

Proračun statistike površine na osnovu izmerenih podataka o rasejanju sa površinskih neregularnosti

Mr Mirjana Nikolić, dipl.inž.¹⁾
Dr Jovan Elazar, dipl.inž.²⁾

Analiziran je jedan od aspekata primene proučavanja rasejanog zračenja sa hrapavim površinama, koji je veoma značajan u industrijskoj kontroli kvaliteta proizvoda. Izloženi su osnovi vektorske perturbacione teorije pomoću koje se korektno može opisati rasejanje sa uzoraka koji su dovoljno glatki da dominira spekularna refleksija. Pomoću jednostavnog optičkog beskontaktnog merača rasejanja, dobijene su funkcije bidirekionalne raspodele reflektanse, na osnovu kojih je sproveden proračun funkcija spektralne gustine snage površine, koje su direktno povezane sa parametrom koji definiše hrapavost površine. Na taj način je ostvarena veza između rasejanja i topografije površine. Analizirani su uzorci od bakra sa tri različita stepena završne fine mehaničke obrade poliranjem. Valjanost rezultata dobijenih optičkom metodom proverena je poređenjem sa rezultatima ostvarenim klasičnom profilometrijskom metodom. Takođe je ukazano na značaj tretiranja problema rasejanja u vojnom domenu.

Ključne reči: Rasejanje elektromagnetnog zračenja, vektorska teorija rasejanja, funkcija bidirekionalne raspodele reflektanse, spektralna gustina snage površine, hrapavost površine, topografija površine, optički beskontaktni merač rasejanja, mehanički kontaktni profilometar.

Uvod

FIZIČKI fenomeni koji tretiraju interakciju elektromagnetnog zračenja sa materijalom, dugi niz godina predstavljaju predmet izučavanja u naučnom svetu. U zavisnosti od trenutnog stepena tehnološkog razvoja, teorijski modeli koji karakterišu ove fizičke procese, biće u većoj ili manjoj meri potvrđeni ili opovrgnuti rezultatima praktičnih razmatranja.

Procesi koji definišu prelamanje, refleksiju, rasejanje i apsorpciju elektromagnetnog zračenja na graničnoj površini sa materijalom, poznati su iz svakodnevnog života, jer na osnovu nadražaja koji se primaju iz spoljašnje sredine i registruju od strane čula, čovek postaje svestan sredine koja ga okružuje.

Rasejanje, odnosno u specijalnim slučajevima, refleksija elektromagnetnog zračenja, predstavlja složen fizički proces proučavan od strane velikog broja istraživača u različitim vremenskim periodima. Razvojem laserske tehnike i optoelektronike stvoreni su neophodni uslovi i za "laboratorijsko" tretiranje procesa rasejanja u optičkom domenu.

Rasejanje koje nastaje na površinskoj hrapavosti nastalo je u završnom delu mehaničke obrade optičkih elemenata – ogledala, prozora i sočiva, upravo predstavlja važan izvor gubitka svetlosti u optičkim sistemima visoke performanse. Ovakav vid rasejanja je svojstven samim elementima, tako da se može tretirati kao prirodna pozadina koja postoji posle minimiziranja ili otklanjanja drugih izvora neželjenog rasejanja.

Danas se, na principima detektovanja kontrolisane refleksije od objekata, bilo u slučaju prirodnih ili veštački

proizvedenih objekata, stvaraju osnove za nove tehnike zastupljene u robotici, kompjuterskoj grafici i simulaciji.

U oblasti kontrole industrijskih proizvoda, velika pažnja se posvećuje iznalaženju efikasnih i brzih metoda, pomoću kojih se može steći uvid u kvalitet površine proizvoda, kao i u postojanje eventualnih defekata na spoljašnjim površinama i unutar samog materijala.

Optičke, beskontaktno metode ispitivanja stanja površine, koje se zasnivaju na korišćenju laserskih izvora zračenja, čiji se snopovi poput sondi koriste u ispitivanju, pokazuju tendenciju stalnog usavršavanja na osnovu poređenja sa standardnim profilometrijskim kontaktnim tehnikama zastupljenim u mašinstvu.

Teorijske osnove

Uobičajeno je da se do proračuna difrakcionih efekata dolazi ili skalarnom, ili vektorskom teorijom, zavisno od toga da li se ne razmatra, ili je potrebno razmatrati stanje polarizacije. U većini slučajeva, analiza difrakcije se oslanja na Kirchhoffov metod, koji po svom pristupu može da bude skalarni ili vektorski prirode. Drugi metod je Rayleighov perturbacioni metod, sa komplikovanim matematičkim pristupom, ali i sa velikim brojem prednosti u mnogim oblastima primena.

Problemi rasejanja elektromagnetnog zračenja sa površina različitog stepena hrapavosti, i mogućnost dobijanja rešenja koja bi se mogla povezati sa eksperimentalno dobijenim rezultatima, javljaju se u radovima velikog broja naučnika, posebno u domenu radarske tehnike. Jedan od najboljih i najčešće korišćenih teorijskih pristupa skalarni

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

²⁾ Elektrotehnički fakultet, 11000 Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

prirode razvijaju Beckmann i Spizzichino [1]. Generalno gledano, relacija između rasejanja elektromagnetnog zračenja i topografskih osobina površine koja rasejava je veoma složena, pa se pribegava korišćenju određenih aproksimacija, pomoću kojih je moguće pojednostaviti složene matematičke proračune.

U vidljivoj i UV oblasti spektra rasejanje sa optičkih površina primarno se javlja sa mikroneregularnosti, koje zaostaju na površini, uglavnom posle završnog procesa poliranja. U IC oblasti rasejanje sa dobro ispoliranih površina je malo, a dominira rasejanje sa najsitnijih ogrebotina, prašine i drugih čestica [2]. Defekti koji se jasno mogu uočiti golim okom (ogrebotine i udubine), generalno se ne pojavljuju na dobro poliranim površinama, ali u slučaju postojanja ovakvog vida površinskih defekata, rasejanje se tretira metodom geometrijske optike i u prvoj aproksimaciji ne zavisi od talasne dužine optičkog zračenja.

Rasejanje sa površinskih mikroneregularnosti čije su visine mnogo manje, a bočne dimenzije poredljive ili veće od talasne dužine upadnog zračenja, može da se tretira difrakcionom teorijom.

Pri potvrđivanju difrakcione teorije uvek se javlja izvesna teškoća, pošto postoji problem, da li odstupanja od teorijski predviđenih rezultata potiču usled aproksimacija korišćenih u teorijskom modelu ili usled problema povezanih sa izradom uzorka poznate mikroskopske površine.

Perturbacioni pristup je tačniji za glatke optičke površine, posebno za veće uglove rasejanja. S druge strane, matematičko izvođenje Kirchhoffovog prilaza je jednostavnije i tačnije u slučaju hrapavijih površina. Perturbacioni pristup predstavlja logičan izbor u analiziranju rasejanja sa optičkih reflektora i proučavanju velikog broja komponenta u industriji poluprovodnika (oplate, kompjuterski diskovi,), dok se Kirchhoffov pristup koristi za tretman hrapavijih površina nastalih generalnom mašinskom obradom.

Skalarne teorije se najčešće koriste kada je potrebno dobiti vezu između ukupnog integrisanog rasejanja prikupljenog u okviru celokupne hemisfere oko uzorka u kojoj se posmatra rasejanje (kada se ne tretira slučaj rasejanja unutar materijala od kojeg je načinjena površina) i reprezentiva površinske mikroneregularnosti. Vektorska teorija svoju primenu nalazi u određivanju ugaono razloženog rasejanja.

Vektorska teorija rasejanja

U generalnom smislu, Kirchhoffov metod se sastoji u postavljanju ili aproksimiranju graničnih uslova za razmatranu površinu, a potom, nalaženju polja korišćenjem Helmholtzovog integrala [1]. Rayleigh je prvi počeo da tretira rasejanje sa hrapavih površina na suprotan način: polje se pretpostavlja u obliku sume ravanskih talasa, a nepoznati članovi sume se potom nalaze zadovoljavanjem tačnih graničnih uslova koji važe za tu površinu. Rešenje, koje takođe ima oblik beskonačnog reda, brzo konvergira samo u slučaju veoma glatkih površina. Bez obzira na to, rezultati se mogu primeniti za većinu optičkih površina i uzorke sa konačnom provodnošću.

