

LASERSKA LITOGRAFIJA MERILNIH LETEV: NAPRAVA ZA DIREKTNI LASERSKI VPIS RASTRA

Samo Kopač, Janez Pirš, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 61111 Ljubljana

Laser Litography of Graduations: the Direct Laser Writing Device

ABSTRACT

Optical encoders are the most commonly used position transducers in various precision mechanical equipment where higher and higher accuracy is required. A new direct laser writing of graduations for optical encoders in thin Cr films on glass substrates increases the accuracy of measurements with optical encoders comparing with the conventional methods of making the graduations. The direct laser writing device for manufacturing the graduations is described and the calculation of optical parameters for this device is given. The accuracy of graduations made by direct laser writing depends primarily on the accuracy of the mechanical system and the interferometric position measurements of the graduation lines. We present the measurements of the mechanical system and the estimation of the inaccuracy of the graduation due to the interferometric measurements. The results confirm that the direct laser written graduations meet the requirements for the application in optical encoders.

POVZETEK

Optični dajalniki pomikov (ODP) se vse bolj uporabljajo pri natančnih mehanskih pripravah. Zaradi tega se postavljajo vse hujše zahteve po natančnosti meritev z ODP. Nov način izdelave ODP z direktnim laserskim vpisom rastra v tanko plast kroma na stekleni podlagi povečuje natančnost meritev z ODP za skoraj red velikosti v primeri s konvencionalnimi metodami izdelave merilnih rastrov. Opisana je naprava za lasersko mikrolitografijo merilnih letev in predstavljen izračun za določitev osnovnih optičnih parametrov te naprave. Točnost vpisanih merilnih rastrov je odvisna od mehanskega sistema in meritve položaja obdelovanca z laserskim interferometrom. Podane so meritve točnosti mehanskega sistema in ocena napak meritev položaja črtic z laserskim interferometrom. Rezultati meritev lasersko vpisanih rastrov potrjujejo primernost za uporabo v ODP.

1 UVOD

Meritve dolžin in premikov v strojni industriji (stružnice, rezkarji, roboti,...) zahtevajo zaradi robustnosti opreme, točnosti meritev in avtomatizacije proizvodnje specifične merilne naprave, ki morajo ustrezati uporabi v takih zahtevnih razmerah. V ta namen so bile razvite posebne optoelektronske naprave, t.i. optični dajalniki pomikov (ODP), ki po natančnosti in robustnosti dobro ustrezajo zahtevam mehanskih delavnic. Izvedbe optičnih dajalnikov pomikov so različne /1/. Z njimi lahko merimo razdalje (linearni ODP) ali kote (rotacijski ODP), meritve so lahko absolutne (glede na stalno izhodišče) ali relativne (glede na poljubno izbrano izhodišče). Zaradi svojih lastnosti so ODP postali nepogrešljivi sestavni elementi vseh avtomatskih obdelovalnih strojev (CNC stroji) in robotov ter predstavljajo kompromis med točnostjo, enostavnostjo, zanesljivostjo in ceno.

Osnovni sestavni element ODP je merilna letva. To je podolgovata steklena plošča, na katero je nparjena tanka plast (~100 nm) kroma. V plast je izjedkan raster, pri katerem si zaporedoma sledijo enaki pasovi kroma in praznin. Nad plastjo kroma je vgrajeno čitalno steklo z enakim rastrom tako, da drsi nad letvijo. Skozi sklop letve in čitalnega stekla svetimo in detektiramo prepuščeno svetlobo. S štetjem svetlobnih sunkov lahko

določimo premik čitalnega stekla. Merilne letve izdelujemo s fotolitografijo. Masko z rastrom preslikamo na stekleno ploščo s kromom in fotoobčutljivo snovjo. Osvetljene dele fotoobčutljive snovi odstranimo z razvijalcem, krom, ki ostane spodaj, pa odjedkamo s kislino. Tako izdelano merilno letvo vgradimo skupaj s čitalcem v kovinski nosilec. Postopek izdelave ODP je večstopenjski, v vsaki stopnji izdelave pridelamo napake, ki kasneje vplivajo na natančnost meritve pomika. Pri najboljših ODP, narejenih po tem postopku, proizvajalci ugotavljajo točnost $\sim \pm 2 \mu\text{m/m}$. Zaradi vse večjega povpraševanja po točnejših ODP proizvajalci izboljšujejo točnost na različne načine. V splošnem lahko rečemo, da se natančnost meritve z ODP poveča, če vsebuje postopek izdelave merilnih letev manj stopenj. Najboljši je seveda enostopenjski postopek. Eno izmed možnih izvedb enostopenjskega postopka bomo opisali v tem prispevku.

