastaje kao rezultat uticaja laserskog zraka na ciljani materijal, strogo je usmeren. Zbog toga film koji se skuplja na površini substrata nije uniforman u pogledu debljine niti u pogledu sastava. Površina nataloženog materijala je reda veličine  $1\text{ cm}^2$  što je malo za većinu industrijskih primena. Plazmeni mlaz sadrži makroskopske kapi istopljenog materijala veličine i do  $10\text{ }\mu\text{m}$  koje smanjuju kvalitet nanešenog filma. Pošto fundamentalni proces laserom izazvanog taloženja nije potpuno opisan upotreba novih materijala podrazumeva period predhodne empirijske optimizacije parametara što poskupljuje proces.

Postoje brojne tehnike za prevazilaženje ovih problema. Relativnim kretanjem ciljanog materijala u odnosu na laserski snop dobija se veći kvalitet isparavanja. Mala površina plazmenog mlaza nadoknađuje se relativnim kretanjem substrata ili primenom lasera sa linijskim fokusom. Koncentracija mikrokapi u plazmenom mlazu umanjuje se primenom mehaničkih filtera na bazi brzine i primenom dva plazmena mlaza u koliziji. Napokon, nedostatak teoretskog modela laserom izazvanog taloženja može biti nadoknađen primenom kompjuterske simulacije ovog procesa. Za verifikaciju ovog modela je, međutim, potrebna velika količina eksperimentalnih podataka dobijenih u strogo kontrolisanim uslovima.

## **Lasersko mikrozavarivanje (re)kristalizacija i planarizacija**

Proizvodnja savremenih elektronskih kola zahteva izradu mikroskopskih spojeva sa hiruškom preciznošću i korišćenje fleksibilnih štampanih ploča čija se debljina kreće od  $50\text{ }\mu\text{m}$  do  $100\text{ }\mu\text{m}$  pa i manje. Takođe je aktuelna minijaturizacija mehatroničkih komponenti radi postizanja veće kompaktnosti i energetske efikasnosti. Neke od ovih komponenti, kao što su senzori pritiska sa

dijafragmom, mehovi i metalne trake, dobijaju se zavarivanjem metalnih listova čija debljina ne prelazi  $100\ \mu\text{m}$ .

Ovako precizne spojeve nije moguće ostvariti klasičnim tehnikama zavarivanja jer, usled velike zone zagrevanja, dolazi do progorevanja materijala zbog njegovih malih dimenzija. Problem je rešen upotrebom laserskog zavarivanja. Zbog mogućnosti da bude fino fokusiran laser može da zagreje usku zonu spoja i na taj način ostvari ekstremno precizan spoj. Osim ove laser, kao sredstvo za zavarivanje, poseduje niz drugih prednosti: a)prilikom zavarivanja nema kontakta; b)minimalno zagrevanje zone vara; c)velika čvrstoća; d)velika brzina zavarivanja; e)velika preciznost; f)primenljivost na materijale koji su teški za zavarivanje standardnim tehnikama; g)kontinualnost procesa; h)dobar odnos između veličine i nosivosti vara; i)pouzdanost.

Za lasersko mikrozavarivanje koriste se IC laserski zraci. U nekim slučajevima predhodno se vrši uklanjanje tankog sloja oksida koji se nalazi na metalu. Oksid apsorbuje više infracrvenih zraka nego metal tako da može biti uklonjen laserskim isparavanjem. Ovo je važna faza jer oksid može ometati prijanjanje vara na podlogu u kom slučaju se dobija var lošeg kvaliteta.

Prilikom laserskog mikrozavarivanja materijal, u zoni zagrevanja, prolazi kroz više procesa kao što su zagrevanje, topljenje i ponovno očvršćavanje. Priroda procesa je veoma kompleksna jer uključuje različite fenomene kao što su provođenje toplote u višefaznom sistemu, dinamiku protoka fluida, dinamiku gasa i efekte plazme. Zbog toga je opsivanje procesa laserskog mikrozavarivanja, koje uzima u obzir sve ove efekte, veoma komplikovano i obično se vrši uprošćavanje, na primer uzimanjem u obzir samo jednog od navedenih fenomena.



Sl.2 Mehatronička komponenta izrađena laserskim mikrozavarivanjem

Pored uobičajenih materijala kao što su čelik i titanijum, laserskim mikrozavarivanjem mogu se spajati visoko reflektivni i provodni materijali kao što su aluminijum, bakar i njihove legure, materijali sa visokom tačkom topljenja kao što su molibden, volfram i tantal kao i termoplastični materijali. Energija potrebna za zavarivanje zavisi od tačke topljenja materijala ali takođe i od reflektivnosti i hrapavosti površine.