Church svoje radove zasniva na Rayleigh-Riceovoj perturbacionoj teoriji pri tretiranju problema rasejanja sa optičkih površina. Elson i Bennett [2] koriste sličan perturbacioni pristup u teoriji optičkog rasejanja.

Vektorska teorija rasejanja je podesnija za određivanje ugaono razloženog rasejanja od skalarnog, pošto se u obzir uzimaju polarizacione osobine upadne i rasejane svetlosti kao i statističke osobine hrapave površine. Rasejanje koje je uglovno raspodeljeno, ne zavisi samo od visina

površinskih mikroneregularnosti već i od njihovih nagiba, pa se stoga mora pretpostaviti i oblik za autokorelaciju funkciju. Elson i Bennett [3] pokazuju kako se izmereni podaci o površinskoj statistici (raspodela visina neregularnosti, raspodela nagiba neregularnosti, autokorelaciona funkcija, funkcija spektralne gustine snage) mogu inkorporirati u vektorsku teoriju rasejanja. Isti autori daju pregled nekih vektorskih teorija rasejanja [2], koje određuju ugaonu zavisnost rasejanja sa površinskih mikroneregularnosti u slučaju kada je hrapavost mala u poređenju sa talasnom dužinom svetlosti, i u slučaju kada je hrapavost velika u poređenju sa talasnom dužinom svetlosti.

Interakcija elektromagnetnog zračenja i površinske hrapavosti, generalno gledano, izaziva određene promene u momentu elektromagnetnog zračenja, paralelnog površini, između početnog i krajnjeg stanja. Početno stanje može da obuhvata upadni foton ili površinski plazmon, a krajnje stanje rasejani foton ili površinski plazmon. U svakom slučaju, neophodan je mehanizam koji omogućava očuvanje momenta paralelnog površini sa kojom interaguje. Postojanje površinske hrapavosti upravo omogućava neophodan mehanizam. Svaka površina se, bilo da je njeno poreklo prirodno ili je veštačka tvorevina, odlikuje postojanjem određenog stepena hrapavosti. Tako može da se razmatra površina slučajne hrapavosti koja je sastavljena od superpozicije Fourierovih sinusoidalnih komponenta različitih amplituda, perioda i faza. Rasejanje sa takve površine predstavlja raspodelu difrakcionih pikova proizvedenih pomoću svake sinusoidalne komponente.

Generalno, teorijski problem interakcije svetlosti sa hrapavim površinama je veoma teško egzaktno rešiti, iako se ima na umu da je površinska hrapavost neizbežno prisutna na svim optičkim površinama. U gotovo svim teorijskim modelima načinjene su pretpostavke, koje se odnose na "veoma glatke" ili "veoma hrapave" površine. U slučaju rešetke, interakcija svetlosti na neplanarnim površinama je tretirana za širok opseg vrednosti hrapavosti. Za razliku od slučajne (nasumične, stohastičke) hrapavosti, profil rešetke se može jedinstveno odrediti, i obično se odlikuje osobinom simetrije, što znatno uprošćava proračune.

U velikom broju radova se koriste teorije koje objašnjavaju rasejanje sa "veoma glatkih" površina, odnosno površina čija je hrapavost znatno manja od talasne dužine upadnog zračenja. Kao reprezent površinske hrapavosti, može da se pretpostavi srednja visina odstupanja mikroneregularnosti – h , (posmatrana u odnosu na neki srednji nivo za koji se pretpostavlja da predstavlja idealno glatku površinu), ali i koren srednje kvadratne vrednosti visine hrapavosti – σ , koji se veoma često koristi u mašinstvu za prikaz stanja obrađene površine. Površina čija se vrednost σ nalazi u opsegu 1 do 2 nm, teorijski bi bila "veoma glatka" u poređenju sa talasnom dužinom zračenja od 632.8 nm. Najčešći metod za proračun efekata interakcije svetlosti na "veoma glatkim" površinama je metod malih perturbacija, koji sadrži proračun male korekcije u odnosu na idealan slučaj perfektno glatke površine. Drugi pristup je korišćenje vektorskog ekvivalenta Kirchhoffovog integralu. Integrali mogu, u principu, da daju tačna rešenja, ali se mogu rešiti tek posle uvođenja odgovarajućih aproksimacija.

Holzer i Sung kao i Sung i Eberhardt su proučavali slučaj "veoma hrapavih" površina, koje se karakterišu vrednostima σ mnogo većim od talasne dužine svetlosti. Njihovi tretmani se zasnivaju na aproksimaciji tangentne ravni i vektorskom Kirchhoffovom integralu. U aproksimaciji tangentne ravni, površina se opisuje nizom ravanskih faseta, koje često imaju Gaussovu raspodelu nagiba. Primer

površine koja se može okarakterisati kao "veoma hrapava", bila bi površina hrapavosti od 1 do 2 nm ozračena x -zracima talasne dužine 0.8 nm. Gotovo svaka polirana optička površina je "veoma hrapava" kada se proučava u dalekoj UV oblasti ili oblasti x -zraka.

Slučaj rasejanja svetlosti kada je površinska hrapavost mnogo manja od talasne dužine zračenja

Metod malih perturbacija koristi standardne perturbacione tehnike, a tretman interakcije svetlosti sa površinskom hrapavošću je ograničen na tačnost prvog reda po parametru σ/λ . Članovi u izrazima za elektromagnetno polje proporcionalni sa $(\sigma/\lambda)^2$ se zanemaruju. Slučaj nultog reda se odnosi na savršeno glatke međupovršine, a rešenje ovog neperturbovanog slučaja daje upadno, spekularno reflektovano i transmitovano polje. Uvodi se mala perturbacija planarne međupovršine (površinska hrapavost), dok se korekcija prvog reda računa u odnosu na rešenje nultog reda (perfektno glatka površina). Rešenje prvog reda se tada može koristiti da bi se dobila informacija u vezi s rasejanjem svetlosti, aproksimacijom usled hrapavosti, stvaranjem kao i zračnim raspadom površinskih plazmona. Neće se razmatrati površinski plazmoni, pošto predstavljaju proces drugog reda.

Većina rezultata korišćenja vektorske perturbacione teorije odnosi se na površine bez dielektričnih prevlaka.

U tzv. *direktnom* problemu rasejanja [4], površinski profili mereni profilometrijskom metodom predstavljaju ulazne podatke za proračun ugaono raspodeljenog intenziteta rasejane svetlosti.

Relacije dobijene Rayleigh-Riceovom teorijom nalaze primenu u iznalaženju rešenja za *inverzni* problem rasejanja: *proračun statistike površine na osnovu izmerenih podataka o rasejanju*. Ovo je od izuzetne važnosti, jer brojne površine koje se sreću u industrijskoj primeni ispunjavaju zahteve, da budu čiste glatke površine, koje reflektuju u pravcu unapred, tako da se u tim slučajevima merenje rasejanja može koristiti kao brz beskontaktni metod za karakterizaciju mikrohrapavosti. Ugaona raspodela intenziteta rasejane svetlosti predstavlja "preslikavanje" spektralne gustine snage površinske hrapavosti u domenu prostornih frekvencija.

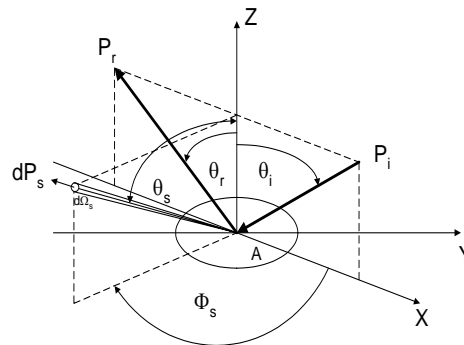
Poznato je da se teorija Fourierove analize koristi u klasičnoj teoriji telekomunikacija [5,6] a signali od interesa se posmatraju u vremenskom domenu. Pri rešavanju problema u optici se koriste iste statističke metode i Fourierovi formalizmi kao i u teoriji telekomunikacija, uz napomenu da se tada signali od interesa posmatraju u prostornom domenu, tj. u domenu prostornih frekvencija. Rezultati dobijeni analizom signala u vremenskom domenu u teoriji telekomunikacija se mogu koristiti i za rešavanje problema u optici, ako se vreme zameni prostornom koordinatom, a ugaona vremenska frekvencija se zamenjuje ugaonom frekvencijom u prostornom domenu. Radeći u domenu tzv. "Fourierove optike" [7] mora se strogo voditi računa o obeležavanju veličina od interesa, da ne bi došlo do zabune između talasne dužine svetlosti i prostorne talasne dužine, odnosno prostornog perioda uzorka. U prostornom domenu se često koristi dvodimenzionalna Fourierova transformacija za detekciju svetlosnog polja u aperturi ili za određivanje raspodele gustine svetlosnog fluksa u ravni detektora.

