

UVID U MODERNE OPTIČKE TANKE SLOJEVE

Dr. Petar Vretenar, "ZRAK-CIR", A. Buće 96, 71000 Sarajevo

1. UVOD

Optika tankih slojeva je od prvih saznanja izrasla u modernu naučnu disciplinu bez koje druge naučne grane danas ne bi mogle ekzistirati. Obzirom da je predmet njenog izučavanja svjetlostni zrak, savremena optika tankog sloja izučava pojave i efekte koji se u sredinama sa dimenzijama reda veličine talasne dužine svjetlosnog zraka odigravaju pri upadu svjetlosnog snopa. Razvoj optike tankog sloja je usko vezan sa razvojem optike i drugih nauka a prije svega fizičkih, hemijskih i tehnoloških.

Međutim, može se smatrati da optika tankog sloja svoj pravi početak datira od radova Augustina Žaka Frenela (1788-1827), koji je serijom teoretskih radova dao osnove nove moderne naučne discipline. Njegova teorija se zasniva na talasnoj teoriji svjetlosti i poslužila je za potpuno objašnjenje korpuskularne teorije. Suština njegovog istraživanja sastojala se u sintezi Hajgensove ideje o formiranju talasnog fronta u obliku sfernih talasa i njihovoj interakciji na principima interferencije Junga. Posebno su značajni Frenelovi radovi i utvrđene zakonitosti interferencionih, polarizacionih i difrakcionih pojava u raznim optičkim sredinama a prije svega u kristalima.

Frenel je također dao značajan doprinos proučavanju zakonitosti promjene indeksa prelamanja optičkih materijala u zavisnosti od promjene talasnih dužina svjetlosti, uzimajući pritom Košijev kriterijum kao polaznu osnovu. Iako je u odnosu na prve radove Frenela proteklo 150 godina danas je još uvijek u optici tankog sloja Frenelova teorija osnovno polazište svih modernih teorija optičkog tankog sloja. Ove teorije su izvršile dogradnju u smislu novih saznanja na polju optike, osobina materijala i koriste savremene matematičke metode.

Niz autora prije svega G. Has, Dubrovolski, Frankombe, Auwerter, Abeles, Telen, Ginmajster, Kard, Furman, Vlasov, Krilova, Knittl, Rozenberg, Kinel, Riter, Maclead, Seely, Born, Wolf je tokom poslednjih decenija dalo značajan doprinos razvoju teorije optike tankog sloja na principima Frenelove i Maksvelove teorije. Njihovi teoretski i eksperimentalni radovi doprinjeli su da se i najsloženiji problemi tehnologije tankog sloja uspješno rješavaju.

Razvoj teorije je pratio i razvoj tehnoloških postupaka za realizaciju optičkih tankih slojeva. Osnovna tehnika za realizaciju optičkih tankih slojeva je nanošenje tankih slojeva u visokovakuumskim uređajima. Ograničenost izbora materijala sa odgovarajućim osobinama uslovio je razvoj i drugih tehnologija nanošenja tankih slojeva, prije svega hemijskih i elektrohemijskih.

Razvoj složenih optičkih sistema u oblasti mjerne tehnike, naučno istraživačke opreme i specijalne namjene, vojne i industrijske primjene uslovio je vrlo dinamičan istraživačko-razvojni rad vrlo velikog broja različitih optičkih tankih slojeva. Također je prodor primjene ultra-violetnog, infracrvenog i laserskog svjetla pred optiku tankog sloja postavio niz problema koji se moraju rješavati.

Broj materijala za optičke tanke slojeve se stalno povećava. Pored određenog broja metala, zastupljeni su u velikoj mjeri fluoridi, oksidi i sulfidi, a za specijalne namjene, selenidi, teluridi i specijalne legure. Obzirom na sve složenije tankoslojne konfiguracije kod kojih učestvuje veći broj materijala i zahtjeve za kvalitet, koji uslovljava obradu podloge izuzetnog nivoa, optika tankog sloja mora rješavati složene probleme sa područja fizike i hemije površina te međusobnog djelovanja materijala sloja manifestovanih procesima atezije, adsorpcije, difuzije, strukture materijala i efekata koji otuda proizilaze.

Pored modernih matematičkih metoda vektorskog, simboličnog, matričnog i numeričkog računa uz primjenu savremene računarske tehnike, optika tankog sloja se služi savremenim mjernim metodama za kontrolu procesa realizacije sloja i kvaliteta koji je zadan konstrukcionom dokumentacijom.

Razvoj optičkih tankih slojeva u Jugoslaviji u značajnijem obimu datira od 60-tih godina i uglavnom je pratio potrebe optičke industrije. Pored V. Simića i Z. Marinkovića iz Beograda, koji su ostvarili prve istraživačko-razvojne rezultate, desetak godina kasnije se u tri naša centra formiraju kadrovi i stiču uslovi za ozbiljniji rad na području optičkih slojeva. Tako su bili nosioci istraživanja i razvoja u Sarajevu Vretenar, Kinčić, Mandić, Rističević i Zukić, u Ljubljani Vrenko, Švajger i Lindav i Zagrebu Peršin, Švenda i Zorc. Danas u RO "ZRAK" i RO "ISKRA" CEO su formirane moderne istraživačko-razvojne laboratorije i zaposlen veći broj mladih i talentovanih kadrova koji postaju nosioci istraživanja i razvoja optičkih tankih slojeva.