Raster lahko vpišemo v tanko plast materiala na podlagi tudi z lasersko svetlobo /2/. Obdelava tankih plasti z močnimi, kratkočasovnimi laserskimi sunki je tehnološko področje, ki je zlasti zanimivo za zapis informacij z veliko gostoto /3,4/. Tu so informacije vpisane v tanko plast materiala na nosilni podlagi v obliki mikroluknjic premera $< 1 \mu\text{m}$. Raziskave izdelave mikroluknjic za potrebe optičnih diskov so predvsem usmerjene v razvoj tankih plasti materialov z nizkim tališčem (Bi, Te, Te zlitine,...) /5,6,7/. To omogoča vpis informacij s sorazmerno šibkimi polprevodniškimi laserji. Kromova plast pa ima relativno visoko tališče in vrelišče, zato smo za lasersko mikrolitografijo merilnih letev uporabili sunkovni Nd-YAG laser /2/. Zaradi specifičnih dimenzij, ki se zahtevajo pri merilnih rastrih, je treba zbrati laserski snop v obliko črtice, ki ima širino nekaj μm in dolžino reda velikosti mm. To smo dosegli s kombinacijo cilindričnega in sferičnega objektiva. V gorišče sistema postavimo kromovo plast merilne letve. Laserski snop lokalno raztali kromovo plast v obliki črtice merilnega rastra. Na ta način polno izkoristimo svetlobno energijo laserskega sunka. Vsak sunek pomeni na novo generirano črtico. Z mehanskim pozicionirnim sistemom (slika 1), katerega premik kontroliramo z laserskim interferometrom, zagotovimo dovolj natančno pozicioniranje črtic v rastru. Opisani način vpisovanja merilnega rastra je enostopenjski, saj ga lahko vpisujemo v obdelovance, ki so že vgrajeni v kovinski nosilec in se s tem izognemo tudi napakam pri montaži. Ocena napak in meritve kažejo, da je natančnost meritev s tako izdelanimi merilnimi letvami $\pm 0.4 \mu\text{m/m}$, kar je skoraj za red velikosti boljše od standardnih ODP. Prav tako je izdelava merilnih letev z lasersko mikrolitografijo hitrejša kot pa s fotolitografijo. Meter dolgo merilno letvo lahko izdelamo prej kot v dveh minutah.

2 OPTIČNI SISTEM

Izhodni snop svetlobe iz obdelovalnega laserja nima pravih dimenzij niti dovolj velike gostote svetlobnega toka, da bi general luknjico v tanko plast kroma na

merilni letvi. Snop svetlobe moramo najprej zbrati v ustrezno dimenzijo z optičnim sistemom. Na sliki 1 je prikazana shema naprave za lasersko mikrolitografijo. Optični sistem je sestavljen iz teleskopa, ki snop razširi, in cilindričnega ter sferičnega objektiv. V gorišču sferičnega objektiv je gostota svetlobnega toka dovolj velika za generiranje luknjice v krom. Obenem kombinacija obeh objektiv oblikuje presek svetlobnega snopa v črtico z ustrezno dimenzijo. Obdelovalni laser je sunkovni monomodni Nd-YAG, ki seva svetlobo z valovno dolžino $\lambda = 1064 \text{ nm}$ v sunkih dolgih $\approx 100 \text{ ns}$. Izhodni premer laserskega snopa je 0.7 mm , divergenca pa 2.5 mrad . Laserski snop razširimo s teleskopom približno za faktor 5. Za teleskopom je postavljen nastavljivi atenuator, s katerim izberemo energijo sunka, ki je potrebna za vpis posamezne črtice v rastru. Površino, ki jo obdelujemo pri laserski mikrolitografiji, moramo zelo natančno postaviti v gorišče objektiv in jo moramo med celotnim vpisom rastra neprestano držati natančno v goriščni ravnini. Za to poskrbi autofokusirni sistem /8/. Za atenuatorjem in delom optike autofokusirnega sistema je postavljen cilindrični objektiv z goriščno razdaljo 10 mm . Sferični objektiv, ki stoji za cilindričnim, dokončno oblikuje laserski snop tako, da ima v gorišču obliko črtice. Če hočemo določiti parametre optičnih elementov (goriščne razdalje in numerične aperture objektivov, povečavo teleskopa, ...), moramo poznati osnovne lastnosti laserskih snopov, pri čemer izhajamo iz zahtev za širino in dolžino črtic rastrov, to je dolžina $\sim 10 \text{ mm}$ in širina $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ ter iz znane širine laserskega snopa na izhodu iz laserja $2w = 0.7 \text{ mm}$. Za boljše razumevanje optičnega sistema in oceno zmožnosti laserske litografije bomo predstavili obliko laserskih snopov in princip oblikovanja njihovega preseka z lečami.

Svetlobo radi opisujemo z ravnimi valovi. Ti so v smeri, pravokotni na smer razširjanja, neomejeni. To je matematična idealizacija problema, ki v primeru laserskih snopov ni najboljša. Laserski snopi so namreč omejeni, zato je treba upoštevati tudi uklonske pojave. Pri reševanju valovne enačbe /9/ za opis laserskih snopov:

$$\nabla^2 \vec{E} + k\vec{E} = 0, \quad k = \frac{n\omega}{c} = n \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1)$$

(\vec{E} je električno polje, k velikost valovnega vektorja, n lomni količnik, c hitrost svetlobe v vakuumu in λ valovna dolžina) nas posebej zanimajo cilindrično simetrični snopi, ki imajo največjo gostoto električnega polja na sredini. Take rešitve imajo Gaussovo obliko:

