

POLPREPUSTNE HOLOGRAMSKE FOLIJE ZA ZAŠČITO DOKUMENTOV

Marta Klanjšek Gunde¹, Darijan Faktor², Miha Čekada³, Srečko Paskvale³,
Peter Panjan³, Barbara Sušin², Nina Hauptman¹, Mojca Friškovec²

ZNANSTVENI ČLANEK

¹Kemijski inštitut, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana

²Cetis, grafične in dokumentacijske storitve, d. d, Čopova 24, 3000 Celje

³Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Raziskali smo uklonsko strukturo polprepustnih hologramskih folij, ki se uporabljajo za zaščito dokumentov pred ponarejanjem. Na njih so razmeroma enostavni geometrijski vzorci. To so ploskve z ravnimi vzporednimi uklonskimi režami, kjer se menjavata polimer in snov z lomnim količnikom. Kotno odvisen videz takih ploskev je določen s periodo in smerjo uklonskih rež. Največja perioda rež je velikostnega reda valovne dolžine svetlobe. Strukture s krajšo periodo dajejo nižje rede uklonov, večjo kotno disperzijo uklonjene svetlobe in uklone pri večjih kotih. Take strukture imajo zelo izrazito in prostorsko stabilno mavrično barvo. V vseh primerih je uklonska struktura popolnoma zaprta v polimeru in ima razmeroma veliko defektov in nepravilnosti. Pokazali smo, da uklonsko strukturo polprepustnih hologramskih folij lahko analiziramo z optičnim mikroskopom, lastnosti uklonjene svetlobe pa izmerimo s spektrogoniometrom.

Ključne besede: hologramska folija, zaščita dokumentov, optično variabilne mikrostrukture, uklon, mavrične barve

Semitransparent hologram overlays for document security

ABSTRACT

Diffraction structure of semitransparent hologram overlays which prevents document forgery was analysed. The individual surfaces of simple geometrical designs have straight parallel diffraction slits made by alternation of polymer and material with sufficiently high refractive indices. Angular appearance of such surfaces depends on period and direction of the diffraction grooves. Diffraction period of all semitransparent overlays has a size of the wavelength of light. Structures with shorter period allow lower diffraction orders, stronger diffractive angular dispersion and higher diffraction angles. Such gratings show high angular separation between diffracted iridescent colours which is easier to observe by the naked eye. Diffractive grating of all analysed hologram overlays is completely buried into a polymer and has a rather high level of defects and imperfections. The diffractive structure of such overlays can be analysed by optical microscope while the properties of diffracted light could be measured by spectrogoniometer.

Keywords: hologram overlay, document security, optically variable device, diffraction, iridescent colours

1 UVOD

Optično variabilne mikrostrukture (*optically variable device*, OVD) spadajo med najučinkovitejše elemente za zaščito pred ponarejanjem in prenašanjem različnih dokumentov, tiskovin, produktov in embalaže [1]. Večina teh zaščitnih elementov temelji na uklonski strukturi, ki je vtisnjena v ustrezni nosilec (*diffraction optically variable image device*, DOVID). Take strukture dajejo jasno vidne optične učinke, ki jih je mogoče prepoznati s prostim očesom ob ustrezni osvetlitvi, po drugi strani pa jih je praktično nemogoče ponarediti z uporabo katere od sodobnih fotografskih tehnik z visoko resolucijo. Med

takimi zaščitnimi elementi so zelo pomembne tudi polprepustne uklonske optično variabilne folije DOVID [2]. Take folije pogosto imenujemo tudi polprepustne hologramske folije. Izraz je široko uveljavljen na področju zaščitnega tiska, zato ga uporabljamo tudi v tem članku.

Optično variabilnost hologramske folije omogoča uklonska struktura z razmeroma enostavno mikrostrukture, ki se iz nosilne folije prenese na dokument in z ustrezno zaščito zapre v večplastno strukturo končnega dokumenta. Taka uklonska struktura povzroča kotno odvisne mavrične barve slike oz. ornamenta, ki je na hologramski foliji, zaradi velike prepustnosti pa je v večini načinov opazovanja viden celotni prekriti dokument. Kakršno koli spreminjanje tako zaščitnega dokumenta bi poškodovalo uklonsko strukturo in spremenilo oz. poškodovalo uklonsko sliko, to pa bi se zaznalo s prostim očesom.