Rasejanje sa hrapave površine nastaje pri refleksiji i pri prelamanju na površini. Kada se radi o glatkoj površini, oba tipa rasejanja zavise od iste osobine površinske hrapavosti, a to je spektralna gustina snage površine. Veza između dife-

rencijalnog intenziteta rasejanja i spektralne gustine snage površine se daje za slučaj reflektivnog rasejavanja ozračenog upadnim monohromatskim i koherentnim zračenjem (ne razmatraju se transparentni, već samo reflektujući uzorci).

Slučajna površina predstavlja skup površina čija se mikrotopografska struktura određuje slučajnim procesom sa određenim osobinama usrednjenja. Svaka od realizacija ima određeni oblik za funkciju, koja opisuje u opštem slučaju dvodimenzionalni profil površine, što daje određeni spektar rasejanja.

Pomoću jednostavne geometrije rasejanja (sl.1) može se fizički predstaviti proces rasejanja sa površine proizvoljne hrapavosti, što će biti od važnosti za definisanje karakterističnih funkcija u procesu rasejanja. Indeksi "i" i "s" se odnose na upadnu ravan i ravan u kojoj se posmatra rasejanje, respektivno.



Slika 1. Geometrija rasejanja sa proizvoljno hrapave površine

U slučaju idealno glatke površine, postojeće samo spekularna refleksija (P_r), tako da će se ukupni intenzitet upadne svetlosti (P_i) reflektovati pod uglom θ_r , koliko iznosi i upadni ugao θ_i . Kako hrapavost površine raste, dominira difuzno rasejanje u celokupnoj hemisferi oko uzorka, i predstavljeno je diferencijalnim delom intenziteta zračenja (dP_s) rasejanog po jediničnom prostornom uglu ($d\Omega_s$), u pravcu koji je određen uglom rasejanja θ_s i azimutalnim uglom ϕ_s . Slučaj rasejanja sa realne površine predstavlja kombinaciju spekularne refleksije i difuznog rasejanja, i upravo je geometrija rasejanja ovog opšteg slučaja data na sl.1.

Nicodemus [8] uvodi pojam *funkcije bidirekionalne raspodele reflektanse (BRDF)* koja se može pisati u obliku:

$$BRDF = \frac{dP_s/d\Omega_s}{P_i \cos\theta_s} \cong \frac{P_s/\Omega_s}{P_i \cos\theta_s} \quad (1)$$

pri čemu se smatra da je ozračena površina na uzorku manja od vidnog polja detektora. Diferencijalni oblik relacije (1) je tačniji, ali usled efekata konvolucije predstavlja aproksimaciju, kada se merenje obavlja aperturom konačnog dijametra. Ova funkcija je izuzetno podesna za izražavanje generalnog rezultata metoda malih perturbacija, a pogodna je i za korektnu interpretaciju rezultata merenja.

Uobičajeno je da se radi generalizacije problema umesto funkcije *BRDF* uvodi funkcija *BSDF*, koja definiše funkciju bidirekionalne raspodele rasejanog intenziteta zračenja.

Generalni rezultat teorije malih perturbacija, za diferencijalni deo rasejane svetlosti sa hrapave površine, može se izraziti u obliku podesnim za sagledavanje suštine inverznog problema rasejanja [9]:

$$BRDF = \frac{dP_s/d\Omega_s}{P_i \cos\theta_s} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos\theta_i \cos\theta_s QW(f_x, f_y) \quad (2)$$

gde su: Q - polarizacioni faktor koji je bezdimenzionalna veličina; W - dvodimenzionalna funkcija spektralne gustine snage u prostornom domenu, a λ - talasna dužina zračenja. Prostorne frekvencije se mogu pisati u obliku:

$$f_x = \frac{\sin\theta_s \cos\phi_s - \sin\theta_i}{\lambda} \quad (3)$$

$$f_y = \frac{\sin\theta_s \sin\phi_s}{\lambda} \quad (4)$$

Iz relacije (2) se može videti da se generalni rezultat teorije malih perturbacija može podeliti na optički faktor koji zavisi od talasne dužine optičkog zračenja, optičkih konstanti površine koja rasejava, upadnog ugla i uglova rasejanja; i na površinski faktor koji zavisi samo od statističkih osobina površine.

Veličina Q izražava zavisnost rasejanja od polarizacije zračenja i osobina materijala površine koja rasejava. Izražava se preko četiri veličine $Q_{\alpha\beta}$, koje su date za ravanski polarizovano zračenje i nemagnetne materijale. Indeksi α i β označavaju stanje polarizacije početnog (upadnog) i krajnjeg (rasejanog) zračenja, respektivno; "s" znači da je vektor električnog polja upravan na ravan upadanja/rasejanja, a "p" znači da je vektor električnog polja paralelan sa ravni upadanja/rasejanja. Barrick daje rezultate za druge tipove polarizacije i magnetne materijale. Vrednosti za polarizacione faktore su date u obliku [10]:

$$\frac{Q_{ss}}{|\varepsilon - I|^2} = \left| \frac{\cos\phi_s}{(\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})(\cos\theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_s})} \right|^2 \quad (5)$$

$$\frac{Q_{sp}}{|\varepsilon - I|^2} = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_s} \sin\phi_s}{(\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})(\varepsilon \cos\theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_s})} \right|^2 \quad (6)$$

$$\frac{Q_{ps}}{|\varepsilon - I|^2} = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i} \sin\phi_s}{(\varepsilon \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})(\cos\theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_s})} \right|^2 \quad (7)$$

$$\frac{Q_{pp}}{|\varepsilon - I|^2} = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i} \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_s} \cos\phi_s - \varepsilon \sin\theta_i \sin\theta_s}{(\varepsilon \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_i})(\varepsilon \cos\theta_s + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_s})} \right|^2 \quad (8)$$

Veličina ε u ovim izrazima predstavlja relativnu dielektričnu konstantu površine i, generalno gledano, predstavlja kompleksnu veličinu jednaku kvadratu kompleksnog indeksa prelamanja. Veličina Q , koja se pojavljuje u rezultatu primene metode malih perturbacija, predstavlja se sumom $Q_{\alpha\beta}$ -ova, kada se rasejano zračenje meri detektorom neoseitljivim na polarizaciju,

$$Q = \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta} \quad (9)$$

ako je upadno zračenje polarizovano u stanju α ,

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta} \quad (10)$$

ako je upadno zračenje nepolarizovano.

U upadnoj ravni ($\phi_s=0$), članovi unakrsne polarizacije označeni indeksima "sp" i "ps", postaju nula. U pravcu spekularne refleksije ($\theta_s = \theta_i$), tj. u oblasti uglova koji su veoma bliski upadnom uglu, jednačine (5 i 8) se redukuju na Fresnelove refleksione koeficijente [7].

Slučajevi u kojima nastaju uprošćenja izraza za faktor polarizacije su jako reflektujuće površine, $|\varepsilon| \gg 1$, i kada je indeks prelamanja čisto imaginaran broj, tj. ε je negativan realan broj.

Imajući u vidu relaciju (2), funkcija spektralne gustine snage se može dobiti jednostavnim pregrupisavanjem:

$$W(f_x, f_y) = \frac{\lambda^4 (BRDF)}{16\pi^2 \cos\theta_i \cos\theta_s Q} \mu m^4 \quad (11)$$

kada se talasna dužina zračenja izražava u mikrometrima.