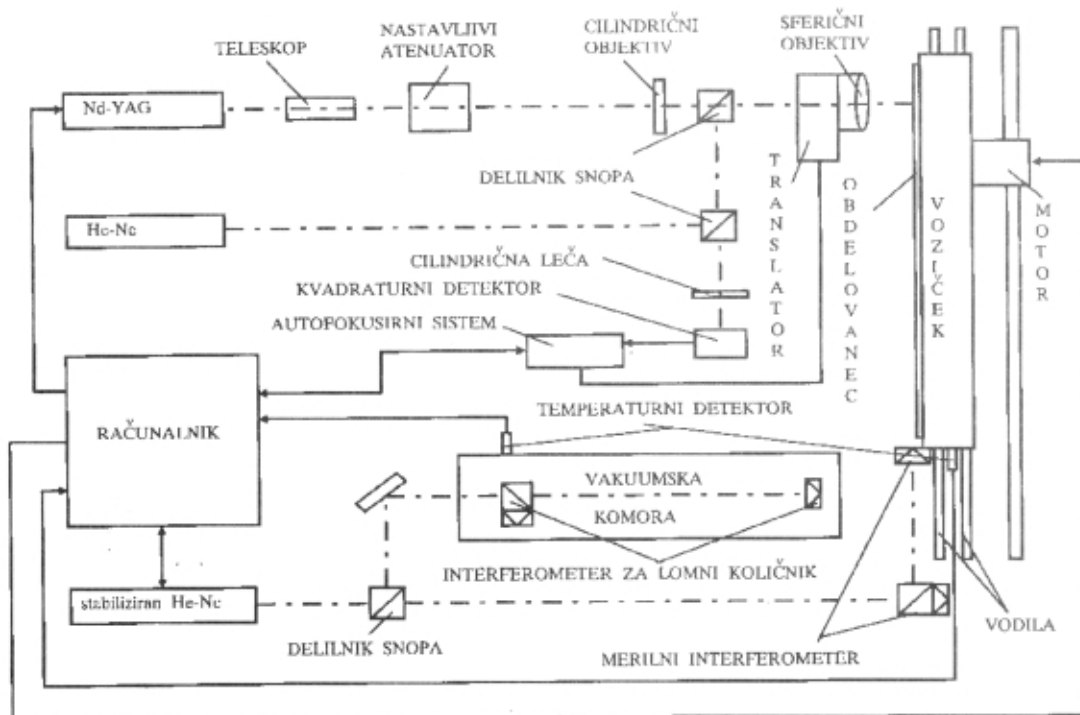
$$E = E_0 \frac{w_0}{w} e^{i(kz - \eta(z))} e^{-\frac{kr^2}{2q(z)}} \quad (2)$$

Omejili smo se na eno polarizacijo (E). V enačbi 2 sta r in z cilindrični koordinati,

$$w - \text{polmer snopa: } w^2 = w_0^2 \left(1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right),$$

w_0 - najožji del snopa pri $z = 0$ (grlo snopa), z_0 - razdalja, pri kateri se snop razširi za faktor $\sqrt{2}$ meja bližnjega

$$\text{polja: } z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda},$$



Slika 1. Shema naprave za direktni laserski vpis rastra

q - kompleksna ukrivljenost valovne fronte: $q = z - iz_0$,

oziroma: $\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{2i}{kw^2}$,

R - krivinski radij valovne fronte v snopu:

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right)$$

in $\eta(z)$ - dodatni fazni faktor osnovnega Gaussovega

snopa: $\eta(z) = \arctg\left(\frac{z_0}{z}\right)$.

Rešitev imenujemo osnovni Gaussov snop (TEM₀₀) in je popolnoma določena s položajem ravnine $z = 0$ in polmerom snopa v grlu w_0 . Prečni presek snopa ima Gaussovo obliko, polmer snopa pa se spreminja v smeri potovanja snopa hiperbolično, torej divergira. Proizvajalci laserjev vedno podajajo tudi podatek za divergenco

laserskega snopa $\phi = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ v daljnem polju, ki med drugim tudi pove, kako dober osnovni Gaussov snop seva laser. Seveda vsi laserji ne dajejo osnovnih Gaussovih snopov in je za to treba posebej poskrbeti.

Pri napravi za lasersko litografijo nas seveda zanima tudi, v kako veliko točko se z objektivom zberejo laserski snopi. Osnovni Gaussovi snopi (t.i. monomodni laserji) se dajo zbrati v manjšo točko, kot pa če uporabljamo t.i. multimodne laserje. Zbiranje laserskega snopa lahko obravnavamo podobno kot preslikave z lečami v geometrijski optiki. Leča preslika sferični val s krivinskim radijem R_1 v sferični val s krivinskim radijem R_2

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{f}. \quad (3)$$

Enako velja za kompleksni ukrivljenosti, saj je premer snopa na levi in desni strani tanke leče enak:

$$\frac{1}{q_1} - \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

Iz zgornje enačbe lahko izračunamo položaj grla po preslikavi in premer laserskega snopa v grlu. Zanimiv bo primer, ko je leča postavljena v daljnje polje snopa. Polmer preslikanega snopa v grlu je tedaj:

$$w_2 = \frac{\lambda f}{\pi w}, \quad (5)$$

pri čemer je w polmer vpadnega snopa na leči. Račun nam pokaže, da se laserskih snopov ne da zbrati v poljubno majhno točko, ampak je minimalna dimenzija sorazmerna z valovno dolžino svetlobe, goriščno razdaljo zbiralnega objektiva in obratno sorazmerna s polmerom vpadnega snopa na leči. S spreminjanjem širine vpadnega snopa na sferičnem objektivu lahko torej določimo širino črtic v rastru. Zato je pred zbiralnim objektivom nameščen teleskop.