V zadnjem času so postale sodobne tehnologije dostopnejše, produktno znanje pa bolj razširjeno. To dokazujejo npr. dekorativne folije za zavijanje daril, ki vsebujejo uklonske in/ali interferenčne strukture in imajo podobne vidne učinke kot polprepustne hologramske folije. Pomemben vidik odkrivanja ponaredkov je torej tudi možnost uporabe ponarejene hologramske folije. Zato je treba vedno več in več raziskovalnih in razvojnih naporov usmerjati tudi v učinkovito odkrivanje pristnosti oz. ponaredka zaščitne hologramske strukture [3–5]. Treba je poznati metode, s katerimi bi lahko ugotovili, ali je hologramska struktura na dokumentu pristna ali ponarejena. Med metodami druge stopnje kontrole pristnosti dokumentov, kjer se uporabijo razmeroma enostavni pripomočki, je lahko zelo učinkovito spektroskopsko merjenje [1,6].

Namen naše raziskave je ugotoviti mikroskopsko strukturo polprepustnih hologramskih folij in pregledati, ali je mogoče z razpoložljivimi spektroskopskimi metodami izmeriti kotno odvisen videz.

2 UKLONSKE STRUKTURE

Optično variabilne snovi izrazito spremenijo videz v odvisnosti od kota osvetlitve in opazovanja. Take efekte lahko povzroči zrcalni odboj na optično gladkih površinah (npr. kovin), uklon svetlobe na uklonskih strukturah ali interferenca na tankih plasteh. Pomembna lastnost takih snovi in njihovih površin je velika urejenost. Optično neurejena snov daje difuzni odboj in od opazovanja neodvisen videz (barvo), urejena struktura pa vodi do posebnih svetlobnih učinkov, ki pri določeni periodi urejenosti vodijo do iridescence – mavričnih barv. Govorimo torej o barvah, ki jih povzroča urejena struktura snovi, to je o barvah t. i. brezbarvnih snovi oz. o strukturnih barvah [1]. Bela svetloba, s katero opazujemo take pred-

mete, omogoča interferenčne in uklonske pojave le, če največja značilna perioda snovi ni večja od koherentne dolžine svetlobe. Kadar je razlika poti žarkov, ki se odbijejo na različnih delih urejene strukture, daljša od koherentne dolžine svetlobe, namreč ne nastane interferenca, zato ni mavričnih barv. Ker je koherentna dolžina bele svetlobe nekaj mikrometrov, morajo imeti uklonske strukture periodo reda velikosti mikrometra. Enak pogoj velja tudi za debelino tankih plasti, ki dajejo interferenčne efekte. Če opazujemo debelejšje plasti in uklonske strukture z daljšo periodo, kot je koherentna dolžina svetlobe, torej ne opazimo barv.

Pri polprepustnih hologramskih folijah, ki se uporabljajo za zaščito dokumentov, opazujemo barve v odbiti svetlobi, zato jih obravnavamo kot odbojne uklonske strukture. Žarki, ki se odbijejo od posameznih rež na taki strukturi, se ojačijo, kadar je:

$$\sin \theta_i \pm \sin \theta_m = m \frac{\lambda}{p} \quad (1)$$

kjer je p razdalja med režami (perioda uklonske strukture), θ_i je kot vpadne svetlobe, θ_m kot uklonjene svetlobe, m red uklona ($m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$), λ pa valovna dolžina svetlobe. V gornji enačbi velja vsota sinusov, kadar sta vpadni in uklonjeni žarek na isti strani vpadne pravokotnice, sicer pa razlika [1,7].

Strukture s krajšo periodo dajejo uklone pri večjih kotih. Svetloba z večjo λ se ukloni pri večjih kotih. Čim manjša je perioda uklonske strukture p , tem manj uklonskih redov lahko opazimo.

3 VZORCI IN MERITVE

Da bi preverili osnovne lastnosti polprepustnih hologramskih folij, smo na prosojne folije, ki se uporabljajo za zaščito dokumentov, pripravili uklonske reže z različnimi debelinami med seboj vzporednih ravnih linij. Uporabili smo Nd:YAG-laser z valovno dolžino 1064 nm in izhodno močjo 10–30 W ter širino 8 μ m. Z ustreznimi parametri laserskega jedkanja smo pripravili ($1,1 \times 0,4$) cm velike kvadratne površine z ravnimi vzporednimi črtami v medsebojni oddaljenosti (100, 80, 60, 40 in 20) μ m. Po jedkanju smo folije polirali, da bi odstranili morebitne nepravilnosti. Dobljeno strukturo smo analizirali s profilometrom (Taylor Hobson Talysurf Series 2).

Analizo optičnih in strukturnih značilnosti komercialnih polprepustnih hologramskih folij smo opravili na nekaterih komercialno dosegljivih izdelkih OVD Kinegram® (Švica) in na strukturi Optoseal (Hologram Industries, Francija), ki je laminirana na vzorčnem dokumentu v prilogi monografije o metodah za zaščito dokumentov [1].