Većina poliranih površina se odlikuje približno izotropnom spektralnom gustinom snage, tako da se kod njih merenje uprošćava, pošto je dovoljan samo jedan prolaz preko hemisfere u kojoj se definiše rasejanje. Najjednostavniji izbor predstavlja upadna ravan koja odgovara ravni $W(f_x, 0)$. Izraz za izotropnu spektralnu gustinu snage se nalazi u obliku:

$$W_{iso}(f) = \int_0^{2\pi} W(f_x, f_y = 0) f d\beta = 2\pi f W(f_x, f_y = 0) \quad (12)$$

$$f^2 = f_x^2 + f_y^2$$

Koren iz srednje kvadratne vrednosti za hrapavost se može izraziti kao:

$$\sigma = \left[\int_{f_{min}}^{f_{max}} W_{iso}(f) df \right]^{1/2} \quad (13)$$

čime je potpuno ostvarena željena veza između funkcije koja opisuje spektar rasejanja, i parametra, koji opisuje mikropografske osobine površine koja rasejava.

Slučaj rasejanja svetlosti kada je površinska hrapavost mnogo veća od talasne dužine zračenja

Standardne tehnike, koje se bave proučavanjem rasejanja sa površina koje su veoma hrapave u poređenju sa korišćenom talasnom dužinom zračenja, zasnivaju se na korišćenju aproksimacije tangentne ravni (radovi Sunga i Eberhardta) i Kirchhoffovog vektorskog integrala (radovi Holzera i Sunga) [2]. U aproksimaciji tangentne ravni površina se aproksimira nizom planarnih (ravanskih) faseta čije su površinske normale u pravcima kompatibilnim sa srednjim nagibom površine prekrivene fasetama. Normale fasete se statistički opisuju raspodelom nagiba. Radi pojednostavljenja se pretpostavlja, da je nagib svake fasete nezavisan u odnosu na druge. Ova pretpostavka uvodi uslove da je $\sigma/\lambda > 1$ i da je $\lambda/a < 1$, gde a predstavlja veličinu fasete ($a \times a$). Drugi navedeni uslov je povezan sa pretpostavkom da je rasejanje sa svake fasete nezavisno. Kao dalje poboljšanje Sung i Eberhardt dopuštaju postojanje perturbacija mnogo manjih od λ na samim fasetama. Rešenje u ovom modelu sadrži proračun rasejanja sa planarnih fasete i tretiranje ovog rešenja kao rešenja

nultog reda. Ako se dopusti da male perturbacije nastanu na planarnim fasetama, dobija se rešenje prvog reda. Oba se rešenja dobijaju zadovoljavanjem graničnih uslova na površini. Formula diferencijalnog rasejanja sadrži dva člana: rešenje nultog i rešenje prvog reda. Rešenje nultog reda se javlja usled spekularne refleksije sa fasete, a rešenje prvog reda zbog postojeće hrapavosti na fasetama. Formule važe za situaciju gde je celokupna vrednost za hrapavost σ mnogo veća od talasne dužine zračenja, ali se za perturbacije na fasetama pretpostavlja da će biti mnogo manje od talasne dužine zračenja. Usled toga se perturbacije na fasetama tretiraju metodom malih perturbacija. Rezultat nultog reda ovakvog proračuna ukazuje da fasete, čije su normale sve u datom pravcu, doprinose rasejanoj svetlosti u određenom pravcu. Slučajna hrapavost, koja se "dodaje" svakoj faseti, doprinosi rasejanoj svetlosti u hemisferi rasejanja. Rešenje za planarne fasete zanemaruje ivične efekte fasete. Konačno rešenje eksplicitno zavisi od raspodele nagiba površine, što se u izvesnoj meri razlikuje od rezultata dobijenog metodom malih perturbacija koji je diskutovan ranije. U tom slučaju, usrednjenje po ansamblu proizvodi Fourierov spektar komponenti površinske hrapavosti u konačnom rešenju.

Holzer i Sung su koristili vektorski Kirchhoffov integral da bi proračunali ugaonu raspodelu rasejane svetlosti sa veoma hrapavih površina. Takođe razmatraju i pitanje senčenja površine. Usled složenosti konačnog rešenja, koje se daje u obliku spregnutog para integrala, numerički se proračunava jedino slučaj jednodimenzionalne hrapavosti.

Williams i Aspues su korišćenjem elipsometrijskih i polarimetrijskih tehnika proučavali osobine hrapavosti poliranih i nagriženih monokristalnih uzoraka od kristalnog silicijuma. Zaključili su da bi mogli da proizvedu makroskopski hrapave, ali mikroskopski glatke površine, koje daju iste optičke konstante elipsometrijskim metodama kao i glatki polirani uzorci. Takođe su bili u stanju da proizvedu i makroskopski glatku, ali na mikro nivou hrapavu površinu, koja se ponaša kao da poseduje površinski film i ima manje optičke konstante kada je merena elipsometrijskim tehnikama.

Torrance-Sparrow model [11,12] je najpopularniji model zastupljen u kompjuterskoj grafici i vizuelizaciji. U ovom modelu površina se modeluje šupljinama oblika latiničnog slova "V", koje spekularno reflektuju i za čije se normale pretpostavlja da će da budu raspodeljene po zakonu normalne raspodele. Proračun reflektovanog zračenja se zasniva na geometrijskoj optici, koja se primenjuje kada su neregularnosti na površini mnogo veće od talasne dužine upadnog zračenja.

Oren-Nayarov model se zasniva na istom modelu površine kao i Torrance-Sparrow model sa tom razlikom što se "V" šupljine tretiraju kao difuzni reflektori. Oba modela vode računa o geometrijskim efektima maskiranja i senčenja. U ovim modelima se podrazumeva da su šupljine veoma duge (tako da se efekti na njihovim krajevima mogu zanemariti), dok površinska izotropija zahteva da šupljine nemaju određeni pravac. Upravo u ovoj nemogućnosti postojanja takvih površina se ogleda i glavni nedostatak Torrance-Sparrow i Oren-Nayarovog modela.

Slučaj Mieovog rasejanja

Površinske strukture nastale tokom procesa poliranja tretiraju se kao mikroneregularnosti. Rasejanje sa ovog tipa površina se može proračunati na osnovu difrakcione teorije. Rasejanje koje nastaje na ogrebotinama (brazgotinama) ili drugim defektima koji se lako uočavaju golim okom, u pri-

ncipu se može proračunati na osnovu geometrijske optike ukoliko su poznati tačni oblici defekata koji rasejavaju upadno zračenje. Ipak, redak je slučaj da se uzorci poznaju dovoljno detaljno da bi se proračuni mogli sprovesti.

Kada izolovane čestice prašine ili granulice koje ostaju na naparenim filmovima imaju veličine poredljive sa talasnom dužinom upadnog zračenja, rasejanje koje se na njima javlja može da se tretira Mieovom teorijom rasejanja [7,13]. Ova teorija se može primeniti i na rasejanje sa aerosola [14], čije su dimenzije čestica poredljive sa talasnom dužinom zračenja, uz pretpostavku da ne postoji višestruko rasejanje, da su čestice sfernog oblika, poznate veličine i indeksa prelamanja.

Rasejanje koje se događa na česticama koje se nalaze na površini je znatno složenije za izvođenje proračuna. Npr. prašina koja se nalazi na površini nekog objekta se sastoji od čestica koje mogu da imaju širok dijapazon veličina i oblika, dok je indeks prelamanja po pravilu nepoznat, pa stoga nije jednostavno koristiti Mieovu teoriju u egzaktnoj formi.

Na druge pristupe, koji usavršavaju postojeći Mieov formalizam, i pozive na odgovarajuću literaturu koja omogućuje tumačenje procesa rasejanja, ukazano je detaljnije u [15].

Tehnike korišćene za merenje hrapavosti površine

Generalno, tehnike koje se koriste za merenje površinske hrapavosti optičkih površina se mogu podeliti u dve grupe [16]:

1. tehnike koje daju profil površine i statistiku proračunatu na osnovu profila. Površinska statistika obuhvata raspodelu visina, raspodelu nagiba, autokorelaciju funkciju i spektralnu gustinu snage površine.