2. Projektovanje i izrada automatske linije pranja za fazu pripreme elemenata za sloj

Optički tanki slojevi mogu se uspješno realizovati samo ukoliko je podloga bezprekorno čista. Pored mehaničke čistoće u klasičnom smislu treba posebno voditi računa o hemijsko čistoj površini. Pranje optičkih elemenata, obzirom na učešće velikog broja različitih materijala kako sirovinsko tako i tehnoloških, predstavlja ozbiljan problem u optičkoj proizvodnji. Projektovanje tehnološkog postupka za konkretan

slučaj optičke sirovine je relativno lako rješiv. Međutim, uspostavljanje automatske linije pranja optičkih elemenata u procesu proizvodnje, gdje se obrađuje veliki broj različitih materijala, je vrlo složen. Korišćenje poluautomatskih linija pranja na bazi ultrazvučnih kada u takvoj proizvodnji zahtjeva: veliki broj kada sa različitim sredstvima pranja, utvrđivanje optimalnog izbora organskih i neorganskih sredstava pranja za konkretan optički materijal, definisanje optimalnog vremena pranja elemenata, pranja u pojedinom sredstvu, utvrđivanje redosljeda djelovanja sredstava pranja na optičke elemente, optimiziranje temperature razlagača i sredstava pranja, te sprečavanje termo šokova, koji se mogu pojaviti pri prenosu alata sa elementima iz jedne kade u drugu, konstrukciju i izradu nosača za različite oblike elemenata koji će obezbjeđiti pristup sredstava pranja površini elementa, a da ovi pri tome ne ispadaju sa alata, hemijsku neutralizaciju polirane površine kako naknadno hemijska sredstva za pranje nebi vršila oštećenja optičkih elemenata.

3. Istraživanje tankih slojeva sa specijalnim zahtjevima

Razvojem optoelektronskih sistema kod kojih su funkcionalne karakteristike višestruke i raznolike postavljaju se zahtjevi sa nizom specifičnosti za tankoslojne komponente optičkog sistema. Specifičnosti mogu biti različite, a baziraju se na:

- spektralnim karakteristikama sloja
- energetskom postojanošću
- električnim parametrima
- mehaničkoj rezistentnosti
- hemijskoj rezistentnosti

Pri tom sve druge karakteristike sloja treba da zadovolje uslove koji su definisani standardima za tanko slojne komponente.

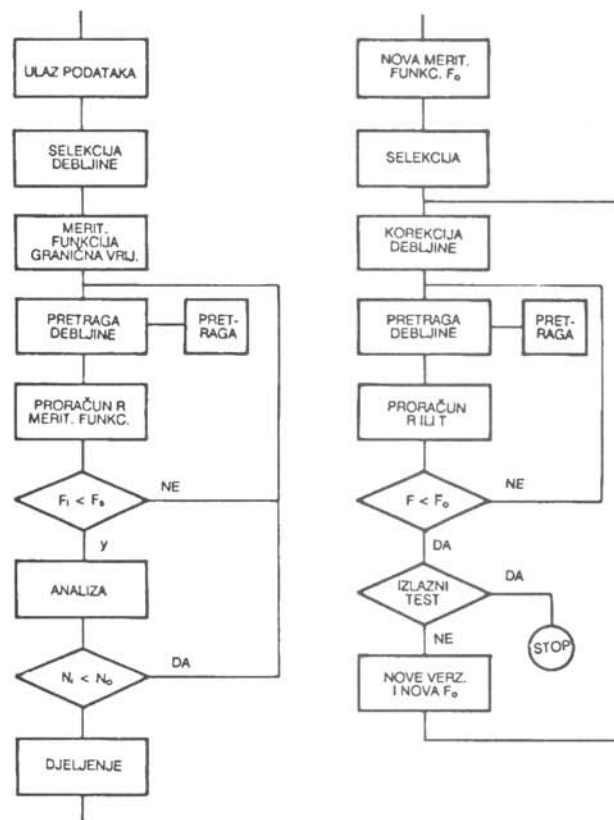
Specijalni zahtjevi spektralnih karakteristika se danas mogu smatrati oni slučajevi optičkih tankih slojeva koji se rijetko javljaju u praksi i teško su ostvarljivi kako u fazi teoretskih razmatranja tako u fazama tehnološke realizacije i mjerenja kvaliteta zadanih parametara. Kao primjer takvih specijalnih slojeva mogu se navesti:

- uskopojasni interferencioni filtri
- širokougaoni djelitelji spektra
- djelitelji spektra za tri i više spektralnih područja
- ogledala za UV oblast
- ogledala sa enormno visokom refleksijom
- supertvrđi slojevi
- elektrozagrevni transparentni slojevi

Svaka grupa slojeva zahtjeva poseban pristup kako teoretskih tako i tehnoloških aspekata problema. Teoretsko razmatranje polazeći od zahtjeva sloja razrješava pitanja izbora materijala, unosi osnovne odrednice o strukturi sloja, raspodjeli materijala, nanetim debljinama i utvrđuje osnove kontrolnih postupaka zadanih parametara sloja. U prvoj fazi rada na osnovu

iskustva i teoretskih postavki vrši se dizajniranje tankoslojne strukture. U ovisnosti o vrsti problema kojeg treba riješiti odabira se neka od modernih metoda programiranja tankih slojeva. Sastavlja se program koji prati promjenu zadanog parametra od karakteristika koje su definisane izborom materijala i tehnologijom realizacije sloja. Broj parametara je znatan te se program radi najčešće na bazi datoteke podataka koja u sebi sadrži sve neophodne podatke o optičkim i drugim vrijednostima koje karakterišu materijal, rasporedu podslojeva, debljinama, korakom izmjene i druge neophodne parametre. Optimiziranjem se postiže da tražene vrijednosti budu dostignute u granicama dozvoljenih odstupanja. Nakon teoretskog rješavanja vrši se i eksperimentalna provjera, a ukoliko su odstupanja veća od dozvoljenih ponovo se sloj optimizira.