Osnovne lastnosti folij smo analizirali z optičnim mikroskopom Olympus BX50, s konfokalnim mikroskopom Zeiss Axio CSM700 in z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) na poljsko emisijo Karl Zeiss Supra 35 VP z analizatorjem EDS (Oxford INCA 400). Celotno odbojnost vzorcev smo merili v območju vidne svetlobe (400–700 nm) s spektrofotometrom Lambda 950 (Perkin Elmer) z integracijsko kroglo in s spektrogoniometrom MA98 (X-Rite). Pri obeh načinih meritve gre za osvet-

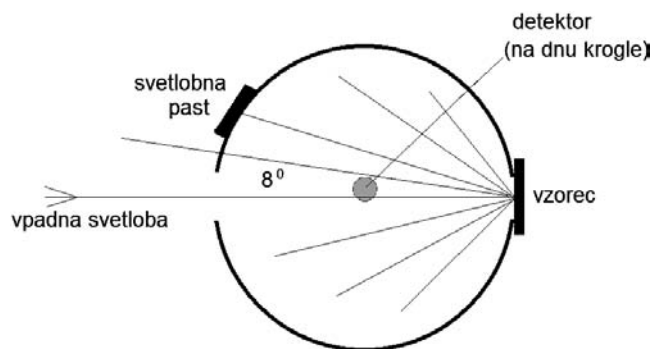
ljevanje z usmerjeno belo svetlobo, merska geometrija pa je različna.

Pri merjenju z integracijsko kroglo pade svetloba pod kotom 8° , integracijska krogla pa zbere svetlobo, ki se odbije v kateri koli smeri (**slika 1**). To geometrijo označujemo z $8^\circ/\text{di}$, kjer 8° pomeni vpadni kot svetlobe, »di« pa razpršeni odboj z vključeno zrcalno odbojnostjo (*diffuse, specular included*). Rezultat meritve je celotna odbojnost usmerjene svetlobe, ki pade na vzorec pod kotom 8° . Kadar je svetlobna past odprta, skozi odprtino izhaja zrcalno odbita svetloba, zato na detektor pada le svetloba, ki se difuzno odbije od vzorca. Tako geometrijo meritve označimo z $8^\circ/\text{de}$, kjer 8° pomeni vpadni kot svetlobe, »de« pa razpršeni odboj brez zrcalnega prispevka (*diffuse, specular excluded*).

Spektrogoniometer omogoča meritve usmerjene odbojnosti, pri katerih je vpadni kot različen od odbojnega. Take meritve se uporabljajo za analizo vzorcev s kotno odvisnim videzom. Nekaj takih lahko najdemo v naravi (nekateri hrošči, metulji, školjke bisernice ipd.), še več pa je delo človeških rok (posebne tkanine, folije, premazi s posebnimi efekti, tankoplastne strukture ...). Aparatura, ki smo jo uporabili, je namenjena merjenju premazov s kotno odvisnim videzom za avtomobilsko industrijo.

Mersko geometrijo spektrogoniometričnih meritev označujemo z navedbo dveh kotov, vpadnega in nezrcalnega kota (*aspecular angle*). Nezrcalni kot je tisti, ki ga odbita svetloba oklepa z zrcalnim kotom, pozitivna smer pa je kot običajno nasprotna smeri urnega kazalca. Spektrogoniometer MA98 ima sistem optičnih vlaken, ki omogoča dve smeri osvetlitve, 45° in 15° . Pri osvetlitvi 15° lahko merimo odboje pri nezrcalnih kotih 15° (kot 0°) in -15° (enako kotu 30°), pri osvetlitvi 45° pa pri nezrcalnih kotih -15° , 15° , 25° , 45° , 75° in 110° . Geometrije spektrogoniometričnih meritev zapišemo v obliki (XXasYY), kjer je XX kot osvetljevanja glede na vpadno pravokotnico, YY pa nezrcalni kot, kjer se detektira odbita svetloba. Vsi koti so v isti vpadni ravnini. Aparatura ima tudi možnost merjenja odbojev iz vpadne ravnine (zunajravninski odboji), vendar teh nismo uporabili.

Shema meritve je prikazana na **sliki 2**. Merilnik kalibriramo na črni in beli standard. Črni standard je odprtina prazne črne škatle, beli pa je po priporočilu proizvajalca gladka bela ploščica iz posebnega zelo odbojnega materiala, kar pomeni, da se pri meritvah upošteva zrcalni in razpršeni odboj.