(Re) kristalizacija, pod uticajem laserskih zraka, koristi se za transformaciju amornog materijala u njegovo kristalno stanje. Ovaj proces može da ima dva različita mehanizma. Prvi je termički proces, gde se materijal lokalno zagreva uz pomoć lasera, nakon čega se hladi i prelazi u kristalno ili amorfno stanje. Struktura materijala nakon očvršćavanja zavisi od sastava materijala, uslova zagrevanja i hlađenja. Ovakav mehanizam rekristalizacije je uobičajen za amorfni silicijum, germanijum i metale. Postoji i drugačiji mehanizam rekristalizacije karakterističan za halogenidna stakla. Ovaj mehanizam podrazumeva pucanje hemijskih veza pod uticajem laserskih zraka, usled čega klasteri dobijaju više slobode da se reorjentišu i formiraju mikroristalne zone. Ovaj mehanizam najčešće se odvija pod uticajem lasera iz plavog i UV spektra. Za proces rekristalizacije podjednako se upotrebljavaju IC i UV laseri.

Još jedna primena lasera, sa sličnom fizičkom i hemijskom prirodom procesa, je za planarizacija halogenidnih stakala. Ostvaruje se izlaganjem halogenidnih stakala laserskim UV zracima usled čega ona dobijaju ravnu topografiju. Tehnika planarizacije halogenidnih stakala laserskim UV zracima može biti veoma efikasna kada je potrebno redukovati nepoželjnu hrapavost materijala. Najveća primena ove tehnike je u fotolitografiji i kod senzora sa mikrofilmom, naročito onih koji svoju funkciju obavljaju na bazi optičkih fenomena.

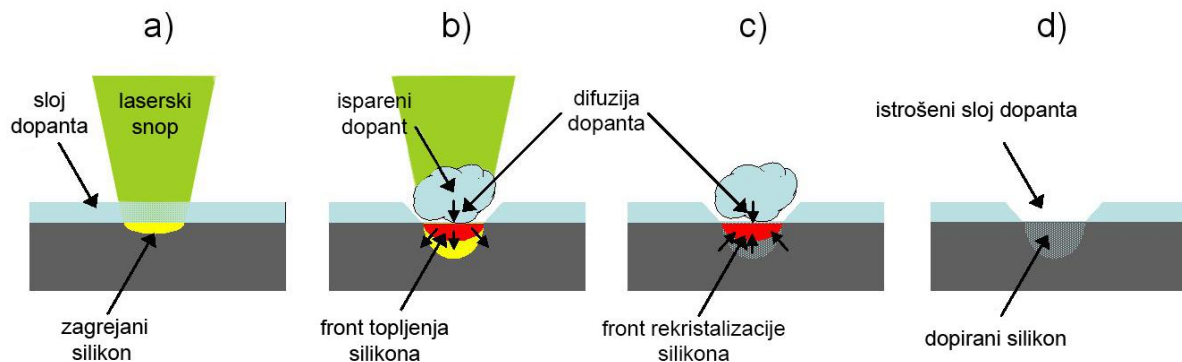
## **Laserom izazvano dopiranje**

Tehnika laserom izazvanog dopiranja predstavlja efikasan način usađivanja atoma jedne supstance, koju nazivamo dopant, u strukturu druge, koju nazivamo podloga ili substrat. Cilj dopiranja je promena električnih ili optičkih karakteristika materijala. Najčešće se koristi u poluprovodničkoj tehnologiji za proizvodnju integrisanih kola, na primer za usađivanje Bora i Fosfora u silicijum. Takođe se može odnositi na difuziju nekih metala kao što je srebro u neka stakla iz grupe halogenidnih.

Proces se odvija tako što pulsirajući laserski snop pogađa substrat usled čega se on zagreva i topi. Pošto se proces odvija u atmosferi dopanta, njegovi atomi prodiru u rastopljeni substrat po principu termičke difuzije. Proces difuzije može biti podspešen primenom električnog polja. Nakon očvršćavanja substrata atomi dopanta ostaju zarobljeni u njemu. Rezultat procesa je substrat sa nečistoćama u vidu atoma dopanta. Koncentracija dopanta nije uniformna, duž poprečnog preseka substrata, već opada po dubini. Iako je koncentracija dopanta vrlo mala ona je dovoljna da promeni električne ili optičke osobine materijala.

U praksi se dopiranje najčešće koristi u poluprovodničkoj tehnologiji za usađivanje atoma nemetala u kristalnu strukturu silicijuma. Odvijanje procesa u atmosferi dopanata obezbeđuje se tako što se na substrat predhodno nanese sloj dopanta čime se dobija poluproizvod namenjen procesu laserskog dopiranja. U zavisnosti od slučaja moguće je postojanje još jednog sloja materijala koji doprinosi procesu dopiranja. Laserskim zrakom vrši se istovremeno zagrevanje sloja dopanta kao i substrata ispod njega. Mehanizam zagrevanja dopanta je direktan,

apsorbcijom laserskih zraka, ili posredan, prenošenjem toplote sa substrata, što zavisi od prozirnosti sloja dopanta. Usled zagrevanja sloj dopanta u zoni delovanja lasera isparava i formira gasnu fazu velike gustine. Površina silicijuma se takođe topi što omogućava difuziju atoma dopanta u tečnu fazu silicijuma. Nakon završetka laserskog pulsa istopljeni silicijum se hladi i rekristalizuje a atomi dopanta ostaju zarobljeni u njegovoj kristalnoj rešetki. Debljina dopanta iznosi nekoliko stotina  $nm$ .