Na podoben način lahko opišemo tudi kombinacijo cilindričnega in sferičnega objektiva (slika 7), ki je

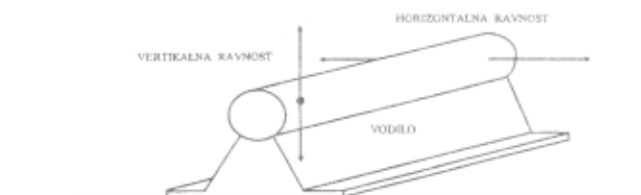
uporabljena pri napravi za lasersko litografijo merilnih letev. Cilindrični objektiv je tak, da ima v enem preseku goriščno razdaljo ∞ (plan paralelen), v drugem pa končno (f_1). V prvem preseku cilindrični objektiv ne prizadene snopa, zato nanj deluje le sferični objektiv. Ta preslika laserski snop v ozko točko (enačba 5). V drugem preseku imamo kombinacijo dveh leč z goriščnima razdaljama f_1 in f . Premer snopa na mestu grla iz prejšnjega preseka je enak:

$$w_3 = w_1 \frac{f}{f_1}, \quad (6)$$

kar je znan rezultat iz geometrijske optike. S kombinacijo cilindričnega in sferičnega objektiva lahko preslikamo laserski snop z okroglim presekom z vpadno širino w_1 v snop s presekom v obliki elipse z glavnima osemama w_3 in w_2 . V gorišču sferičnega objektiva je dolga os elipse v razmerju gorišč obeh objektivov glede na vpadni snop (6). Kratka os elipse pa je odvisna od razmerja širine vpadnega snopa in goriščne razdalje sferičnega objektiva (5). Lahko rečemo, da sferični objektiv določa širino črtice, razmerje goriščnih razdalj sferičnega in cilindričnega objektiva pa dolžino črtic v rastru.

3 MEHANSKI SISTEM

Za izdelavo merilnih letev je poleg vpisa posameznih črtic pomembno tudi, kako vpisati njihovo pravilno zaporedje. Pri napravi za lasersko mikrolitografijo to omogoča kombinacija mehanskega in interferometričnega sistema. Mehanski sistem je izveden tako, da omogoča togo pritrjevanje obdelovanca glede na voziček. Voziček, na katerem je obdelovanec, se giblje v ravnini, pravokotni na laserski snop. Za pogon vozička uporabljamo translator s pomikom 1200 mm, ki se premika enakomerno z nastavljivo hitrostjo. Običajno je hitrost okrog 1 cm/s. Na vrhu vozička je pritrjena aluminijasta plošča, ki je ravno brušena $\pm 6 \mu\text{m}$ in rabi za



Slika 2. Definicija horizontalne in vertikalne ravnosti vodil

pritrjevanje obdelovanca. Obdelovanec pritrdimo tako, da skozi luknjice v Al nosilcu izčrpamo zrak in s tem ustvarimo podtlak med obdelovancem in nosilcem. Premik vozička merimo z Zeemanskim laserskim interferometrom firme Hewlett Packard 5528A. Ker se voziček giblje enakomerno, vpisujemo črtice, ne da bi ga ustavljali. Interferometer stalno meri položaj vozička

in preko računalnika ob programiranih položajih proži obdelovalni Nd-YAG laser, ki ob vsaki sprožitvi generira v obdelovanec črtico. Pot vozička, ki jo naredi med samim laserskim sunkom ($1\text{ cm/s} \times 100\text{ ns} = 1\text{ nm}$), je majhna v primerjavi s širino črtice ($\approx 5\ \mu\text{m}$), tako da premikanje obdelovanca med vpisom ne vpliva na kvaliteto rastra. Poleg tega je postopek zaradi enakomernega gibanja vozička precej hitrejši, kot pa bi bil, če bi voziček pri vsakem vpisu ustavili.

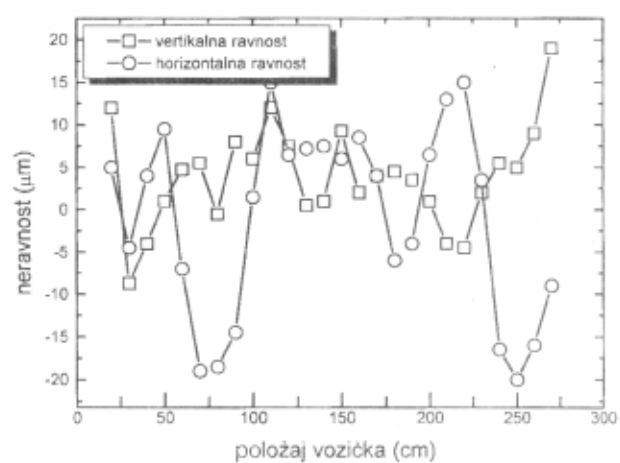
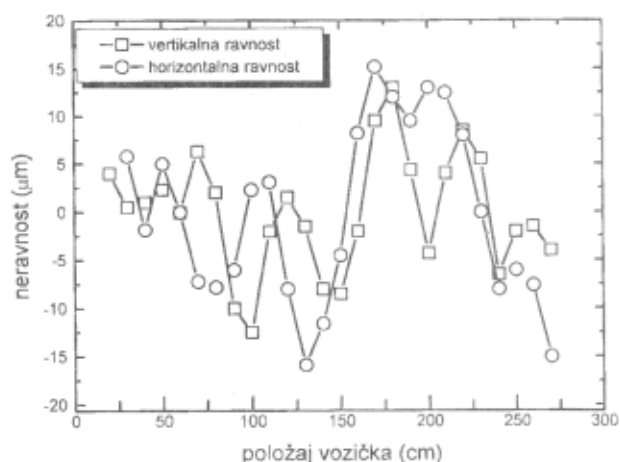
Kot bomo videli kasneje, vpliva na natančnost meritve položaja črtic z interferometrom tudi ravnost gibanja merilnega retroreflektorja, ki je del interferometra in je pritrjen na voziček (slika 1). Ravnost gibanja merilnega retroreflektorja je odvisna predvsem od ravnosti vodil, po katerih drsi voziček. Napake vodil se preko ročic prenašajo na gibanje vozička in s tem tudi na merilni retroreflektor. Pri postavitvi naprave za lasersko mikrolitografijo smo zato posebej dobro izravnali vodili. Ravnost vodil smo sproti merili s posebnim optičnim sistemom laserskega interferometra za meritve ravnosti. Vodili je bilo treba poravnati v vertikalni (pravokotno na mizo - vertikalna ravnost) in horizontalni smeri (vzporedno s površino mize - horizontalna ravnost) - slika 2. Končne ravnosti obeh vodil so prikazane na sliki 3 in so $\pm 15\ \mu\text{m}$. Za oceno napak merjenja smo izmerili tudi kote, za katere se retroreflektor zasuče, ko voziček potuje po vodilih. Podobno kot prej lahko definiramo horizontalni in vertikalni kot. Za meritev kotov sukanja retroreflektorja smo zopet uporabili interferometrično metodo. Merilni retroreflektor se suče znotraj $\phi = \pm 10$ ločnih sekund na celi poti vozička (slika 4). Na koncu smo izmerili še ravnost gibanja površine vozička glede na zbiralni objektiv obdelovalne optike. Iz tega smo določili zahteve za avtofokusni sistem. Meritev je predstavljena na sliki 5. Površina vozička je neravna za $\pm 10\ \mu\text{m}$. Če k temu dodamo še pričakovano neravnost obdelovanca ($\pm 5\ \mu\text{m}$), lahko zahtevamo maksimalni hod avtofokusnega sistema $\pm 30\ \mu\text{m}$.