Slika 1: Shematični prikaz geometrije meritve z integracijsko kroglo

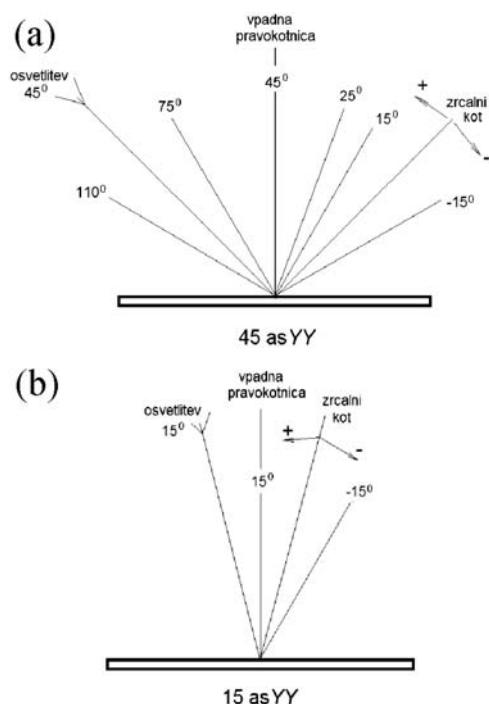
4 MERITVE IN REZULTATI

4.1 Uklonske reže, pripravljene z Nd:YAG-laserjem na prosojni foliji

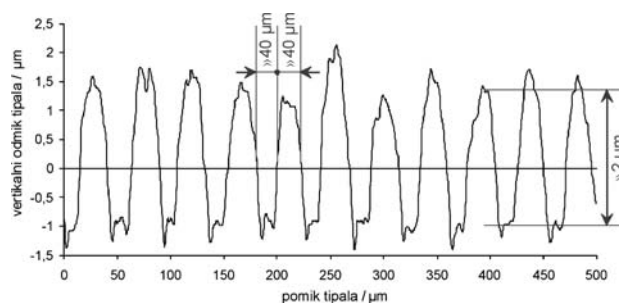
Analizirali smo površinski profil vseh lasersko graviranih vzporednih črt (uklonske reže). Linijski profil pri načrtovanem razmiku $40\ \mu\text{m}$, merjen pravokotno na črte, je prikazan na **sliki 3**. Podobne profile smo izmerili tudi na drugih vzorcih. Določili smo njihovo povprečno periodo, globino ter širino vrhov in vdolbin. Njihov pomen je označen na **sliki 3**, rezultati analize pa so zbrani na **sliki 4**. Vse gravirane linije so globoke dobra $2\ \mu\text{m}$ in imajo razmeroma dobro periodičnost. Večje odmike od načrtovane periode smo izmerili le pri vzorcu z načrtovanim razmikom graviranih linij $40\ \mu\text{m}$. Širina vrha linije je pri periodi nad $40\ \mu\text{m}$ približno $20\ \mu\text{m}$, širina dna zarez pa linearno narašča s periodo linij. Pri najmanjšem razmiku linij ($20\ \mu\text{m}$) sta širina vrha in vdolbine približno enaki in se razmeroma dobro ujemata s širino laserskega curka. Analiza površinskih profilov kaže, da je graviranje vzporednih uklonskih rež uspešno pri periodi nad $40\ \mu\text{m}$.

Analizirali smo tudi 3D površinski profil strukture. Za razmik linij $40\ \mu\text{m}$ je prikazan na **sliki 5**. Na spojih ploskev z različno smerjo gravure dobimo nazobčano strukturo, ki je najverjetneje posledica narivov laserja. Struktura gravur stran od spojev je brez večjih napak, komaj opazna valovitost pa je posledica ukrivljenosti podlage.

Gravirane strukture ne kažejo nobenih barv. Ker je perioda vseh struktur večja od koherenčne dolžine bele svetlobe, je tak rezultat mogoče pričakovati. Zato smo poskušali dobiti uklonsko sliko s koherenčno svetlobo. Uporabili smo rdeči laser (pointer), ki smo ga usmerili pravokotno na folijo, sliko pa smo gledali na belem zaslonu,



Slika 2: Shematični prikaz meritve s spektrogoniometrom MA98 pri vpadnem kotu 45° (a) in 15° (b). Vse smeri ležijo v vpadni ravnini.



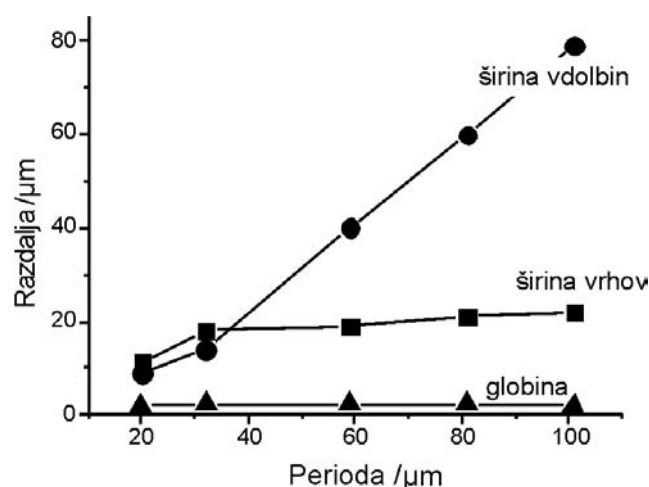
Slika 3: Linijski profil površine graviranih linij z načrtovanim medsebojnim razmikom $40\ \mu\text{m}$. Na eni od linij je označena perioda, globina gravure, širina vrha in širina vdolbine.

ki je bil vzporeden s folijo. Z nobeno od graviranih struktur nam ni uspelo dobiti dobro vidnih uklonov, pač pa praktično neprekinjeno črto v smeri pravokotno na zarez.