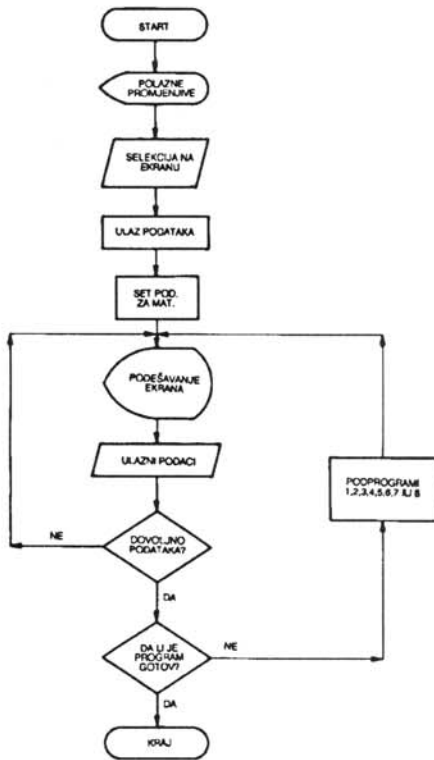
Na slikama 1-3 dati su osnovni principi programiranja optičkih tankih slojeva sa multiplnom strukturom i optičkim debljinama različitim od $\lambda/4$.



Slika 1. Šema blok dijagrama metode proračuna sloja

Na slikama 2 i 3 prikazani su osnovni program proračuna složene tankoslojne strukture, koji sadrži 8 podprograma:

- Podprogram 1: Definisanje liste (svaka vrijednost A, B, C, D)
- Podprogram 2: Planiranje rezultata
- Podprogram 3: Proces simulacije programa varijacije optičkih karakteristika (transparencija, refleksija)



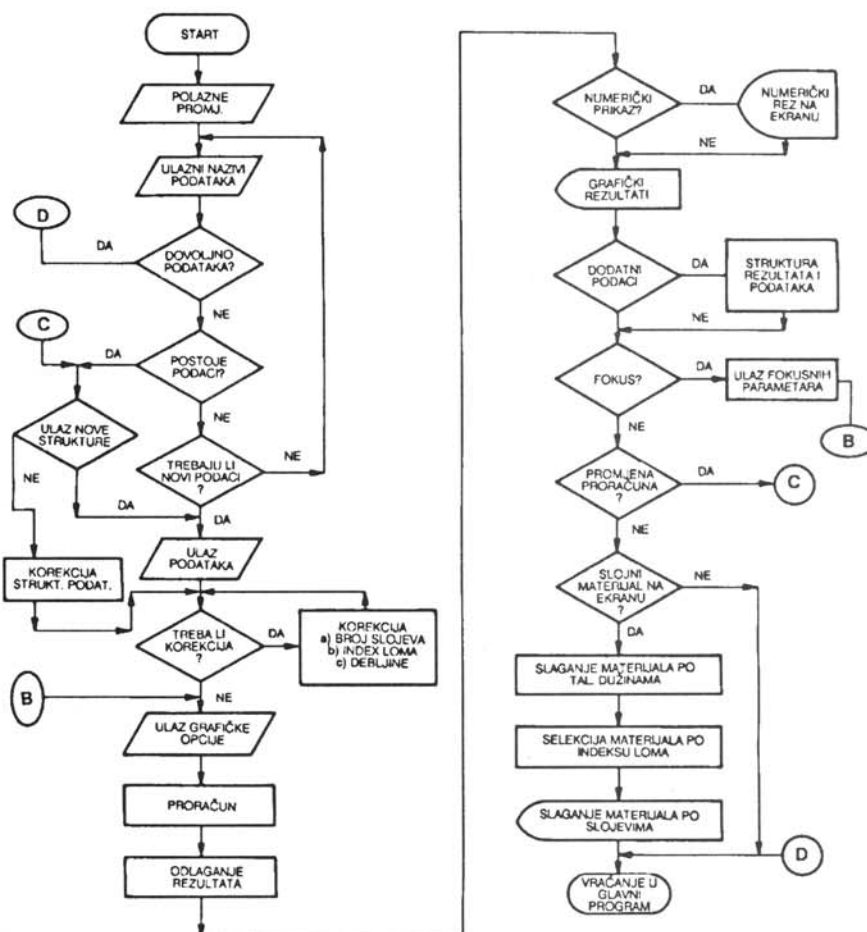
Slika 2. Osnovni program

- Podprogram 4: Analitički program određivanja promjena refleksije, transparencije ili optičke gustine u funkciji talasnih dužina.
- Podprogram 5: Analitički program izmjene talasnih dužina
- Podprogram 6: Lista podataka optičkih tankoslojnih materijala.
- Podprogram 7: Niz brojeva i tačaka koji povezuju podprogramme 3, 4 i 5.
- Podprogram 8: Podaci o strukturi sloja i utvrđivanje formata za ulazne podatke.