4 INTERFEROMETRIČNI SISTEM

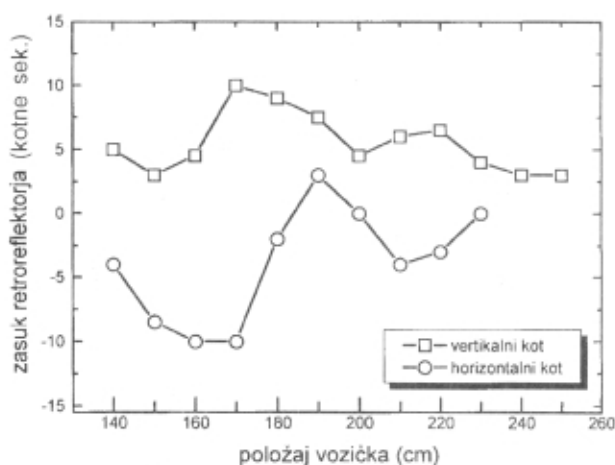
Položaj črtic v rastru, ki ga vpisujemo z laserjem, merimo z laserskim interferometrom [10]. To je Michelsonov interferometer, ki za izvir svetlobe uporablja stabiliziran He-Ne laser. Položaj črtic določimo posredno tako, da merimo položaj vozička glede na optično mizo, na kateri je pritrjen interferometrični delilnik snopa. Na vozičku je nameščen merilni retroreflektor, ki ima vlogo interferometričnega ogledala. Referenčni retroreflektor je pritrjen kar na delilnik snopa. Med pomikanjem vozička se z njim premika tudi merilni retroreflektor, merilna elektronika pa meri pomike in preko računalnika proži obdelovalni Nd-YAG laser v programiranih legah črtic merilnega rastra.

Iz podatkov o točnosti gibanja vozička lahko ocenimo napako, ki jo naredimo pri merjenju lege črtic zaradi mehanskih slabosti sistema. Občutno napako pričakujemo le, če merilni laserski žarek ni v osi merilnega rastra, ki ga vpisujemo:

$$\Delta l_1 = d \sin \phi \quad (7)$$



Slika 3.a) Izmerjena končna ravnost vodila 1
b) Izmerjena končna ravnost vodila 2

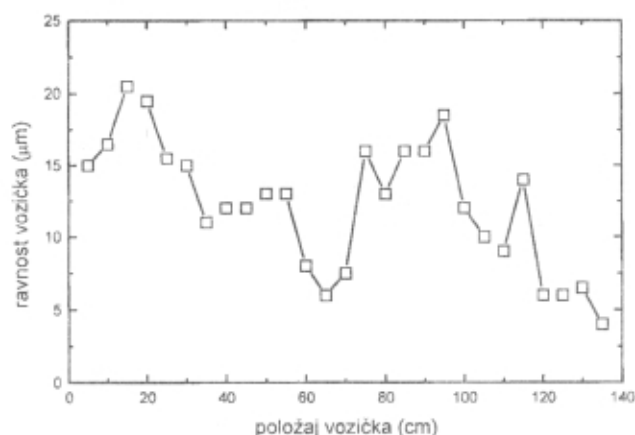


Slika 4. Sukanje interferometričnega retroreflektorja pri premikanju vozička zaradi neravnosti vodil

kjer je d razmik med merilnim žarkom in osjo rastra, ϕ pa zasuk retroreflektorja. Žarek lahko nastavimo v os rastra vsaj na $d = 1 \text{ mm}$. Iz tega dobimo oceno za napako $\Delta l_1 = \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$.