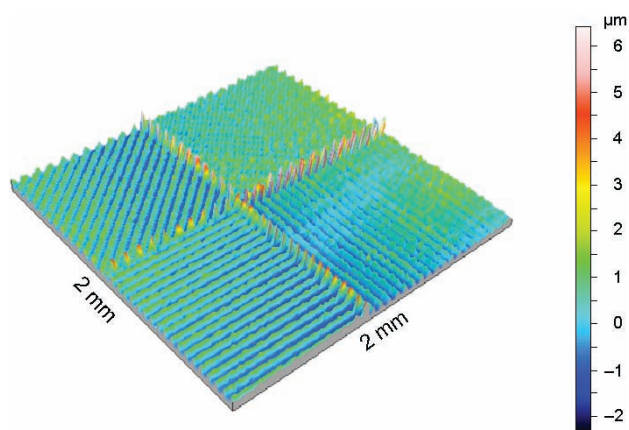
4.2 Hologramska folija OVD Kinegram®

Uporabljena folija je trak širine $3,6\ \text{cm}$, ki ima ob enem robu (2×2) cm velike ornamente. V beli svetlobi ob ugodnih opazovalnih razmerah (pravilno osvetljevanje in smer opazovanja) na ornamentih opazimo puščice mavričnih barv. Vsaka ploskev na ornamentu je enobarvna, njena barva pa se menja v odvisnosti od obeh kotov. Posamezni ornamenti so med seboj oddaljeni $3\ \text{mm}$. Sredina robu vsakega takega elementa je označena s $5\ \text{mm}$ široko orientacijsko oznako, ki pri izbranih pogojih opazovanja daje enobarvno uklonsko sliko (**slika 6**). Ta oznaka omogoča avtomatsko identifikacijo položaja ornamenta pri uporabi folije. Uklonski efekti (svetloba mavričnih barv) so najizrazitejši, če je vpadna ravnina vzporedna z orientacijsko črto; kadar pa je pravokotna nanjo, pa mavrične barve popolnoma izginejo.

Posnetki z optičnim mikroskopom kažejo ravne črte, ki so vzporedne z robom traku (**slika 7**). Posamezni deli, ki se kažejo kot ploskve različnih barv, imajo različno periodo uklonskih rež. S posnetkov na sliki razberemo, da je perioda puščice na **sliki 7** približno $3,2\ \mu\text{m}$, orientacijske črte pa $0,9\ \mu\text{m}$. Ker je takšna perioda krajša od koherenčne dolžine



Slika 4: Odvisnost povprečne globine ter širine vrhov in vdolbin od periode vzporednih linij, graviranih v folijo

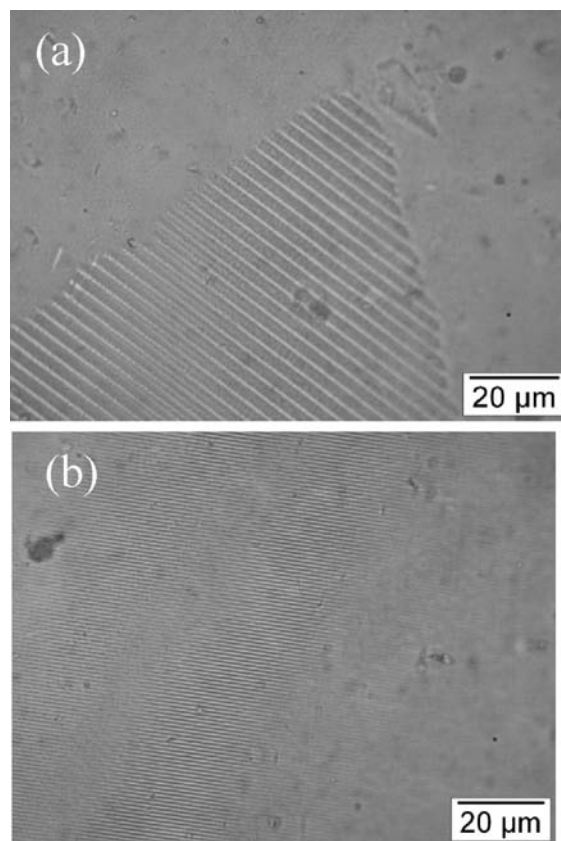


Slika 5: 3D-profil gravirane strukture vzporednih črt pri načrtovanem medsebojnem razmiku $40\ \mu\text{m}$