Od navedenih podprograma najsloženiji oblik ima podprogram 4 kojim se vrši analiza sloja.

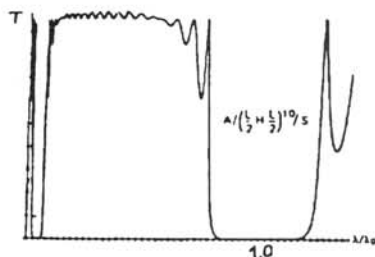
U osnovi program treba da sadrži slijedeće vrijednosti i podatke:

- vrijednosti indeksa prelamanja upadne sredine i supstrata na kojem je sloj realizovan (n_0 , n_s)
- broj podslojeva u slojnoj strukturi (N)
- za svaki podsloj i ($i = 1, 2, \dots, N$) indeks prelamanja, debljinu podsloja izraženu preko fazne debljine (Δ_i), ugao upada i odgovarajuću talasnu dužinu.
- niz od ukupno M talasnih dužina i način njihove izmjene u programu, utvrđivanje referentne dužine, donje granice talasnog područja, gornje granice spektralnog područja, talasne dužine ili područja minimuma odnosno maksimuma refleksije ili transparencije.



Slika 3. Analitički podprogram

- definisanje koraka promjene upadnog ugla i granice promjene ugla upada.
- upadni uglovi za svaki podsloj u funkciji indeksa prelamanja i početnog upadnog ugla, efektivne faze debljine.
- efektivne indekse prelamanja koji proizlaze iz partikularnih komponenti polarizacije.
- matricne proizvode i karakterističnu matricu za svaki podsloj.
- promjene i ukupne refleksije i transparencije za partikularne komponente polarizacije.
- štampanje podataka za sloj, rezultata i grafika.



Slika 4. $T = f(\lambda)$ sloja $(H/2 L/2)^{10} S$

Multipletna dielektrična ogledala su našla primjenu u laserskoj tehnici. Totalno lasersko ogledalo sa refleksijom iznad 99.8 % i poluogledalo sa refleksijom od 60-80 % se realizuju na bazi dielektričnih materijala. Posebno se kod ovih ogledala mora voditi računa o energetske postojanosti na udar laserskog zračenja. Ispitivanja su pokazala da ogledala tipa $(LH)^N$ nisu najpogodnija zbog relativno velikog skoka faze na granici između L i H podslojeva. Stoga se u realizaciji ogledala za visokoenergetske lasere pribegava strukturi sloja koja se može predstaviti kao $(LSH)^N$ gdje je S - podsloj sa srednjim indeksom prelamanja. Pri izboru materijala vodi se računa da između podslojeva nema difuzionih procesa. Obzirom da su dielektrična ogledala konstruisana na bazi velikog broja podslojeva, tada treba imati u vidu da napetost tankoslojnih materijala ima veliku ulogu na kvalitet. Naročito je nepovoljno kada su naponi oba materijala ili kompresivni ili pak izrazito tenzilni. Tada se ukupan napon u tankoslojnoj strukturi umnožava i djeluje u jednom pravcu što dovodi do rasturanja tankoslojne strukture. Povoljnije kombinacije visoko-niskoindeksnih materijala su TiO_2/SiO_2 , ZnS/LaF_3 , Ge/SiO_2 , Ge/ZnS . Njihove karakteristike omogućavaju prekrivanje cijelog spektralnog područja. Za UV područje spektra pogodno je visokorefleksno ogledalo realizovati na bazi HfO_2/MgF_2 jer transparentnost ova dva materijala doseže do 200 nm.

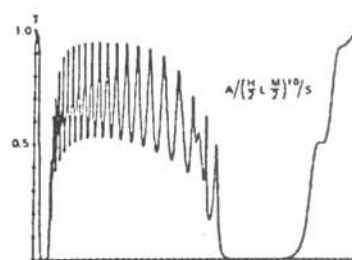
Intenzitetski djelitelji imaju osobinu da dio svjetlosnog snopa uniformno u spektralom području propuste, a preostali dio reflektuju pod nekim uglom. Podjela svjetlosti svodi se na odnos transparencije i refleksije. Odnos intenziteta propuštene i reflektovane svjetlosti može se kretati u opsegu 0.24 do 4 za odabrano spektralno područje.

Dihroični djelitelji svjetlosti razdvajaju ulazni svjetlosni snop po talasnim dužinama tako što jednu spektralnu oblast reflektuju, a drugu propuštaju maksimalno. Za realizaciju dihroičnih djelitelja svjetlosti uglavnom se koriste višeslojne strukture sastavljene od podslojeva visokog (H) i niskog (L) indeksa prelamanja. Broj podslojeva i njihove debljine zavise od problema koji se rješava tj. od spektralnih oblasti koje se razdvajaju i od vrijednosti refleksije i transparencije samog djelitelja.

Djelitelji svjetlosti našli su veliku primjenu u skoro svim savremenim optičkim uređajima. Ovi optički elementi primjenjuju se svugdje gdje je potrebno podijeliti i različito usmjeriti svjetlosne snopove u optičkim sistemima. Veoma važnu ulogu djelitelji svjetlosti imaju u optičkim mjernim uređajima.