Če sta os rastra in žarek merilnega interferometra zasukana za kot θ , dobimo pri meritvi novo napako. Namesto poti l merimo pot $l \cos\theta$. Kot θ smo ocenili iz meritev na red velikosti 10^{-4} . Pri metrski razdalji l je napaka, ki jo naredimo pri merjenju razdalje:

$$\Delta l_1 = l(1 - \cos\theta) \approx \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}. \quad (8)$$



Slika 5. Ravnost gibanja površine vozička pod zbiralnim objektivom

Napake meritev položaja črtic pa nastanejo tudi zaradi spreminjanja lomnega količnika zraka ter temperaturnih raztezkov. Z laserskim interferometrom merimo optično pot merilnega retroreflektorja (l_0). Optična pot je produkt med potjo (l) in lomnim količnikom sredstva, po katerem se svetloba širi, v našem primeru zrakom: $l_0 = l \cdot n$. Količina, ki jo želimo izmeriti, pa je pot retroreflektorja in ne optična pot. Za natančno meritev moramo zato poznati lomni količnik zraka. Ta je sicer zelo blizu 1, vendar pri naši natančnosti ta ocena ne zadošča. Lomni količnik zraka se od 1 razlikuje že na četrtem mestu za decimalno vejico. Poleg tega se lomni količnik zraka v tem redu natančnosti močno spreminja s tlakom, temperaturo in vlažnostjo zraka. Zato smo izdelali sistem za merjenje lomnega količnika, ki temelji na primerjavi optične poti referenčne dolžine v vakuumu in zraku. Njun količnik je po definiciji enak lomnemu količniku zraka. Uporabili smo dva povezana interferometra z istim izvirom, od katerih smo z enim merili premik vozička z obdelovancem, z drugim pa lomni količnik zraka. Oba interferometra kontrolira računalnik, ki iz razmerja optičnih poti v zraku in vakuumu izračuna lomni količnik zraka in ga upošteva pri izračunu razdalje v merilni veji. Opisani postopek omogoča merjenje lomnega količnika zraka z natančnostjo $\pm 0,1 \times 10^{-6}$.

Na natančnost celotne meritve položaja črtic v rastru pa vplivajo tudi temperaturni raztezki različnih sestavnih

delov mehanskega sistema: voziček, referenčna dolžina v referenčni veji interferometra, obdelovanec, ... Naprava za lasersko mikrolitografijo je zato postavljena v laboratoriju s temperaturno stabilizacijo, kjer so nihanja temperature vstopnega zraka $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Poleg tega s senzorji merimo temperaturo posameznih delov mehanskega sistema in raztezke upoštevamo pri meritvi pomika obdelovanca.

Celotna ocena napak pri merjenju nam kaže, da je natančnost ODP, narejenih z laserskim vpisom merilnega rastra, $\pm 0,4 \times 10^{-6}$, kar je skoraj za velikostni red boljše, kot pa za svoje izdelke zagotavljajo proizvajalci, ki izdelujejo letve po standardnem fotolitografskem postopku. Končna natančnost ODP pa je odvisna tudi od same vgradnje ODP v obdelovalni stroj.

5 KVALITETA LASERSKO IZDELANIH MERILNIH RASTROV

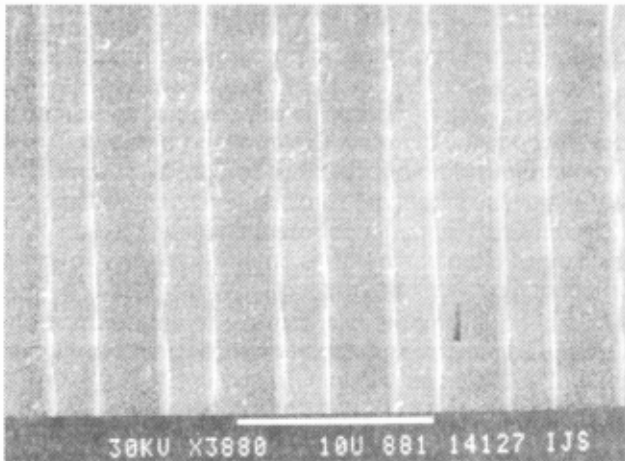
Lasersko izdelane rastre smo preverili na uporabnost v ODP in natančnost meritev z njimi. Najprej nas je zanimala najmanjša, še ponovljiva velikost luknjice, zato smo brez cilindričnega objektiva izdelali okrogle luknjice v kromovi plasti. Na sliki 6 je prikazana taka luknjica, ki ima premer $\sim 2 \text{ }\mu\text{m}$. Ob robu luknjic so lepo vidni robovi,



Slika 6. Najmanjše, še ponovljive okrogle luknjice v 100 nm debeli kromovi plasti

široki približno $0,6 \text{ }\mu\text{m}$. Nato smo v napravo vgradili cilindrični objektiv in izdelali rastre s črticami različnih dimenzij. Na sliki 7 je posnetek $\sim 3 \text{ }\mu\text{m}$ širokih črtic z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM). Ob robovih so zopet lepo vidne odebelitve kromove plasti. Le-te in poškodbe površine stekla zaradi laserskega žarka smo študirali z "atomic force" mikroskopom (AFM). Na sliki 8 sta prikazana odseka dveh črtic, ki sta bili vpisani z različnimi parametri. Na sredini slike je področje odstranjenega kroma, kjer so na sliki 8a vidne značilne poškodbe stekla zaradi laserskega žarka. Z optimizacijo parametrov laserskega vpisa se da te poškodbe zmanjšati (slika 8b) tako, da niso moteče pri uporabi v ODP.