Sl.3 Faze laserskog dopiranja silicijuma sa predhodno nanešenim slojem dopanta: a) Laserski zrak simultano zagreva sloj dopanta i silicijum. b) U zoni uticaja lasera sloj dopanta isparava a silicijum se topi tako da atomi dopanta prodiru u tečni silicijum. c) Laserski zrak prestaje tako da se rastopljeni silicijum hladi i rekristalizuje. d) Na površini silicijuma ostaje dopirani sloj dok je sloj dopanta u zoni uticaja lasera delimično ili potpuno istrošen

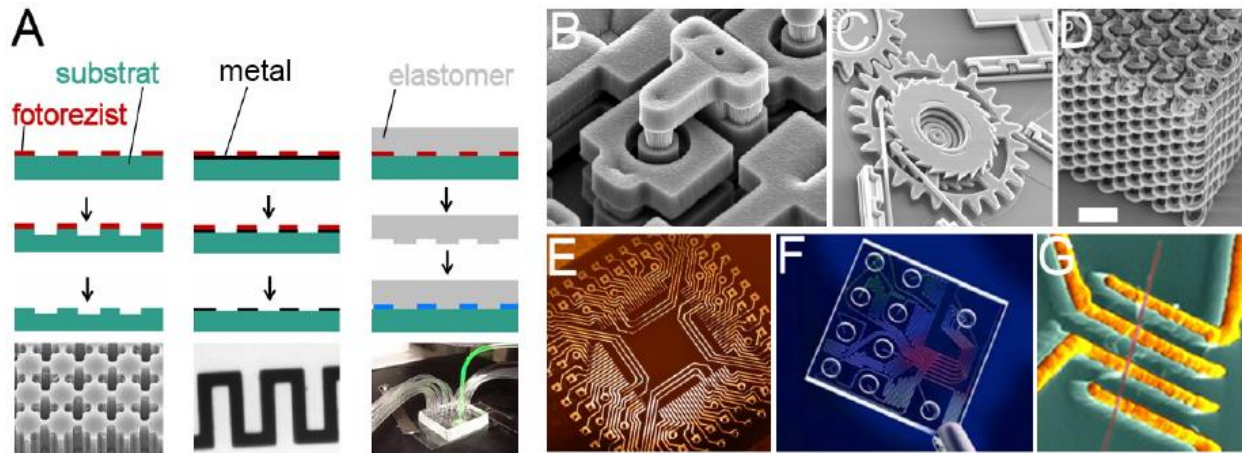
U slučaju primene laserskog dopiranja za proizvodnju poluprovodničkih komponenti substrat može vršiti relativno pomeranje u odnosu na laserski snop. Na ovaj način je moguće rasporediti dopirane zone prema unapred utvrđenom obrascu. Laser može biti veoma precizno fokusiran tako da je ovom tehnikom moguće dobiti visoko integrisana električna kola odštampana na površini substrata. Eksperimentalno je dokazano da silicijum osvetljen IC zracima ima povećanu difuziju dok onaj koji je osvetljen UV zracima pokazuje smanjenu difuziju.

Postoje više mehanizama koji omogućavaju dopiranje halogenida metalima.

## Lasersko mikrostrukturiranje

Lasersko mikrostrukturiranje je izuzetno efikasna tehnika koja omogućava izradu topografskih struktura na različitim podlogama: silicijum, germanijum, silicijum karbid, dijamant, safir, keramika, staklo, polimeri, metali, nitridi, halogenidi, soli, legure, binarni i ternarni složeni materijali... Ova tehnika ima veliku primenu u industriji integrisanih kola, mikromehaničkih sistema, nanotehnologiji itd. Presudnu ulogu ima u razvoju mikrofluidike, tehničke discipline koja ima za cilj proizvodnju takozvane laboratorije na čipu sa sistemima mikrokanala i drugih elemenata namenjenih za manipulaciju izuzetno malim količinama tečnosti. Tehnika

mikrostrukturiranja primanjuje se u odsustvu drugih načina mikroprodukcije ili u slučaju da su raspoložive tehnike skupe. Na primer kada se radi sa higroskopskim materijalima, materijalima koji se teško obrađuju hemijskim putem ili ne mogu biti tretirani plazmom.



S1.4 Primeri mikrostrukture izrađene fotolitografijom: a) Mikrostruktura dobijena u fotoosetljivom sloju može se upotrebiti za graviranje substrata, nanešenih slojeva ili pravljenje otisaka u elastomeru, čime se dobijaju mikrokanali. b), c) Primer MEMS ([www.memx.com](http://www.memx.com)). d) 3D fotonski kristal, e) integrisano kolo, f) Mikrofluidni čip (Montana State University), g) elektrode za eksperimente sa mikrokanalima (Swiss Nanoscience Institute).