Izgradnja modernih optičkih instrumenata više se i ne može zamisliti bez djelioca svjetlosti u njihovom sastavu, bilo da se radi o dihroičnim ili intenzitetskim djeliocima. Upotrebom ovih optičkih elemenata mnogo se postiglo na usavršavanju, povećanju kvaliteta, funkcionalnosti i univerzalnosti optičkih uređaja. Osnovni razlozi ugradnje djelitelja svjetlosti u optičke sisteme, sem naravno njihove funkcije da dijeli svjetlosni snop, ogledaju se u smanjenju dimenzija optičkih uređaja, smanjenju broja potrebnih optičkih pozicija, bržoj izradi uređaja i dr. Prednosti primjene djelitelja svjetlosti naročito dolaze do izražaja kod instrumenata koji rade u više spektralnih oblasti.

Na slici 5 je data kriva transparencije u slučaju upada svjetla pod uglom od 45° na planparalelnu pločicu za sloj tipa $A(H/2 L M/2)^{10} S$ gdje je indeks prelamanja mješanog sloja N jednak 1.65. Mješani sloj se može realizovati na bazi $TiO_2 + SiO_2$ na osnovu stehiometrijskog odnosa koji je određen sa indeksom prelamanja, gustom i molarnom koncentracijom komponenata koje učestvuju u njegovom formiranju.

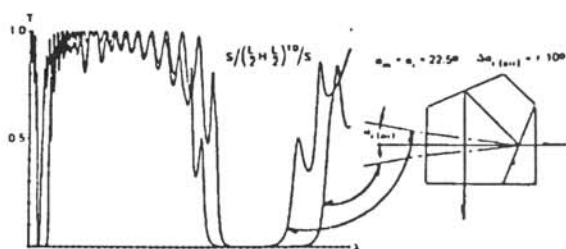


Slika 5. $T = f(\lambda)$ sloja $A(H/2 L M/2)^{10} S$ pri upadu svjetla pod uglom od 45°

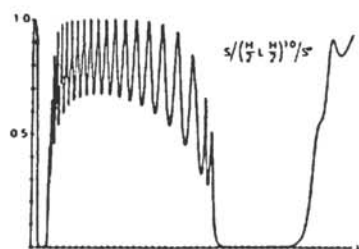
Ukoliko se oba ova sloja razmatraju kod djelitelja svjetla u obliku penta prizme, koja je slijepljena sa klin prizmom a slojna struktura nanijeta na katetu, tada je utjecaj polarizovane svjetlosti manji nego u prethodnom slučaju. Na slikama 6 i 7 date su spektralne krive transparencije slojeva tipa $S(L/2 H L/2)^{10} S$ i $S(H/2 L H/2)^{10} S$ pri upadu svjetla od $22.5 \pm 10^\circ$ odnosno pri upadu od 22.5° .

Znatno veći utjecaj polarizacije je prisutan pri upadu svjetla na površinu djelitelja pod uglom od $45 \pm 10^\circ$ kada svjetlost dolazi iz stakla na tankoslojnu strukturu u odnosu na upad iz vazduha. To se može zapaziti iz spektralnih krivih transparentnosti kod kubnog djelitelja spektra koje su date na slikama 6 i 7.

Utjecaj podloge na spektralnu raspodjelu multipletnog djelitelja svjetla je znatan ukoliko broj podslojeva nije velik. Međutim kod djelitelja sa velikim brojem parova nisko i visoko indeksnog materijala podloga nema bitnog utjecaja na spektralnu krivu. Spektralna raspodjela transparentnosti i refleksije uglavnom ovisi od ugla upada, debljine i broja podslojeva.



Slika 6. $T = f(\lambda)$ sloja $S(L/2 H L/2)^{10}S$ na djelitelju svjetla oblika penta prizme



Slika 7. $T = f(\lambda)$ sloja $S(H/2 L H/2)^{10}S$ i upadu svjetla od $22,5^\circ$

Amplitudni koeficijenti p i s polarizacije transparentnosti i refleksije u funkciji upadnog ugla za multipletni sloj na supstratu računaju se na osnovu relacija teorije optike tankog sloja.

U ponovljenom procesu optimizacije, koji rijetko kad nije neophodan, unose se novi podaci koji su registrovani pri eksperimentu a nisu saglasni sa ranije datim vrijednostima. Proces se ponavlja dok se eksperimentalni rezultati ne usaglase sa projektovanim vrijednostima. U drugoj fazi se vrši detaljna provjera parametara realizovanog sloja. Mjerenjem spektralnih, termičkih, mehaničkih, klimatskih, energetskih i hemijskih osobina utvrđuju se uslovi eksploatacije optičkog tankog sloja. U slučaju kad je naglašen parametar, koji nije samo spektralno bitan, neophodno je istražiti nove tehnološke postupke, koji omogućavaju, da se postavljeni zahtjev ispuni. Tako na primjer u slučaju super tvrdih slojeva nije neophodna matematička optimizacija sloja ali je vrlo bitno

utvrditi niz tehnoloških uslova koji omogućavaju da se realizuje kvazi diamantna struktura u procesu jonsko-plazmenog nanošenja ugljeničnog sloja na podlogu. Upotreba računarske tehnike u optici tankog sloja je nezaobilazna, bilo da se projektuje nova slojna struktura bilo da se vrši simulacija tehnoloških postupaka ili ispitivanje funkcionalnog uticaja nekog od konstruktivnih parametara multipletne tankoslojne strukture.