bele svetlobe, v beli svetlobi lahko opazimo interferenčne barve. Usmerjenost črt na hologramski foliji je razlog za smeri, v katerih se pojavljajo ukloni, torej različna barva uklonjene svetlobe. Ker se svetloba vedno uklanja pravokotno na strukturo, ki povzroča uklon, uklonske barve izginejo, kadar so reže vzporedne z vpadno ravnino [1,2].

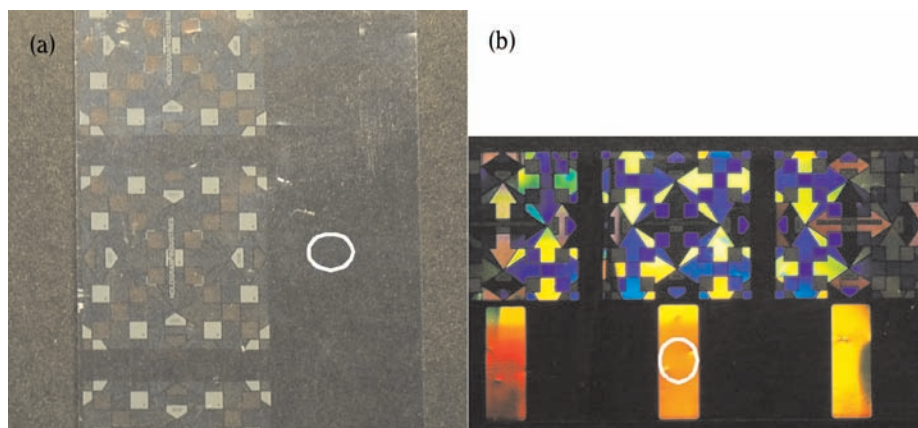
Povečava uklonske strukture, ki smo jo dobili z optičnim mikroskopom, kaže razmeroma veliko število defektov in nepravilnosti (**slika 7**). Take ali še večje nepravilnosti smo opazili tudi pri drugih vzorcih polprepustnih hologramskih folij. Pojav kaže, da imajo majhne nepravilnosti uklonske strukture zanemarljiv vpliv na kotno odvisne optične efekte.

Spektrogonometrično odbojnost orientacijske oznake smo izmerili v dveh pravokotnih vpadnih ravninah, v smeri uklonskih črt (pravokotno na smer oznake) in pravokotno nanje (vzporedno z oznako). Za podlago hologramske folije smo uporabili bel pisarniški papir. Vsi izmerjeni spektri so prikazani na **sliki 8**. V ravnini, ki je vzporedna z uklonskimi črtami, je odbojnost v vseh geometrijah majhna in praktično nima interferenčne strukture. Takšni spektri pomenijo, da je vzorec v vseh merskih geometrijah praktično brezbarven. Povsem drugače je, kadar je vpadna ravnina pravokotna na uklonske črte. Najsvetlejšo barvo (največjo odbojnost) dobimo v geometriji ($45^\circ\text{as}45^\circ$), kjer je zbrana rumena



Slika 7: Uklonska struktura na polprepustni hologramski foliji OVD Kinegram®: puščica na ornamentu (a) in orientacijska oznaka za pozicioniranje ornamenta (b)

svetloba. To svetlobo smo posneli tudi na fotografskem posnetku na **sliki 6b**. Izrazito vijolična svetloba se odbije pri ($45^\circ\text{as}25^\circ$), zelena z vrhom okoli $525\ \text{nm}$ pri ($45^\circ\text{as}75^\circ$), pri ($45^\circ\text{as}110^\circ$) pa razmeroma šibka svetloba modrozeleno barve z vrhom okoli $480\ \text{nm}$. Iz teh podatkov smo ocenili periodo uklonskih rež in red uklona (**tabela 1**). Ocena pokaže, da nastane svetloba z največjo intenziteto z uklonom prvega reda, druga dva pa sta uklona tretjega reda. Pri izračunu smo uporabili enačbo (1) in periodo, ki smo jo dobili z mikroskopskih posnetkov (**slika 7b**, $p = 0,9\ \mu\text{m}$).