Glavna metoda mikrostrukturiranja je optička litografija ili fotolitografija. Ova tehnika se izvodi tako što se izvorom UV svetlosti vrši osvetljavanje fotoosetljive supstance koja je u vidu tankog filma nanešena na substrat. Između izvora svetlosti i substrata postavljena je maska sa odgovarajućim modelom u vidu neprozirnih i prozirnih zona. Ova maska obezbeđuje selektivno osvetljavanje fotoosetljivog filma kako bi se na površini substrata dobila željena mikrostruktura. U osvetljenim zonama filma odvija se proces polimerizacije čime postiže da materijal dobije potpuno nove hemijske i mehaničke karakteristike. Nakon završetka osvetljavanja substrat se izlaže uticaju hemijskih supstanci, slično postupku razvijanju fotografija, nakon čega na substratu ostaje mikrostruktura. Izrađena mikrostruktura može se koristiti neposredno ili za dalje umnožavanje putem graviranja substrata uz pomoć hemijskih supstanci ili pravljenje otisaka u elastomerima. Višekratnim primenjivanjem tehnike mikrostrukturiranja u kombinaciji sa nanošenjem slojeva drugih materijala, na primer metala, mogu se dobiti veoma kompleksne i visokointegrirane mikrostrukture.

Parametri koji utiču na proces laserskog mikrostrukturiranja su talasna dužina lasera, energija pulsa, trajanje pulsa, frekvencija ponavljanja pulseva, modalna struktura (ili generalno distribucija intenziteta unutar preseka laserskog snopa), radna atmosfera. Laseri u IC spektru su manje pogodni kada je neophodna geometrijska tačnost zbog termičkog širenja unutar materijala i nižeg kvaliteta dobijenih linija. Ultravioletni laseri su bolji zbog veće oštine linija i mogućnosti većih energija pulseva u slučaju femto i piko lasera. Osim toga ima nekoliko materijala otpornih



na UV zrake dok metali i neki poluprovodnici reflektuju IC zrake tako da se ne mogu tretirati u ovom spektralnom domenu.

Mikrostrukturiranje može biti postignuto pomeranjem substrata, skretanjem snopa po obrascu koji treba da bude dobijen ili maskiranjem laserskog snopa. U prvom slučaju krucijalna je brzina kretanja substrata i mora biti sinhronizovana sa sekvencom pulsa lasera tako da bude obezbeđen dobar kvalitet margina. U drugom slučaju koristi se maska koja ima prozirne i neprozirne oblasti. Maska može biti postavljena na određenoj udaljenosti od substrata u kom slučaju se koristi projekcija slike na objekat ili direktno na njemu (na primer isparavanjem metala i njegovim graviranjem).

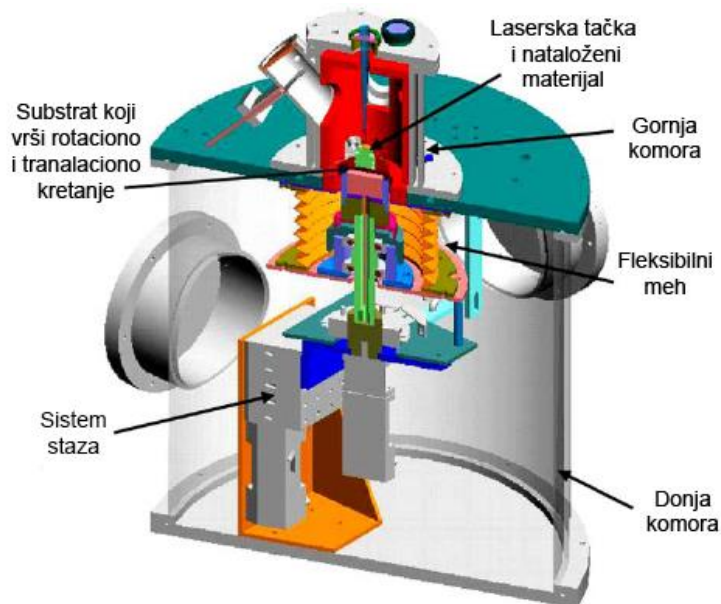
Prednosti ove tehnike su mnogi, a jedna od najbitnijih je da se ovom tehnikom mogu tretirati gotovo svi materijali. Ovo je suva tehnika i njenom primenom ne nanose se nikakve nečistoće na površinu substrata. Postoje ruševine koje padaju na substrat nakon isparavanja materijala ali ruševine su od istog materijala kao i substrat i mogu biti uklonjene duvanjem nitrogena, na primer, ili korišćenjem usisivača za vreme isparavanja. Ovo je tehnika koja ne zagađuje i ekonomski je isplativa. Jedini gubitak su čestice nastale kondenzacijom isparenog materijala.

Dosadašnja iskustva nisu pokazala značajnije nedostatke ove tehnike.