Usljed pooštrenih kriterijuma realizacije u novom spektralnom području ili traženja alternativnih rješenja za već postojeće tanke slojeve, vrši se istraživanje i razvoj novih optičkih tankih slojeva. Pravci istraživanja i razvoja mogu biti u području UV do srednje infracrvene oblasti spektra. Problemi koje treba rješavati su diktirani vrstom sloja. U UV oblasti slojevi imaju izrazito male debljine dok su u IC oblasti debljine znatne. U oba slučaja je rješenje postavljenih zahtjeva otežano zbog ograničenog broja transparentnih materijala za datu spektralnu oblast. Savremena rješenja optičkih elemenata i sistema zahtjevaju od tankoslojne tehnologije, da vode računa o geometriji i funkciji optičkih elemenata sa slojem u smislu eliminisanja hromatskih, polarizacionih i drugih efekata. To često onemogućava da se za određene optičke elemente sa složenom funkcijom tanki slojevi nanose na uobičajeni način, nego je neophodno razviti posebno rješenje za svaki slučaj.

Rješenje zadanih spektralnih osobina sloja u dvije pa i tri oblasti spektra je poseban problem. Teoretska analiza treba da dá dozvoljenu tehnološku sigurnost koja će omogućiti neophodnu reproduktivnost u proizvodnji. U ovim slučajevima su nanijeti podslojevi uglavnom "faznog" tipa tj. debljine slojeva su različite u odnosu na četvrtinu talasne dužine i njihove promjene znatno utiču na spektralnu raspodjelu. Pri optimiziranju slojnih struktura uglavnom se koriste moderne matematičke metode kao što su metoda najmanjih kvadrata ili Monte Karlo metoda. Teoretska razmatranja su utoliko efikasnija ukoliko su podaci sa kojima se vrši analiza bliži vrijednostima koje proističu iz primjenjenih tehnoloških postupaka. Stoga je u sistematskom pristupu problematici optičkih tankih slojeva neophodno ostvariti datoteku sopstvenih podataka za tankoslojne materijale koja poističe na bazi postojećih tehnologija u okviru proizvodnog pogona. Pored sopstvenih podataka mogu se uspješno koristiti i literaturni podaci ako baziraju na ekvivalentnom tehnološkom postupku ili pak ako je takav postupak ostvariv nakon izvršene optimizacije. Razvoj novih slojeva je usmjeren na sve dosadašnje vrste slojeva: AR, ogledala, filtre, djelitelje snopa i u cijelom spektralnom području od $0,2 - 15 \mu\text{m}$.

4. Tehnološka poboljšanja realizacije tankih slojeva

Na području optičkih tankih slojeva je dominantna tehnologija nanošenja sloja isparavanjem materijala u visokom vakuumu. Poboljšanje tehnologije rada se ostvaruje u nekoliko bitnih stavki:

- isparavanje materijala
- automatizacija procesa nanošenja sloja
- realizacija atmosfere recipijenta sa visokim stepenom čistoće.

Isparavanje materijala je bitan činilac tankoslojne tehnike. Gustina atomskih odnosno molekulskih para isparenog materijala, geometrija gustine isparenog materijala, energija isparenih čestica, jonsko stanje materijala i brzina kretanja čestica diktiraju kvalitet sloja i njegovu distribuciju na nosaču optičkih elemenata. Izbor isparivača uslovljava stabilnost procesa i njegovu reproduktivnost. Danas su proizvođačima tankih slojeva na raspolaganju veliki broj različitih termičkih isparivača i vrlo stabilni elektronski topovi pomoću kojih se nanose teško isparljivi materijali. Upotreba dva isparivača istovremeno u jednom ciklusu omogućava realizaciju mješanih slojeva sa indeksom prelamanja čija je vrijednost između dvije polazne vrijednosti za pojedinačne materijale. Isparavanjem nisko indeksno i visoko indeksnog materijala u određenim stehiometrijskim odnosima omogućava realizaciju niza varijanti sa konstantnom vrijednošću indeksa prelamanja ili pak nanijeti sloj ima gradijentnu raspodjelu indeksa prelamanja. Gradijentna raspodjela indeksa prelamanja se realizuje ukoliko se stehiometrija u toku procesa nanošenja mijenja u zadanom odnosu. Ovo daje niz sasvim novih mogućnosti realizacije optičkih tankih slojeva.

Kontrola procesa nanošenja materijala je značajan faktor za ostvarenje sloja sa vrlo strogom definisanom debljinom. Primjena kvarcne vage visoke stabilnosti i mogućnost višestruke zamjene mjernih kvarcnih pločica daju pouzdanost procesa kontrole u granicama od 2 %. Mjerenja kvarcnim mjeracima debljine su naročito pouzdana pri kontroli nanošenja sloja metala. Ukoliko je proces standardan sa tehnološkog aspekta tada se putem baždarenja koje je naročito potrebno pri većem broju ciklusa i realizaciji slojeva većih debljina, mogu reproduktivno pratiti debljine nanijetog materijala. Ugradnja sistema difrakcionih rešetki u optički mjerac debljine umjesto ranije korištenih interferencionih filtera poboljšala se monohromatičnost svjetlostnog izvora sistema za kontrolu optičke debljine sloja. Također se putem infracrvenih prijemnika zračenja mogu pratiti debljine nanijetih slojeva u bliskoj i srednjoj infracrvenoj oblasti spektra. Ugradnjom lasera (He-Ne, Ar i CO₂) kao izvora svjetla u mjernom sistemu kontrole debljine sloja u dobroj mjeri se odstranjuju negativni efekti koji su izazvani sekundarnom svjetlošću sa izvora isparavanja. Tačnost optičkih metoda kontrole debljine sloja je ovim poboljšanjima dosegla do 3 %.