Natančnost meritev z ODP določa predvsem kvaliteta rastra. Napake rastra, kot so neenakomernosti dolžine črtic, širine črtic med seboj in širine posamezne črtice,



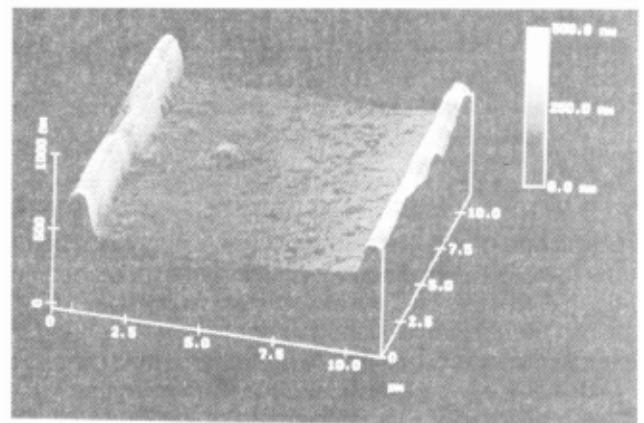
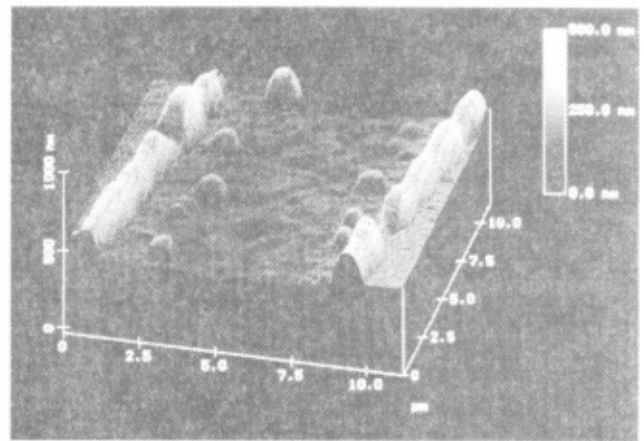
Slika 7. Raster približno 3 μm širokih črtic, posnet z elektronskim vrstičnim mikroskopom. Na vsaki meji med pasovoma stekla in kroma so vidne ~200 nm visoke odebelitve kromove plasti.

vplivajo tako na točnost meritev kot tudi na največjo možno hitrost meritve z ODP, zato smo podrobneje raziskali značilne napake rastrov, ki so izdelani z direktnim laserskim vpisom, in jih primerjali z napakami rastrov, izdelanimi s fotolitografijo. Na sliki 9 je SEM posnetek zaključkov črtic. Črtice so zaključene okroglo, vendar je krivinski radij teh zaključitev zelo majhen v primerjavi z dolžino črtice (nekaj μm proti nekaj mm), tako da je napaka zaradi tega zanemarljiva. Neenakomernost dolžine črtic je prikazana na sliki 10. Zopet je neenakomernost dolžine zanemarljiva v primeri z dolžino črtic in je enako zanemarljiva tudi napaka, ki zaradi tega nastane. Neenakomernost širine črtic pa je podana v tabeli 1. Širina črtic variira za ±3%, kar je

TABELA 1: Meritve širine črtic

položaj na črtici	zgornji del črtice	srednji del črtice	spodnji del črtice
1	5,3 μm	5,5 μm	5,6 μm
2	4,7	5,8	5,2
3	4,8	5,1	4,5
4	4,6	5,2	4,4
5	4,6	5,1	5,4
6	5,4	5,4	5,2
7	6,0	5,5	4,5
8	6,1	5,6	4,6
9	5,3	5,2	5,1

globoko znotraj meja, ki so predpisane za izdelavo ODP po fotolitografskem postopku. Med predpisi za fotolitografski postopek ni tistega, ki bi določal, koliko lahko



Slika 8. AFM posnetek črtice rastra. Površina z odstranjenim kromom je na sredini slike, ob robu te površine so vidne odebelitve kromove plasti.

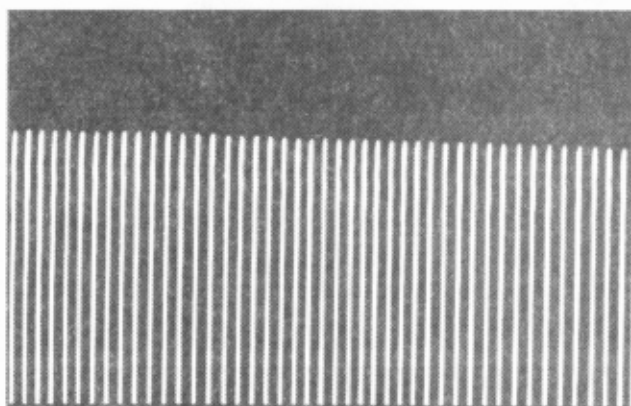
- a) značilne poškodbe stekla in ostanki kroma za neoptimalne parametre,
- b) z optimalnimi parametri so poškodbe stekla zanemarljive.



Slika 9. Zaključki črtic v rastru, posneti z elektronskim vrstičnim mikroskopom

variira širina posamezne črtice po dolžini, vendar ocenjujemo, da ima ta neenakomernost enak vpliv kot prej omenjena. Celotna napaka zaradi neenakomernosti dimenzij črtic je znotraj predpisanih meja za fotolitografski postopek (10%) in je razporejena stohastično med

črticami. Te napake ne vplivajo na natančnost meritve z ODP, ker jih čitalno steklo izpovpreči.