## **Laserski izazvano taloženje hemijskim reakcijama iz parne faze i oksidacija**

Tehnika laserski izazvanog taloženja hemijskim reakcijama iz parne faze (LCVD - Laser assisted chemical vapour deposition) izvedena je iz tehnike taloženja hemijskim reakcijama iz parne faze tako što je umesto peći, kao globalnog izvora zagrevanja, upotrebljen laser kao lokalni izvor zagrevanja. Reaktanti se u inicijalnoj fazi procesa nalaze u parnom ili gasovitom stanju. Pod uticajem lasera inicira se hemijska reakcija između reaktanata. Rezultat ove hemijske reakcije je željena komponente koja se taloži na substrat. Reakcija se može odvijati u celoj komori za taloženje, u kom slučaju laser osvetljava celu komoru, ili lokalno u zoni uticaja lasera na površini substrata. Proces može da rezultuje uklanjanjem (u ovom slučaju proces se naziva fotograviranje) ili taloženjem materijala, promenom sastava ili promenom faze na površini uzorka i odvija se za sve vreme uticaja lasera.

Jedna od najbitnijih osobina tehnike taloženja hemijskim reakcijama iz parne faze je mogućnost selektivnost procesa. Pošto se hemijska reakcija odvija samo u zoni uticaja lasera i za vreme njegovog delovanja moguće je precizno kontrolisati proces i tako dobiti složene mikrostrukture bez upotrebe maski. U poređenju sa ostalim tehnikama mikroprocesiranja, ova tehnika pokazuje posebne prednosti pri izradi trodimenzionalnih objekata. Vršanjem kompleksnih linearnih i rotacionih pomeranja moguće je dobiti složene mikrostrukture, kao što su kalemovi ili druge mikrostrukture koje su teške za realizaciju uobičajenim tehnikama mikroprocesiranja.



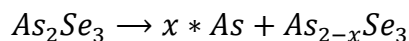
Sl.5 Poprečni presek LCVD reaktora

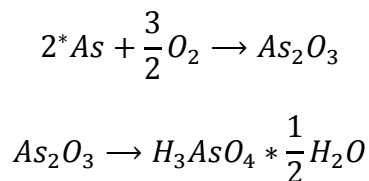
Postoje dva mehanizma uticaja lasera na hemijsku reakciju. Prvi je termički proces (fototermički), kod koga je reakcija pokrenuta lokalnim povećanjem temperature nastalim pod uticajem laserskog snopa. Drugi mehanizam je, u zavisnosti od primenjenih reagenasa, kidanje hemijskih veza ili aktivacioni mehanizam. U ovom slučaju proces se naziva fotolitički. Pošto u drugom slučaju nema termičke aktivacije gasne faze, ovaj tip može biti korišćen za taloženje materijala na nižim temperaturama ili za nanošenje nano čestica heterogeno iz gasne faze.

Za fototermičke reakcije koriste se IC laseri, dok se UV laseri koriste za reakciju iniciranu pucanjem veza. Drugi slučaj je mnogo selektivniji jer je, na primer, moguće tretirati samo izotop željenog tipa. Obično je rezultujuća struktura materijala u slučaju UV lasera prah. Na primer, počev od ferocena ( $\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$ ) moguće je dobiti čestice gvožđa pokrivena slojem grafita. U zavisnosti od primenjenih uslova prečnih dobijenih objekata kreće se od nekoliko nm do nekoliko desetina nm.

Specijalni slučaj optički aktivirane hemijske reakcije je proces fotooksidacije. Oksidacija se postiže osvetljavanjem površine substrata laserskim zracima simultano sa izlaganjem atmosferi kiseonika. Rezultujući sloj kiseonika je veoma tanak (nekoliko desetina *nm*). Prednost ove tehnike je što se proces oksidacije odvija na sobnoj temperaturi pa je temperaturni stres materijala minimalan.

Primer oksidacije u uslovima vlažne atmosfere je oksidacija halkogenida arsenik triselenida ( $\text{As}_2\text{Se}_3$ ). U atmosferi koja sadrži vlažnost dešava se hidroliza u mokrom medijumu pod uticajem UV zračenja. Reakcija se odvija prema hemijskoj jednačini:





Drugim rečima, UV foton kida veze u  $As_2Se_3$  i rezultujući  $As$  reaguje sa kiseonikom formirajući  $As_2O_3$ . Nakon toga se dešava hidroliza i formira se ortoarsenitna kiselina. UV izvor ima intenzitet od  $1.616 \text{ mW/cm}^2$  a vlažnost je 95%. Drugi primeri su formiranje poroznog silicijuma laserskom porozifikacijom ili fotograviranje silicijuma u rastvoru kiseline.