Automatizacija nanošenja sloja putem mikroprocesora eliminiše subjektivne greške operatora i omogućava istovremeno praćenje velikog broja tehnoloških parametara. Uvođenjem računarske tehnike na opremu za proizvodnju optičkih tankih slojeva tehnološki proces se praktično približava projektovanom sloju na osnovu teoretskih razmatranja i iskustvenih tehnoloških podataka. U novije vrijeme zapažena je sve češća

primjena tehnologije katodnog raspršivanja. Ono se prvenstveno primjenjuje na ravne optičke površine i mikrooptičke elemente. Međutim, naročito u posljednjim godinama dolazi do izražaja naparavanje materijala uz jonizaciju gasova u recipijentu.

Realizacija tankih slojeva u plazmi omogućava vrlo rezistentne tanke slojeve a da se pri tom ne mora vršiti grijanje substrata. Obzirom da se katodno rasprašenje može samo izuzetno koristiti u tehnologiji nanošenja optičkih tankih slojeva (mikro optika, filteri, modulatori), jonsko naparavanje u znatnoj mjeri povećava postojeće kapacitete za nanošenje sloja.

5. Razvoj i primjena savremenih metoda kontrole kvaliteta optičkih poliranih površina

Nivo kvaliteta poliranih optičkih površina doseže vrijednosti od nekoliko molekulskih granula tj. do reda veličine od 0.5 nm. Kontrola poliranih površina obuhvata tri osnovna parametra:

- analiza mikroneravnina površine odnosno rasprašenja svjetlosnog zraka sa polirane površine
- planitet ili sferičnost obrađenih površina
- mikrohemijsku čistoću površine.

Kontrola mikroneravnina površine je vrlo značajna kod optičkih elemenata koji se ugrađuju u laserske sisteme ili kod elemenata koji vrše višestruku optičku funkciju. Do skora se optičkim poliranjem uglavnom postizao nivo kvaliteta polirane površine od oko 15-20 nm. Primjenom višefazne obrade specijalnih tehnoloških materijala nivo kvaliteta se stalno popravljao, tako da je danas uobičajena tolerancija mikro neravnina površine ispod 10 nm. Analiza optičkih problema, koji su vezani za mikroneravnine površine, ukazuje da se greška obrade površine umnožava nakon nanošenja tankih slojeva. Ovo dovodi do povećanja difuzne refleksije koja pored toga što unosi gubitke ima kao povratna svjetlost ometajuće osobine u odnosu na funkciju optičkog sistema. Kod optoelektronskih uređaja rasuta svjetlost izaziva povećane šumove u prijemniku zračenja.

Mjerenje mikroneravnina površine može se izvršiti na specijalnom uređaju projektovanom za tu namjenu ili pak spektrofotometrijskim metodama mjerenja. Spektrometrijske metode omogućavaju mjerenja mikroneravnina površine u granicama od 2 nm.

Planitet i sferičnost obrađenih površina kontrolišu se interferencionim metodama. Primjenom lasera kao izvora monohromatske svjetlosti kontrast interferencione slike je poboljšan. Savremenim izvedbama planimetara i interferometara za kontrolu sfere moguće je pratiti nivo kvaliteta površine u granicama od 0.05 Njutnova prstena.

Polirana površina nakon operacije pranja može biti onečišćena raznim agensima. Pored ostataka smole, poliranih sredstava polirana površina je vrlo aktivna u

odnosu na atmosferu te absorbuje gasove iz atmosfere. U nekim slučajevima dolazi do hemijskog vezivanja primjesa na površini optičkog elementa u vidu lokalnih oštećenja površine. Najčešće ovakve greške nisu uočljive ni pod mikroskopom te je za identifikaciju primjesa na površini neophodno koristiti moderne metode analize površine. Najčešće se koristi Ožeova spektroskopija, rentgenska mikroanaliza, sekundarna jonizaciona masena spektroskopija, skanirajuća spektroskopija. Ove metode omogućavaju analizu sastava površinskog i pri površinskog sloja, strukturu materijala, koncentraciju primjesa, način vezivanja primjesa za poliranu površinu. Poteškoća u primjeni navedenih metoda se sastoji u tome da se supstrati moraju posebno pripremiti za analizu površine tako da metode nisu pogodne za praćenje serijske proizvodnje.

6. Razvoj i primjena mjernih metoda za kontrolu parametara optičkih tankih slojeva

Pored spektralnih karakteristika tankih slojeva koje se određuju spektrofotometrijskim metodama neophodno je izvršiti mjerenje i drugih parametara koji karakterišu kvalitet sloja. Tako se naročito u posljednje vrijeme sa povećanom pažnjom kontrolišu: mikrotvrdoća, naponi, rasijavanje svjetlosti, atezivnost, energetska postojanost i klimomehanička postojanost tankih slojeva.