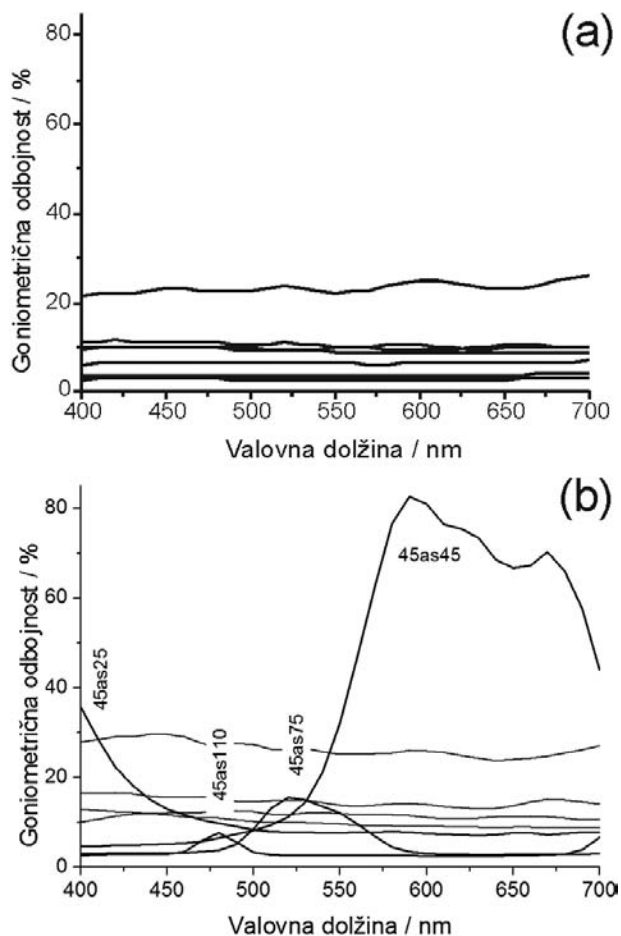


Slika 6: Fotografski posnetek analizirane polprepustne hologramske folije OVD Kinegram® v vzdolžni (a) in prečni vpadni ravnini (b). Uklonski efekti se pojavijo le pri eni smeri osvetlitve in opazovanja (b); če vzorec pri enakih pogojih zavrtimo za 90° , uklonska svetloba izgine (a). Mesto, kjer smo opravili spektralne meritve, je označeno z belim krogom.

Tabela 1: Preračun uklonov polprepustne hologramske folije OVD Kinegram®, ki jih dobimo iz spektrogoniometričnih meritev (**slika 8a**). Podana je oznaka geometrije, v kateri dobimo uklon, vpadni kot θ_i in uklonski kot θ_m . Z enačbo (1) izračunamo p/m , to je razmerje periode p in reda uklona m . Če privzamemo, da je $p \approx 900$ nm, dobimo tudi m .

geometrija	θ_i	θ_m	λ/nm	$(p/m)/\text{nm}$	m
45as45	45	0	590	834	1
45as75	45	-30	525	435	2
45as110	45	-65	480	298	3

Hologramsko folijo OVD Kinegram® smo analizirali tudi z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) in opravili EDS-analizo. Na SEM-posnetkih ni videti nobene urejene strukture. Na eni strani je površina skoraj popolnoma gladka, na drugi pa nepravilno nagubana (**slika 9**). To pomeni, da je uklonska struktura na obeh straneh hologramske folije zalita, na nagubani strani pa je lepilo za nanašanje folije na dokument. Elementna analiza pokaže poleg kisika in ogljika, ki sta v polimerni foliji, tudi signifikantno vsebnost cinka in žvepla. Sklepamo, da je uklonska struktura narejena s kombinacijo polimera (lomni količnik okoli 1,45) in ZnS (lomni količnik 2,36 pri $\lambda = 600$ nm). Linije, ki so narejene z ZnS, so najverjetneje zelo tanke, zato nam uklonske strukture ni uspelo videti na SEM-posnetkih prečnega prereza folije.



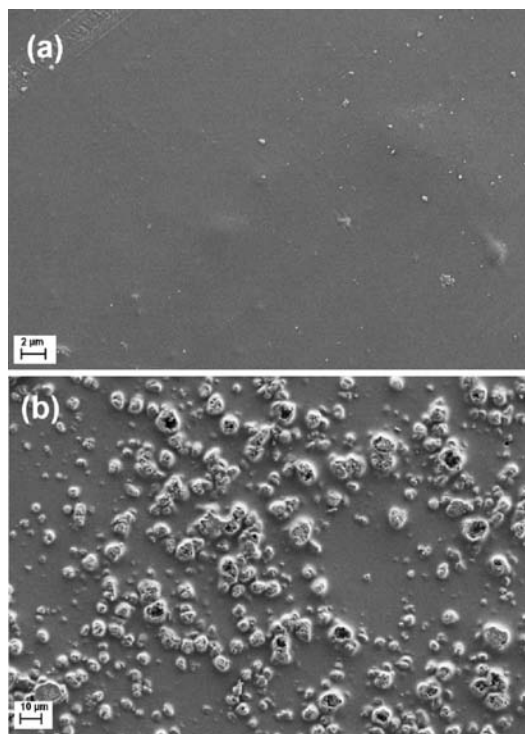
Slika 8: Spektrogoniometrična odbojnost orientacijske oznake na hologramski foliji OVD Kinegram®, merjena v ravnini vzporedno z uklonskimi črtami (a) in pravokotno nanje (b)