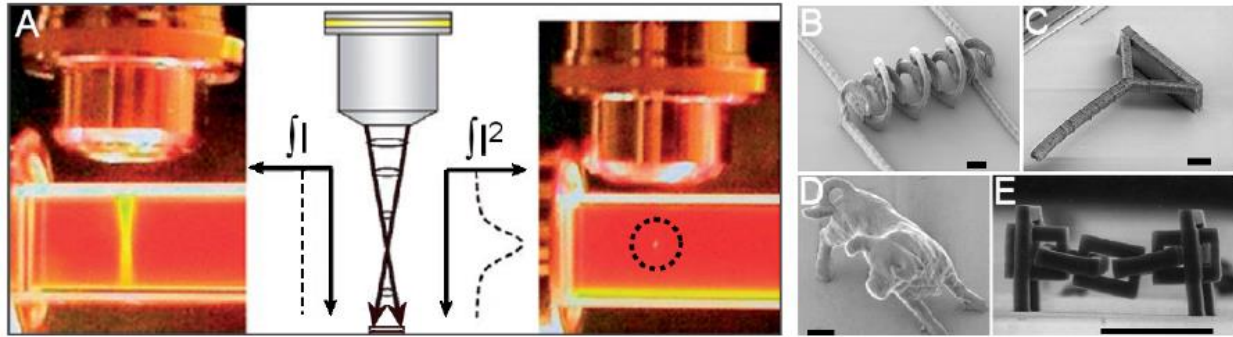
Prednosti tehnike taloženje hemijskim reakcijama iz parne faze su brojni, specijalno u slučaju UV lasera. Najbitnije su: selektivnost, mogućnost nanošenja izotopno čistih supstanci i, u slučaju primene UV laserskih zraka, nema termičkog efekta na substrat, čime je ostvaren manji termički stres materijala. Ova tehnika je posebno primenljiva za proizvodnju nanopraha.

Glavna mana ovog procesa je što je limitiran samo na površinu substrata. Osim toga, promena sastava reakcione komore može dovesti do parazitske laserske absorpcije ili rasturanja koje negativno utiče na reakciju.

## Proces multifotonske absorpcije

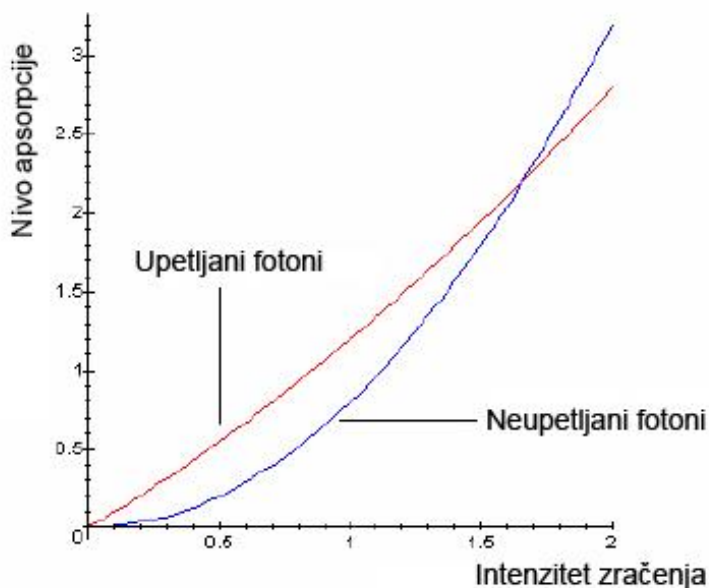
Ovo je tehnika brzog kreiranja prototipa koja koristi dvofotonsku absorpciju za polimerizaciju specijalnih smola. Kod višefotonske absorpcije proces se inicira samo kada fotoosetljivi materijal istovremeno absorbuje više od jednog fotona (dva ili tri). Osnovna razlika u odnosu na jednofotonsku absorpciju je to što je višefotonska absorpcija nelinearan proces. Brzina polimerizacije, slično hemijskim reakcijama u kojima istovremeno reaguju više supstanci, proporcionalna je  $n$ -tom stepenu intenzitetu zračenja ( $v_p \propto I_0^n$ ).

Prednost nelinearnog odziva je u većoj lokaliziranosti pobuđivanja polimerizacije, što jasno pokazuje poređenje jedno i dvofotonske fluorescencije na slici 6a. Duž poprečnog preseka materijala određene debljine homogeno su raspoređeni fluorescentni markeri čime je obezbeđena vizuelna detekcija absorpcije. Kod jednofotonske absorpcije brzina absorpcije na proizvoljnoj dubini zavisna od proizvoda  $I \cdot S$ , intenziteta svetlosti  $I$  i poprečnog preseka snopa  $S$ , što je konstantna veličina. Kod dvofotonske absorpcije zavisnost je jednaka  $I^2 \cdot S$  pa je brzina absorpcije obrnuto srazmerna osvetljenoj površini. Zbog toga je ona najveća najveća u fokusu laserskog snopa snopa. Ovo se objašnjava činjenicom da je verovatnoća istovremene absorpcije dva fotona daleko manja od verovatnoće absorpcije jednog fotona pa su kod dvofotonske absorpcije potrebni veliki intenziteti laserskih zraka. Ovakvi intenziteti laserskog zračenja postižu se primenom pulsirajućih lasera.



S1.6 Fluorescencija u debelim slojevima materijala osvetljenih laserom kroz mikroskopski objektiv. U slučaju jednofotonske apsorpcije (slika (a) levo) fluorescencija je, po dubini, konstantna. U slučaju dvofotonske apsorpcije (slika (a) desno) zavisnost apsorpcije od intenziteta je nelinearna i veća je za veći intenzitet. Fluorescencija se u konkretnom slučaju odvija samo u žiži snopa (okruženo isprekidanom crtom) što omogućava kontrolisanje treće dimezije. (b-e) primeri trodimenzionalnih mikrostruktura dobijenih postupkom dvofotonske apsorpcije. Kod dve spirale crna crta odgovara dužini od  $10 \mu m$ , kod bika  $2 \mu m$  i kod lanca  $100 \mu m$ .