2. tehnike koje omogućuju dobijanje statističkih parametara optičke površine bez uvida u profil.

Instrumenti pomoću kojih se mere površinski profili nazivaju se profilometri. Profilometri se mogu svrstati u sledeće kategorije:

1. mehanički profilometri sa dijamantskim iglama pomoću kojih se ostvaruje kontakt sa površinom,
2. beskontaktni optički profilometri koji koriste formu snopova svetlosti i efekte interferencije,
3. specijalne merne tehnike korišćene u elektronskom mikroskopu.

Druga grupa merenja obuhvata rasejanje prikupljeno unutar hemisfere ili rasejanje razloženo po uglu.

Svaki od navedenih instrumenata ili tehnika ima sopstvenu osetljivost na visinu i prostornu talasnu dužinu površine, ili na ograničenje širine opsega.

Mehanički profilometri

Mehanički profilometri mere površinski profil prevlačenjem fine dijamantske igle preko površine i pretvaranjem njenog vertikalnog kretanja u električni signal pomoću elektromehaničkog transduktora.

Svi komercijalno dostupni mehanički profilometri, koji se koriste za merenje optičkih površina, imaju dijamantske igle čiji radijusi variraju od 12 μm do manje od 1 μm ; neki takođe imaju tzv. "lopataste" igle koje su oštrije u jednom pravcu nego u drugom, tako da oni mogu da profiluju išpartane ili žljebaste površine. Opterećenje igle, koje određuje da li je i koliki znak ostavljen na površini koja se profiluje, u nekim slučajevima može da varira. Visinska

osetljivost instrumenta, tj. sposobnost instrumenta da meri veoma male visine površine, moguće reda nekoliko angstrema, zavisi od osetljivosti elektromehaničkog prikupljanja koje transformiše vertikalno kretanje igle u električni signal, nivoa signal/šum pojačanog signala i, na kraju, nivoa osnovnog šuma korišćene elektronike. Ako je signal digitalizovan, bitan je i priraštaj digitalizacije i ne bi trebao da ograniči tačnost merenja. Lateralna rezolucija, tj. sa kolikom tačnošću igla očitava stvarnu površinu, zavisi od visina i nagiba reljefa površine i radijusa igle. Jednostavan izraz daje vezu između ovih parametara za žljebastu površinu koja ima sinusoidalni profil [16]:

$$d > 2\pi\sqrt{hr} \quad (14)$$

gde su: d – period sinusoidalne komponente, tj. minimalni razmak karakteristika na površini koje mogu da se razdvoje; h – amplituda sinusoidalne komponente a r – radijus igle. Izraz (14) se može primeniti i za površine oblika latiničnog slova "V" i za površine kvadratnog oblika.

Kada se koristi odgovarajući mehanički profilometar sa dijamantskom iglom, mogu da se dobiju profili koji imaju poredljivu osetljivost na visinu i mnogo bolju lateralnu rezoluciju od optičkih profilometara. Površine mogu da budu prevučene ili gole, a u nekim slučajevima se mogu meriti i efekti hrapavosti same prevlake.

Površinski profili i spektri obezbeđuju komplementarni uvid u topografiju površine. Profili mogu da obezbede uvid u šiljkove i jamice pri merenju koji bi se teško prepoznali u domenu prostornih frekvencija. S druge strane, spektri mogu da prikažu male periodičnosti koje su nevidljive pri trasiranju profila pomoću profilometrijske igle. Ovakve reprezentacije su ipak primarno vizuelne i kvantitativne. Kvantitativno poređenje se može načiniti proučavanjem parametara obrade površina dobijenih iz spektara profila u istim opsezima površinskih frekvencija.

Optički profilometri

Za dobijanje površinskog profila i statistička merenja, koriste se sledeći optički profilometri [16]:

1. FECO interferometar (sa skeniranjem pruga jednakog hromatskog reda),
2. skenirajući Fizeauov interferometar,
3. optički heterodinski profilometar,
4. Mireauov heterodinski interferometar,
5. optički profilometar baziran na principu mikroskopa Nomarskog.

Interferometri rade na principu da je faza reflektovanog zračenja povezana sa visinskom razlikom – hrapavošću između dve ozračene tačke na površini.

Pri izvođenju optičkih merenja često se koristi beskontaktni profilni mikroskop. Ovaj instrument meri površinski profil određivanjem faznih varijacija svetlosti reflektovane normalno od površine i konvertovanjem u promenu visine, korišćenjem relacije [17,18]:

$$Z(x) = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(x) \quad (15)$$

gde se za talasnu dužinu λ , sa kojom se izvodi merenje uzima 633 nm, a fazne varijacije su označene sa φ .

Osetljivost na visinu zavisi od stabilnosti instrumenta (eliminacija vibracija) i šuma instrumenta.

Za merenje profila sa lateralnom rezolucijom koja se može dobiti jedino elektronskim mikroskopom (nekoliko

angstrema), ranije opisani metodi nisu pogodni.

Merenje zračenja rasejanom hrapavom površinom

Prvi instrumenti namenjeni za merenje rasejanja bili su dizajnirani da prikupljaju veliki deo svetlosti rasejane od uzorka u okviru hemisfere ispred uzorka koji reflektuje, i da fokusiraju prikupljeno zračenje u jedan detektor. Izmerena snaga rasejanja se potom normalizuje pomoću snage zračenja reflektovanog u spekularnom pravcu, što predstavlja odnos koji se definiše kao totalno integrisano rasejanje [10,19,20]. Dobijen je instrument koji obezbeđuje visoku ponovljivost rezultata i brzi prelazak preko uzorka. Pomoću ovakvog instrumenta dobija se karakterizacija rasejanja sa uzorka, sadržana samo u jednoj veličini, parametru σ . Upravo se za dobijanje relacije između totalnog integrisanog rasejanja i parametra koji karakteriše hrapavost površine, koristi skalarni pristup u tretiranju problema.

Celokupna oprema za obavljanje merenja totalnog integrisanog rasejanja se sastoji od izvora zračenja, filtera koji smanjuju intenzitet zračenja na vrlo kontrolisan način, prostornog filtera za kontrolu veličine snopa, opreme za prikupljanje svetlosti rasejane od uzorka, i detektora, koji će da mere svetlost koja se rasejava i svetlost koja se spekularno reflektuje od uzorka. Takođe je potrebna i odgovarajuća elektronska oprema kao i oprema za procesiranje signala. Uobičajeno je da se svetlost koju rasejava uzorak prikuplja ili pomoću integrišuće sfere ili pomoću hemisfere koja ima maleni otvor i prevučena je aluminijumom.

Nasuprot merenju totalnog integrisanog rasejanja gde stanje polarizacije svetlosti nije uzeto u obzir, metode pomoću kojih se objašnjava rasejanje zračenja od hrapavih uzoraka koje je uglavnom raspodeljeno u prostoru uzimaju u obzir stanje polarizacije i upadne svetlosti, i svetlosti koja se rasejava. Teorijske relacije koje se primenjuju za tretiranje uglavnom raspodeljenog rasejanja dobijene su na osnovu vektorskih teorija rasejanja.

Sastavni deo opreme jednog ovakvog sistema čine [9,21]: izvor svetlosnog zračenja, držač uzorka, prostorni filter, filter za redukovanje intenziteta zračenja, čoper, prijemnik sa sistemom za detekciju, polarizator. Izvor svetlosnog zračenja je obično laserski izvor zračenja. Čopovanjem snopa sprečava se da neželjena svetlost ozrači uzorak, kada se radi u uslovima ambijentalne svetlosti i redukuje se optički i elektronski šum. Pošto teorijski izraz koji povezuje intenzitet ugaono razloženog rasejanja sa korenom srednje kvadratne vrednosti hrapavosti, uzima u obzir stanje polarizacije upadnog snopa svetlosti, za svetlost je poželjno da bude ravanski polarizovan talas ili paralelno ("p") ili upravno ("s") u odnosu na upadnu ravan. Redukovanje optičkog i elektronskog šuma se ostvaruje i korišćenjem "lock-in" sistema detekcije u elektronskoj opre-mi, koji slabi sve signale izuzev onih koji se javljaju na referentnoj frekvenciji (frekvenciji čopovanja). Optički deo opreme može, zavisno od složenosti, da sadrži polarizatore, talasne pločice i filtre neutralne gustine. Prostorni filter uklanja parazitno rasejanje. Za optičke elemente se biraju visokokvalitetne komponente koje stvaraju veoma malo rasejanje i mogu da se upotrebe u širokom talasnom opsegu zračenja. Veličina spota na uzorku je određena elementima geometrije sistema i može da se podešava menjanjem žižne daljine korišćenih sočiva. Držač uzorka može da bude veoma jednostavne konstrukcije ili veoma složen, zavisno od toga sa koliko stepena mehaničke slobode raspolaže i da li se preciznost kre-

tanja uzorka ostvaruje na kompjuterski kontrolisan način [21]. Detektorski element mora da obezbedi nizak nivo šuma, linearnost i dinamički opseg. Posebna pažnja mora da se posveti izboru pretpojačavača i kućišta za prijemnik [21].