Slika 10. Del lasersko izdelanega rastra v plasti kroma s prikazano enakomerno dolžino črtic (posnetek z optičnim mikroskopom)

Večje in pomembnejše napake merilnih rastrov pričakujemo zaradi nepravilnosti pozicioniranja posameznih črtic. Te napake so posledica neravnega potovanja vozička mehanskega sistema in netočnosti merjenja z laserskim interferometrom. Za preverjanje položaja črtic v rastru po celi dolžini metrske merilne letve smo konstruirali napravo, ki za odčitavanje položaja uporablja CCD kamero na mikroskopu, za merjenje pomikov pa laserski interferometer. Rezolucija odčitavanja položaja je nekaj pod $0,1 \mu\text{m}$, njeno relativno natančnost pa ocenjujemo na $\pm 0,4 \times 10^{-6}$. Z napravo smo izmerili položaj črtic na različnih delih merilnega rastra glede na začetno črtico. Črtice so vpisane v okviru natančnosti meritve.

Preizkusili smo tudi mehansko obstojnost tanke plasti po obdelavi z laserjem. Zaradi močnega lokalnega segrevanja tanke plasti med vpisom črtice (tališče kroma je 1870°C) in prerazporejanja materiala bi lahko kasneje prišlo do odstopanja in luščenja tanke plasti. Za preizkus mehanske obstojnosti plasti smo uporabili standardne metode: test z lepilnim trakom, drgnenje plasti z gumico, ultrazvočna kopel. Ugotovili smo, da ima tanka plast po obdelavi z lasersko mikrolitografijo dobro mehansko obstojnost za uporabo v ODP.

Za končno testiranje kvalitete laserske litografije smo izdelano merilno letev vgradili v ODP in merili električne signale, ki jih daje standardna čitalna elektronika. Pri primerjavi teh signalov z onimi iz ODP, ki imajo merilne letve izdelane po standardnem fotolitografskem postopku, nismo opazili razlik. Tudi največja hitrost premikanja čitalnega stekla, ki je nekakšno merilo za ustreznost merilnega rastra (neenakomernost širine črtic, defekti v rastru), je enaka kot pri standardnih ODP.

6 SKLEP

Optični dajalniki pomikov, ki predstavljajo odličen kompromis med točnostjo, enostavnostjo, zanesljivostjo in ceno, so postali nepogrešljiv pripomoček za merjenje razdalj, pomikov in kotov. Z razvojem numerično krmljenih strojev, ki omogočajo vse bolj precizne obdelave materialov, se stopnjujejo tudi zahteve za natančnost in ločljivost ODP. Natančnost merilnih letev, izdelanih po fotolitografskem postopku, je omejena z vestopenjskim procesom na $\sim \pm 2 \mu\text{m/m}$, ločljivost pa zaradi velikih dimenzij na $5 \mu\text{m}$ nivo fotolitografije. Laserska mikrolitografija odpira nove možnosti izboljšanja tako ločljivosti kot tudi natančnosti merilnih rastrov in s tem tudi ODP.

Rezultati nam kažejo, da dosegamo z lasersko mikrolitografijo brez posebnih težav ločljivost merilnih rastrov $\sim 3 \mu\text{m}$ (slika 7). Ločljivost je omejena z valovno dolžino svetlobe uporabljenega obdelovalnega laserja (Nd-YAG laser z valovno dolžino $\lambda = 1064 \text{ nm}$). Z razvojem posebnih (excimer) laserjev, ki sevajo v ultravijoličnem področju, pa je dana možnost submikronske laserske litografije. Natančnost merilnih letev se z uporabo obstoječe naprave za lasersko mikrolitografijo izboljša skoraj za velikostni red v primerjavi s fotolitografskim postopkom. Velika prednost laserske litografije merilnih letev pa je predvsem v tem, da omogoča vpis na letev, ki je že vgrajena v ODP. S tem se popolnoma izognemo napaki zaradi zvijanja letve, ki nastane pri njeni vgradnji v nosilni del ODP.

7 LITERATURA

- /1/ B. Šturm: Izbrana poglavja iz naravoslovja in tehnologije, Program funkcionalnega izobraževanja mladih raziskovalcev iz industrije na IJS, Zbirka predavanj 1988/89; organizirala in vodila: R. Blinc, J. Slak, uredila: I. Drevenšek; Ljubljana 1990, str. 109
- /2/ S. Kopač, J. Pirš, I. Muševič, B. Marin, M. Čopič, M. Zgonik, D. Mihailović: Raster ruling apparatus, Patentna prijava št. EU 89120787.0, 1989 in S. Kopač, J. Pirš, I. Muševič, B. Marin, M. Čopič, M. Zgonik, D. Mihailović: Naprava za izdelavo rastrov, Patentna prijava št. YU 2089/88, 1988
- /3/ R.C. Miller, R.H. Willens, H.A. Watson, L.A. D'Asaro: Bell Syst. Tech. J., 58(9), 1909, (1979)
- /4/ D. Maydan: Bell Syst. Tech. J., 50(6), 1761, (1971)
- /5/ M. Terao, K. Shigematsu, M. Ojima, Y. Taniguchi, S. Horigome: J. Appl. Phys., 50(11), 6881, (1979)
- /6/ M. Chen, V. Marrello, U.G. Gerber: Appl. Phys. Lett., 41(9), 894, (1982)
- /7/ G.M. Blom: J. Appl. Phys., 54(11), 6175, (1983)
- /8/ D.K. Cohen, W.H. Gee, M. Ludeke, J. Lewkowitz: Appl. Opt., 23(4), 565, (1984)
- /9/ A. Yariv: Introduction to optical electronics, Holt, Rinehart and Winston Inc., New York, 1971
- /10/ Hewlett Packard, 5528A Laser measurement system, User's Guide, sept. 1986