Defekti na sloju se kontrolišu u skladu sa standardima koji definišu kvalitet optičkih tankih slojeva. Za provjeru čistoće povoljnije je optičke komponente sa nanijetim slojem kontrolisati u difuznoj svjetlosti. U te svrhe se mogu koristiti projektori kao izvori svjetla. Ispred projektora postavlja se crni ekran na kojem je ostavljen otvor od opal materiala za prolaz svjetla. Veličina otvora je identična sa prečnikom objektiva. Optički elementi i oko kontrolora se u odnosu na svjetlosni zrak podešavaju pod uglom od oko 30° . Rasuto svjetlo sa površine optičkog elementa se može kontrolisati na više načina. Već je napomenuto da spektrofotometrijska metoda daje tačnost od 2 nm. Ukoliko se koristi metoda integralnog snopa onda se mjerenjem totalnog rasipanja može dostići tačnost od 0.2 nm. Mjerenja se vrše pod uglom koji ovisi od periodične strukture upotrebene difrakcione rešetke. Ukoliko se koristi metoda mikroskopskog diferencijalnog interferencionog kontrasta postiže se tačnost od 0.1 nm. Ova metoda je vrlo pogodna za kvantitativne i kvalitativne analize površine odnosno tankoslojne strukture. Slika dobivena mikroskopom može se prenositi na TV ekran što omogućava analizu mjernih grešaka.

Tvrdoća optičkih tankih slojeva se kreće u dosta širokom rasponu od 5×10^{-3} - 10^4 kg/mm². Pod pojmom makrotvrdoće treba smatrati raspon 5×10^2 - 10^4 kg/mm², mikrotvrdoće od 1 - 500 kg/mm² a ultra mikrotvrdoća doseže do 5×10^{-3} kg/mm². Savremene

metode mjerenja tvrdoće zasnivaju se na mjerenja poprečnog presjeka otiska ili po Vikersovoj ili po Knopovoj metodi. U oblasti ultramikro i mikro tvrdoće su prisutne plastične i elastične deformacije dok mjerenja makro tvrdoće prate samo plastične deformacije. Mjerenje veličine otiska se za područje ultramikro i mikro tvrdoće vrši metodom elektronsko-optičke mikroskopije, a u oblasti makro tvrdoće dovoljno je koristiti optičku mikroskopiju. Optička stakla imaju tvrdoću 400-600 Knoop jedinica što odgovara oko 150 kg/mm². Pri mjerenju se koristi prizma sa 172° i $30'$ longitudinalnim uglom odnosno 130° . Prizma je od poliranog diamanta. Prečnik prizme je do 500 μ m a uvećanje mikroskopa je oko 3000 puta.

Mjerenje napona u tankom sloju se vrši polarimetrijskom metodom. Osnovni problem je u razdvajanju uticaja supstrata tj. napona u supstratu od napona u sloju. Polarimetrijska mjerenja je najpogodnije vršiti metodom kompenzacije. Metoda koristi $\lambda/4$ kompenzacione pločice, a zasniva se na fotometrijskom određivanju transparencije u nepolarizovanom i polarizovanom svjetlu. Iz odnosa izmjerenih maksimalnih vrijednosti transparencije i vrijednosti transparencije pri "gašenju" svjetlosti utvrđuje se stepen napetosti u tankoslojnoj strukturi.

Mjerenje optičkih konstanti tankoslojnih materijala: indeksa prelamanja, apsorpcije materijala i disperzije indeksa prelamanja može se dosta pouzdano vršiti primjenom spektrofotometrijskih metoda. Za mjerenje indeksa prelamanja i koeficijenta apsorpcije metalnih slojeva se isključivo koristi elipsometrijska metoda. Tačnost obje metode mjerenja indeksa prelamanja je u granicama 2×10^{-3} . Prednost spektrofotometrijske metode je u tome što test pločice iz svakodnevne proizvodnje mogu bez dodatnih obrada da se koriste kao uzorci, dok u slučaju elipsometrijskih metoda je neophodno pri nanošenju sloja realizovati prag na supstratu radi utvrđivanja debljine sloja. Fizička debljina sloja se vrlo precizno može mjeriti profilometrom ukoliko sloj nije previše mek.

Klimatske karakteristike slojeva su različite. Metode kontrole otpornosti na vlagu, slanu maglu i slani rastvor su uglavnom standardne a nivo kvaliteta sloja kojeg treba dostići je u cijelosti propisan za svaki tip sloja.

Mjerenje energetskih karakteristika sloja u smislu otpornosti na energetski udar laserskog zračenja vrši se uglavnom za antirefleksne slojeve, ogledala, djelitelje snopa i filtere optičkih komponenti laserskih sistema, a prije svega na komponentama rezonatora laserskog izvora. Mjerenja se provode analizom grešaka koje se na površini elemenata javljaju pri dejstvu određenog broja impulsa odgovarajuće snage. Rezultati se izražavaju pragom razaranja tankoslojne strukture.

Pored ovih karakteristika kontrolišu se struktura sloja, stehiometrijski sastav i kinematika difuznih procesa koji se odvijaju u sloju a naročito na graničnim površinama između dva podsloja odnosno sloja i supstrata.