Ekspiriment

Ekspiriment koji je obavljen u *Laboratoriji za elektro-optiku na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu*, sproveden je u cilju dobijanja ugaone raspodele rasejanog laserskog zračenja sa hrapavih površina, odnosno sa površina obrađenih različitim stepenom fine mehaničke obrade. Uzorci tretirani eksperimentom izrađeni su od elektrolitičkog bakra čistoće 99.99% sa malim sadržajem kiseonika i fosfora, po propisanim standardima [22]. Izbor čistog metala, kao materijala za izradu uzoraka omogućio je da se umesto elipsometrijskim metodama, indeks prelamanja, koji je kompleksan broj i koji je neophodan za izračunavanje polarizacionog faktora, može odrediti na osnovu specijalizovane literature [23,24]. Uzorci su oblika valjka, visine 13mm i prečnika osnove 13mm.

Metalografska priprema uzoraka od bakra je izvršena uređajima za mehaničko brušenje i poliranje, uz napomenu da se mehanička obrada primenjuje samo na jednu površinu osnove svakog uzorka. Priprema uzoraka je izvršena na Katedri za fizičku metalurgiju *Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu*. Da bi se dobili dovoljno glatki uzorci za sprovođenje odgovarajućih merenja i proračuna, potrebno je sprovesti preciznu mehaničku obradu.

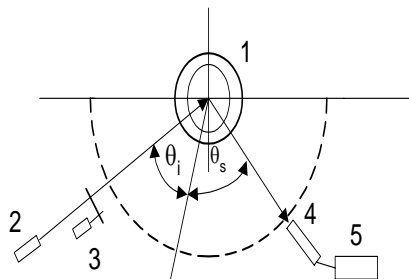
Mehaničko brušenje uzoraka označenih brojevima #1, #2 i #3 je izvedeno u tri etape sa silicijum karbidnim (SiC) brusnim hartijama krupnoće 320, 400 i 600 (proizvođač *Buehler LTD*) uz korišćenje vode kao lubrikanta. Brušenje je na svakoj brusnoj hartiji vršeno u dva uzajamno upravna pravca, ukupnog trajanja 5 minuta po uzorku.

Mehaničko poliranje je vršeno dijamantskim pastama (proizvođač *Struers*), krupnoće 6, 3 i 1/4 μm na čojama za poliranje DUR, MOL i NAP, u trajanju dva minuta po uzorku i uz korišćenje lubrikanta DP Blue (proizvođač *Struers*).

Uzorak koji je završno poliran dijamantskom pastom krupnoće 1/4 μm nakon brušenja, prvo je poliran pastom krupnoće 3 μm zbog velike razlike u krupnoći završne brusne hartije i završne paste za poliranje.

Na površini pripremljenih uzoraka makro-pregledom mogu se uočiti veoma fini risevi i zarezci čija finoća raste sa porastom finoće završne paste za poliranje.

Blok-šema jednostavnog uređaja za merenje intenziteta rasejanog zračenja sa hrapavih površina u funkciji ugla rasejanja prikazana je na sl.2.



Slika 2. Blok-šema uređaja za merenje ugaono razloženog rasejanja: 1- držač sa uzorkom koji se ispituje, 2- izvor laserskog zračenja, 3- čoper, 4- detektor zračenja – fotodioda, 5- lock-in pojačavač

Pošto je kao izvor zračenja upotrebljen He-Ne laser koji daje vidljivu svetlost na 632.8 nm, polarizovan u "s" stanju, za indeks prelamanja se dobija na osnovu podataka iz [24], vrednost $n = 0.2311 - i \cdot 3.3908$. Aparatura je jednostavna i ograničena samo na merenje u upadnoj ravni, tako da nema mogućnosti merenja u okviru celokupne hemisfere oko uzorka. Uz podatak, da su merenja izvršena pri upadnom uglu od 10° , vrednost polarizacionog faktora je $Q=0.9301$, na osnovu relacija (5, 6 i 9). Jednostavnim mehaničkim pomeranjem kraka aparature na kojem se nalazi detektor po polukružnoj putanji radijusa 0.5 m u jednoj ravni u koracima od 0.1° , omogućeno je merenje rasejane svetlosti u pravcima levo i desno u odnosu na spekularni pravac. Aparatura, iako jednostavna po svojoj konstrukciji, omogućava upravo zbog osobina koje poseduje lock-in pojačavač, da se vrednost za detektovanu snagu zračenja rasejanog površinom uzorka normira sa vrednošću za snagu upadnog (neometenog) laserskog zračenja. Lock-in pojačavači se koriste za detekciju i merenje veoma malih naizmeničnih signala. Ova tehnika omogućava ostvarivanje veoma tačnih merenja čak i u slučajevima kada je mali signal „zaklonjen” šumovima koji su i više hiljada puta veći od njega. Lock-in pojačavači daju odziv samo na referentnoj frekvenciji, a to će u ovom slučaju biti frekvencija kojom se moduliše laserski snop. Laserski snop se koristi kao „sonda” za ispitivanje uzoraka bez dodatnih sočiva, da bi se smanjile aberacije u sistemu za merenje, što je navedeno u [15].

Rezultati eksperimentalnog merenja i proračuna

Aparatura prikazana na sl.2, sa detaljnim opisom datim u [15], omogućava merenje intenziteta rasejane svetlosti, i na osnovu relacije (1) dobijanje vrednosti za bidirekionalnu funkciju reflektanse koja je za uzorke #1, #2 i #3 prikazana na slikama 3a, 3b i 3c, respektivno. Za svaki uzorak sprovedena su četiri nezavisna merenja. Na svakoj slici dve krive (tačke merenja su prikazane zvezdicama i kružićima) su dobijene za jedan položaj uzorka, a druge dve krive (tačke merenja su prikazane rombovima i kvadratićima) kada je uzorak zarotiran za 90° , vodeći pri tom računa da laserski snop ozračava isto mesto na uzorku. Vrednosti za funkcije bidirekionalne raspodele reflektanse su date u logaritamskoj podeli radi preglednijeg predstavljanja rezultata.

Funkcija spektralne gustine snage se može zatim proračunati na osnovu relacije (11). Mikroskopskim pregledom uzoraka konstatovano je postojanje izotropije u strukturi obrađene površine. Zbog toga se izraz za funkciju spektralne gustine snage može pisati u obliku datom relacijom (12), što znatno olakšava dalju analizu i proračun. Grafički prikaz funkcija spektralne gustine snage u domenu prostornih frekvencija je dat na slikama 4a, 4b i 4c, za uzorke #1, #2 i #3, respektivno. Oznake mernih tačaka na krivama tačno prate oznake na krivama za funkciju bidirekionalne raspodele reflektanse, a za prikaz vrednosti funkcije spektralne gustine snage korišćena je takođe logaritamska raspodela.