Postoje dve tehnike dobijanja trodimenzionalnih mikrostruktura. Prvi je fokusiranjem laserskog snopa, pomoću široko ugaonog objektiva, na deo sloj fotoosetljive smole. Na ovaj način dobija se tačka u fokusu laserskog zraka tj. zoni fotoreakcije (obično fotopolimerizacija ali mogu biti i druge hemijske reakcije). U cilju dobijanja trodimenzionalne mikrostrukture tačka fokusa kreće se, prema utvrđenoj putanji, u pravcu svih prostornih kordinata. Produktivnost ove tehnike je mala, s' obzirom na serijski način rada. Drugi način je korišćenjem kompjuterski generisanih difrakcionih maski (preciznije holografskih maski) koje obezbeđuju željeni obrazac raspodele intenziteta laserske svetlosti na većoj površini. U ovom slučaju, svi delovi strukture prave se paralelno ili je potrebno pomeranje samo u z-smeru.



S1.7 Nivo dvofotonske apsorpcije u zavisnosti od intenziteta laserskog zračenja za slučaj upetljanih i neupetljanih fotona

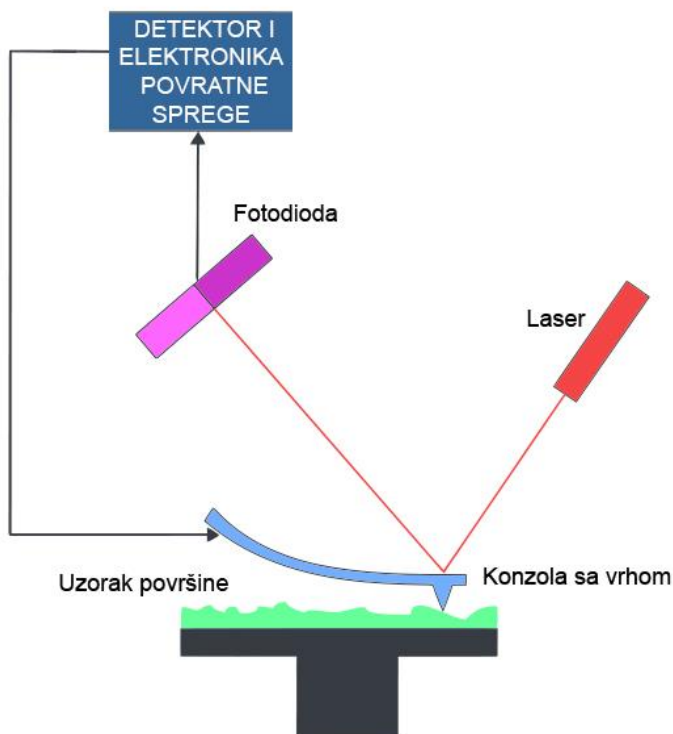
Sa stanovišta primene laserskih zraka postoje dve tipa dvofotonske apsorpcije. Prvi, već opisan, podrazumeva direktnu primenu laserskog zračenja a verovatnoća absorpcije raste sa kvadratom njegovog intenziteta. Kod drugog tipa dvofotonske apsorpcije primenjuju se takozvani upetljani zraci. Pomoću optičkih elemenata vrši se razdvajanje zraka koji se nakon prolaska kroz različite optičke putanje ponovo spajaju na fotoosetljivoj materiji. Na ovaj način povećana je verovatnoća dvofotonske apsorpcije pa je njena zavisnost od intenziteta laserskog zračenja približno linearna (sa malim kvadratnim članom). Ova tehnika omogućava kontrolu procesa polimerizacije u manjim oblastima nego kod klasične dvofotonske apsorpcije.

Proces dvofotonske polimerizacije, u odnosu na klasične tehnike, ima prednosti u većoj rezoluciji i mogućnosti trodimenzionalnog strukturiranja a mane u maloj brzini i zahtevnoj velikoj snazi pulsirajućih lasera.

## Netehnološke primene lasera

Osim tehnoloških primena lasera, za proizvodnju mikrosistema, postoje i netehnološke primene koje podrazumevaju karakterizaciju i pobuđivanje ovih struktura.

U pogledu karakterizacije postoje nekoliko tehnika: skretanje snopa, laserska interferometrija, laserska optička heteroidnost, laserska vibrometrija zasnovana na Doplerovom efektu.



Sl.8 Blok dijagram mikroskopa atomskih sila koji radi na principu skretanja laserskog snopa

Skretanje snopa koristi se kada mikrosistemi vrše rotaciono kretanje pod dejstvom nekog uticaja. Merenjem ugaonog skretanja može biti određen ugao rotacije odnosno odziv mikrostrukture na taj uticaj. Značajna primena ove metode je mikroskopija atomskih sila kod koje konzola, koja detektuje topografiju površine, skreće ili rotira zavisno od toga na šta na površini uzorka naiđe. Od konzole se odbija laserski zrak i detektuje pomoću fotodetektora (niza fotodioda). Tako se na posredan način detektuje pomeranje konzole.