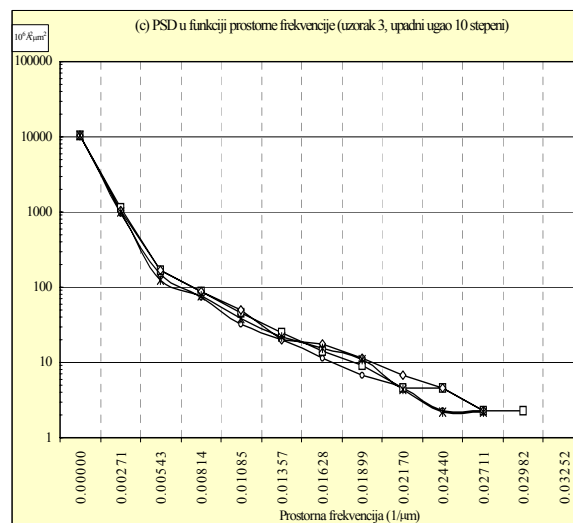
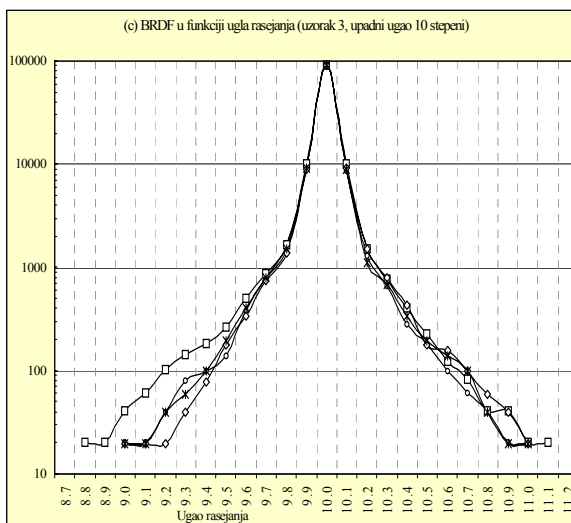
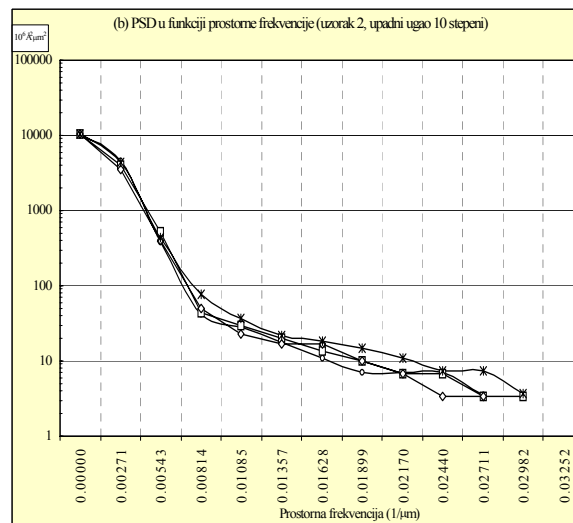
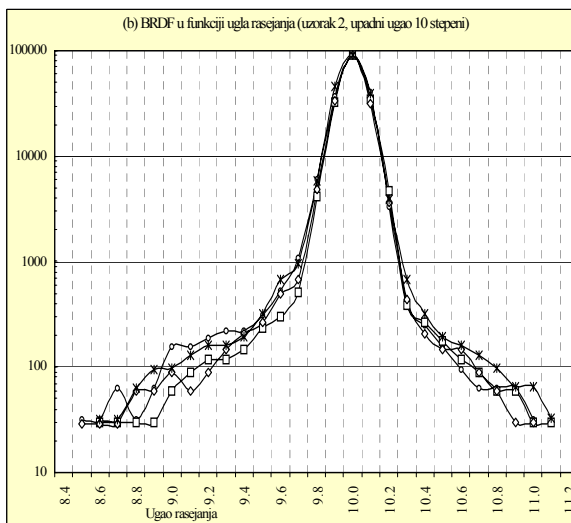
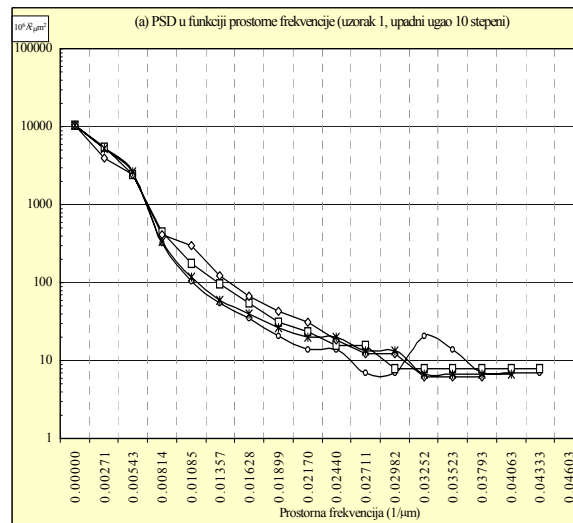
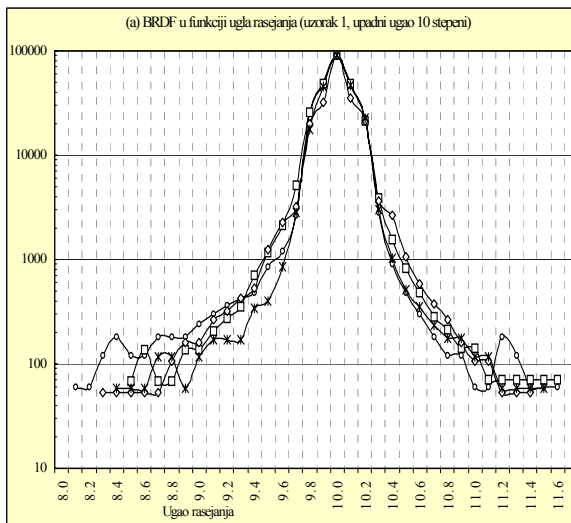
Sa slika 3a, 3b i 3c se može zaključiti da za uzorke #1, #2 i #3 dominira spekularno rasejanje koje se i odlikuje jasno formiranim pikom na uglu rasejanja koji je jednak upadnom uglu. Širina spekularnog pika se smanjuje kako

stepen finoće završne obrade poliranja (finoća dijamantske paste) raste, što predstavlja očekivani rezultat.

Sada su obezbeđeni potrebni elementi za izračunavanje parametra hrapavosti na osnovu relacije (13), imajući u vidu da se u velikom broju praktičnih slučajeva uz pomoć estimatorskog proračuna izraz može aproksimirati sumom

odbiraka dovoljnih za dobijanje malog odstupanja pri proračunu.

Da bi se stekao uvid u korektnost ovako primenjene beskontaktno optičke metode, rezultati se porede sa rezultatima ostvarenim klasičnim profilometrijskim metodama. Hrapavost uzoraka je merena standardnim



Slika 3. BRDF u funkciji ugla rasejanja

Slika 4. Spektralna gustina snage u funkciji prostorne frekvencije

kontaktnim profilometrom Form Talysurf u IKL – Barajevo. Za svaki uzorak vršena su merenja u tri različite pravca. Snaga pipka, oblik kontaktne igle i njen „ekvivalentni” radijus strogo se definišu za vrstu materijala koji se ispituje pre obavljanja merenja [15]. Izmerene vrednosti za hrapavost σ , i za srednju vrednost hrapavosti σ_{sr} , dobijene optičkom i kontaktnom metodom, date su u tabeli 1 za sva tri uzorka.

Tabela 1. Prikaz rezultata merenja pomoću optičke i kontaktne metode

Uzorak	Optička metoda $\theta=10^\circ$		Kontaktni profilometar	
	σ (μm)	σ_{sr} (μm)	σ (μm)	σ_{sr} (μm)
#1 6 μm	0.0789	0.0795	0.137	0.094
	0.0814		0.088	
	0.0787		0.057	
#2 3 μm	0.0791			
	0.0522	0.0512	0.047	0.043
	0.0511		0.042	
0.0476	0.041			
#3 1/4 μm	0.0537			
	0.0297	0.0312	0.036	0.033
	0.0326		0.033	
0.0321	0.029			
	0.0303			

Iz table 1 jasno se vidi da u slučaju uzorka #1, gde je primenjen najgrublji stepen fine obrade poliranjem, dolazi do najvećeg odstupanja u rezultatima. Razlog za to je jednim delom što primenjena obrada ostavlja najdublje riseve, pa ostaci polir paste mogu da ostanu zalepljeni i izazovu neregularne pikove u trasiranju dijamantskom iglom, a drugim delom zbog činjenice da je poliranje izvršeno ručnom obradom (ne mašinskom) pa se ne može garantovati potpuno jednak stepen obrade po celoj površini. Kako stepen finoće obrade raste, tako se smanjuje razlika između rezultata dobijenih pomoću ove dve merne metode.

Imajući u vidu nesavršenost aparature, njenu jednostavnost i ograničenja, što je detaljno navedeno i objašnjeno u [15], dobijeni rezultati predstavljaju korektne i valjane vrednosti, što se vidi iz table 1, po izvršenju poređenja sa rezultatima dobijenim klasičnom profilometrijskom metodom.

Zaključak

Elektromagnetno zračenje, koje se rasejava na realnim površinama, može se predstaviti u obliku sume spekularno reflektovanog zračenja i difuzno rasejanog zračenja. Kada je površina dovoljno glatka da zadovoljava Rayleighev kriterijum, ugao refleksije je jednak upadnom uglu, a rasejanje sa površine je spekularnog karaktera. Kako stepen hrapavosti raste, tako se rasejano zračenje sve više odlikuje „lepezom” određene širine u odnosu na spekularni snop.

Vektorska teorija rasejanja je mnogo fleksibilnija za određivanje ugaono razloženog rasejanja od skalarne teorije, pošto se uzimaju u obzir polarizacione karakteristike upadne i rasejane svetlosti, kao i statističke osobine hrapave površine. Perturbacioni pristup je tačniji za glatke optičke površine, i često predstavlja osnovni pristup korišćen u industrijskoj kontroli kvaliteta proizvoda zasnovanoj na optičkoj beskontaktnoj metodi. U tretmanu glatkih površina Rayleigh-Riceovom vektorskom perturbacionom teorijom, radi karakterizacije ugaono razloženog rasejanja, definiše se funkcija bidirekionalne raspodele reflektanse i funkcija spektralne gustine snage

površine. Na ovaj način se rešava tzv. inverzan problem rasejanja: nalaženje rešenja za proračun površinske statistike iz izmerenih podataka o rasejanju. Merenje intenziteta rasejane svetlosti optičkom beskontaktnom metodom je osnova za dobijanje parametra koji definiše hrapavost površine. Valjanost rezultata dobijenih optičkom metodom proverena je poređenjem sa rezultatima ostvarenim klasičnom profilometrijskom metodom. Poređenje je potvrdilo valjanost u realnom opsegu odstupanja u odnosu na rezultate dobijene profilometrijskom metodom usled nedostataka merne aparature i nesavršene obrade uzoraka.

Rasejanje elektromagnetnog zračenja sa različitih površina predstavlja složen fizički proces, čije proučavanje predstavlja polaznu osnovu za rešavanje različitih problema u velikom broju primena. Primene se grubo mogu podeliti u dve kategorije:

- primena u industriji (kontrola kvaliteta proizvoda, utvrđivanje defekata, robotika, kompjutersko generisanje scene, profilometrija), medicini (proučavanje bioloških tkiva, dijagnostika), proizvodnja optičkih komponenata (optičke prevlake, antirefleksione prevlake);
- primena u vojnim disciplinama: praćenje i markiranje ciljeva, primena u sistemima laserskih daljinometara i ozračavača, maskiranje. Posebno je važna činjenica da je potrebno rezultate laboratorijskih modela modifikovati tako da važe i u spoljnim uslovima koji veoma utiču na prostiranje elektromagnetnog zračenja. Najveći uticaj imaju atmosferski uslovi i stepen hrapavosti nepoznatog objekta koji se može ispitati samo na daljinu. Korišćenje rezultata proučavanja rasejanja i osobina materijala je sve veće u vojnim disciplinama, imajući na umu činjenicu da u uslovima modernog elektronskog ratovanja vođenim projektilima, brzina detekcije zračenja, dobijanje tačnog odziva i preciznih koordinata ozračavača ili mete, omogućuje ravnopravnu borbu sa često elektronski mnogo opremljenijim neprijateljem [25].

Literatura

- [1] BECKMANN,P., SPIZZICHINO,A. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Macmillan, New York, 1963.
- [2] ELSON,J.M., BENNETT,J.M. Vector scattering theory. *Opt. Engineering*, march-april 1979, vol.18, no.2, p.116-124.
- [3] ELSON,J.M., BENNETT,J.M. Relation between the angular dependence of scattering and the statistical properties of optical surfaces. *J. Opt. Soc. Am.*, jan. 1979, vol.69, no.1, p.31-47.
- [4] MARX,E., VORBURGER,T.V. Direct and inverse problems for light scattered by rough surfaces. *Applied Optics*, sept. 1990, vol.29, no.25, p.3613-3625.
- [5] STOJANOVIĆ,J.S. *Osnovi telekomunikacija*. Naučna knjiga, Beograd, 1990.
- [6] BLACKMAN,R.B., TUKEY,J.W. *The measurement of power spectra*. Dover publications, New York, 1959.
- [7] HECHT,E., ZAJAC,A. *Optics*. Addison Wesley, New York,1987.
- [8] NICODEMUS,F.E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Applied Optics*, june 1970, vol.9, no.6, p.1474-1475.
- [9] STOVER,J., SERATIS,S., GILLESPIE,C. Calculation of surface statistics from light scatter. *Opt. Engineering*, 1984, vol.23, no.4, p.406-412.
- [10] CHURCH,E.L., JENKINSON,H.A., ZAVADA,J.M. Relationship between surface scattering and microtopographic features. *Opt. Engineering*, march-april 1979, vol.18, no.2, p.125-136.
- [11] GINNEKEN,B.V., STAVRIDIS,M., KOENDERINK,J. Diffuse and specular reflectance from rough surfaces. *Applied Optics*, jan. 1998, vol.37, no.1, p.130-139.

- [12] KIEKEGAARD,P. Reflection properties of machined metal surfaces. *Opt. Engineering*, march 1996, vol.35, no.3, p.845-857.
- [13] KORTUM,G. *Reflexionsspektroskopie - Grundlagen, Methodik, Anwendungen*. Springer Verlag, 1969.
- [14] FORRESTER,P.A., HULME,K.F. Review: Laser rangefinders. *Optical and quantum electronics*, july 1981, vol.13, no.4, p.259-293.
- [15] NIKOLIĆ,M. *Modeliranje i merenje refleksivnosti optičkog zračenja hrapave površine*. magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Beograd, 2000.
- [16] BENNETT,J. Comparison of techniques for measuring the roughness of optical surfaces. *Opt. Engineering*, may-june 1985, vol.24, no.3, p.380-387.
- [17] CHURCH,E.L., VORBURGER,T.V., WYANT,J. C. Direct comparison of mechanical and optical measurements of the finish of precision machined optical surfaces. *Opt. Engineering*, may-june 1985, vol.24, no.3, p.388-395.
- [18] ANGELSKY,O., MAKSIMYAK,P. Optical diagnostics of slightly rough surfaces. *Applied Optics*, jan. 1992, vol.31, no.1, p.140-143.
- [19] CHURCH,E.L., ZAVADA,J.M. Residual surface roughness of diamond turned optics. *Applied Optics*, aug. 1975, vol.14, no.8, p.1788-1795.
- [20] VARNIER,F., RASIGNI,M., RASIGNI,G., PALMARI,J., LLEBARIA,A. Height and slope distributions for surfaces of rough metallic deposits. *Applied Optics*, oct. 1982, vol.21, no.20, p.3681-3684.
- [21] STOVER,J., CADY,F., SKLAR,E. Measurement of low angle scatter. *Opt. Engineering*, may-june 1985, vol.24, no.3, p.404-407.
- [22] NIKOLIĆ,P., RAKOVIĆ,D. *Elektrotehnički materijali*. Naučna knjiga, Beograd, 1987.
- [23] HODGMAN,C., WEAST,R., SELBY,S. *Handbook of chemistry and physics*. 41. edition, Ohio, 1959/60.
- [24] PALIK,E. *Handbook of optical constants of solids*. Academic Press, New York, 1985.
- [25] SOLUNIN,V., GURSKY,B. Optronic missile guidance systems: accuracy, low signature and simplicity. *Military Parade*, 1999, no.1, p.36-37.

Rad primljen: 10.7.2000.god.