Laserska interferometrija uglavnom se koristi za određivanje translacionog kretanja sa rezolucijom ispod  $nm$ . Ova tehnika posebno je korisna u slučaju mikromostova i mikromembrana kod kojih je osnovna komponenta kretanja translaciona. I u ovom slučaju se dobija odziv mikrostrukture na stimulans. Ova tehnika može biti ravnopravno korišćena za izučavanje statičkog i dinamičkog odziva mikrosistema.

Laserska optička heteroidnost kao i laserska vibrometrija zasnovana na Doplerovom efektu koriste se za merenje dinamičkog odziva mikrosistema. Cilj je određivanje amplitude kretanja, frekvencije oscilovanja, fazne razlike između stimulanisa i odziva, trenutne brzine. Kod ovih primena lasera razmatra se translaciono kretanje.

Za pobuđivanje mikrostrukture moguće je koristiti silu koja potiče od pritiska svetlosti. Na primer, pritisak svetlosti ultra kratkog pulsa lasera koristi se za pobuđivanje mehaničkih vibracija kružne mikromembrane. Dužina laserskog pulsa pri tome mora biti dovoljno mala u poređenju sa vremenom odziva (i sopstvenim frekvencijama mikromembrane) tako da ovaj puls možemo posmatrati kao idealan Dirakov puls. Nakon pobuđivanja moguće je očitavanje vibracija membrane pomoću optičkih ili električnih senzora.

Prednosti primene laserskog snopa za pobuđivanje mikrostrukture su: a) to je bezkontaktna tehnika; b) jednostavna je i ne zahteva elektrode ili druge elemente koji komplikuju aparaturu; c) pulsevi su dovoljno kratki da se mogu smatrati idealnim Dirakovim pulsevima; d) intenzitet svetlosti može biti precizno kontrolisan tako da obezbedi potreban efekat

## Literatura

1. G. Moagar-Poladian<sup>(1)</sup>, Z. Illyefalvi-Vitez<sup>(2)</sup>, B. Balogh<sup>(2)</sup>, D. Ulieru<sup>(3)</sup>, A. Coraci<sup>(1)</sup> – *Laser Applications in the Field of MEMS*, <sup>(1)</sup>IMT-Bucharest, Str. Erou Iancu Nicolae 126A, Bucharest, Romania, <sup>(2)</sup>Budapest University of Technology and Economics, Goldman t. 3, H-1111 Budapest, Hungary, <sup>(3)</sup>S.C. ROMES S.A., Str. Erou Iancu Nicolae 126A, Bucharest, Romania
2. H.U. Krebs<sup>(1)</sup>, Martin Weisheit<sup>(1)</sup>, J. Faupel<sup>(1)</sup>, E. Süske<sup>(1)</sup>, T. Scharf<sup>(1)</sup>, C. Fuhse<sup>(1)</sup>, M. Sötrmer<sup>(1,2)</sup>, K. Sturm<sup>(1,3)</sup>, M. Seibt<sup>(4)</sup>, H. Kijewski<sup>(5)</sup>, D. Nelke<sup>(6)</sup>, E. Panchenko<sup>(6)</sup>, M. Buback<sup>(6)</sup> - *Pulsed Laser Deposition (PLD) - a Versatile Thin Film Technique*, <sup>(1)</sup>Institut für Materialphysik, Universität Göttingen, Hospitalstra\_e 3-7, 37073 Göttingen, Germany, <sup>(2)</sup>

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Abt. WTB, Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht, Germany, <sup>(3)</sup>Nano\_lm Technologie GmbH, Anna-Vanderhoeck-Ring 5, 37081 Göttingen, <sup>(4)</sup>IV. Physikalisches Institut, Universität Göttingen, Bunsenstr\_ e 13, 37073 Göttingen, Germany, <sup>(5)</sup>Institut für Rechtsmedizin, Universität Göttingen, Windausweg 2, 37073 Göttingen, Germany, <sup>(6)</sup>Institut für Physikalische Chemie, Universit□at Göttingen, Tammannstra\_e 6, 37077 Göttingen, Germany

3. M. F. Ametowobla - *Characterization of a Laser Doping Process for Crystalline Silicon Solar Cells*, Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.Ing.) genehmigte Abhandlung, Institut für Physikalische Elektronik der Universität Stuttgart 2010
4. Blaž Kavčič - *Lasersko mikrostrukturiranje z ločljivostjo onkraj uklonske limite*, Univerza v Ljubljani fakulteta za matematika in fiziko oddelek za fiziko, 2009
5. S. N. Bondi<sup>(1)</sup>, W. J. Lackey<sup>(1)</sup>, R. W. Johnson<sup>(1)</sup>, X. Wang<sup>(2)</sup>, Z. L. Wang<sup>(2)</sup> -*Laser assisted chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes and their characterizatio*, <sup>(1)</sup>George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, United States, <sup>(2)</sup>School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, United States