4.3 Folija Optoseal

Glede na navedbo v prilogi monografije o metodah za zaščito dokumentov je vzorčni dokument prekrit z hologramsko folijo ničtega reda (*zero-order device*) [1]. Taka struktura je povezana s periodo, ki je manjša od valovne dolžine svetlobe. Za strukture s periodo med $\lambda/2$ in λ dobimo uklone prvega reda pri zelo velikih vpadnih kotih. Ko se perioda še zmanjša, tudi prvi uklonski red izgine. V difuzni osvetlitvi je prekrivna plast videti popolnoma prozorna in praktično brez barve, pri opazovanju v usmerjeni svetlobi pod velikimi koti pa opazimo najprej izrazito rumeno oz. zlato barvo, ki pri večjih kotih preide v zeleno in nato vijolično-modro. Pri pojavu izrazite barve ima vrhnja plast dokumenta kovinsko barvo, zapisa na dokumentu pa ne opazimo (**slika 10**).

Na posnetkih, ki smo jih naredili s konfokalnim optičnim mikroskopom, smo le s težavo opazili zelo gosto uklonsko strukturo s periodo okoli 0,45 μm (**slika 11**). Ta perioda je enaka valovni dolžini modre svetlobe. Na merilnem mestu so črte usmerjene vzporedno z daljšo stranico dokumenta – vodoravno na **sliki 10**.

Celotno odbojnost dokumenta, zaščenega s hologramsko folijo Optoseal, smo izmerili v geometriji ($8^\circ/\text{di}$) v dveh vpadnih ravninah – vzporedno z uklonskimi režami in pravokotno nanje (**slika 12**). Kadar je vpadna ravnina vzporedna z uklonskimi režami, v spektru prevladuje odbojnost podlage (vidimo podatke, ki so zapisani na dokumentu). Kadar je vpadna ravnina pravokotna na uklonske reže, se na odbojnost podlage naloži šibka struktura z vrhoma pri 613 nm in 635 nm. Sklepamo, da je to posledica uklona na hologramski foliji, ki se pojavi le v vpadni ravnini pravokotno na uklonske reže.



Slika 9: SEM-posnetki zgornje (a) in spodnje površine (b) hologramske folije OVD Kinegram®. Posnetki so narejeni brez zaščitne folije.



Slika 10: Fotografski posnetek vzorčnega dokumenta z zaščitno folijo Optoseal. Približno pravokotno na vzorec vidimo vsebino dokumenta (a), pri velikem vpadnem kotu pa dokument zakriva kotno zelo široka uklonska barva (b). Krog označuje mesto merjenja. Na temnih mestih slike (b) je prilepljen prosojni lepilni trak, ki preprečuje uklon svetlobe, pri pravokotnem gledanju (a) pa ga ne opazimo.

Spektrogonometrična odbojnost je prikazana na **sliki 13**. V vpadni ravnini vzporedno z uklonskimi režami je odbojnost v vseh smereh praktično neodvisna od λ , kar pomeni brezbarvno oz. belo površino (**slika 13a**). Kadar je vpadna ravnina pravokotno na uklonske reže, izmerimo selektivni odboj svetlobe v geometriji (45as75) med 400 nm in 470 nm (modra svetloba, **slika 13b**), v geometriji (45as110) pa med 560 nm in 600 nm (zelena svetloba). V teh delih spektra je odbojnost bistveno večja od 100 %, kar dokazuje, da gre za konstruktivno interferenco. V takih razmerah je intenziteta svetlobe lahko bistveno večja od odbojnosti kalibracijskega standarda pri enaki geometriji. Ta pojav lahko ocenimo tudi s primerjavo videza vzorca in kalibracijskega standarda v razmerah, ko opazimo uklonsko barvo na vzorcu. Od vzorca se širi intenzivna bleščeča svetloba, kalibracijski standard pa odbija razpršeno bledo in belo svetlobo. Zeleno svetlobo uklona (45as110) smo ujeli tudi na fotografskem posnetku na **sliki 10b**.

Z valovno dolžino uklonov, ki jih izmerimo v geometrijah (45as75) in (45as110), lahko z enačbo (1) dobimo razmerje p/m . Če je perioda p okoli 450 nm, sta oba uklona prvega reda ($m = 1$).

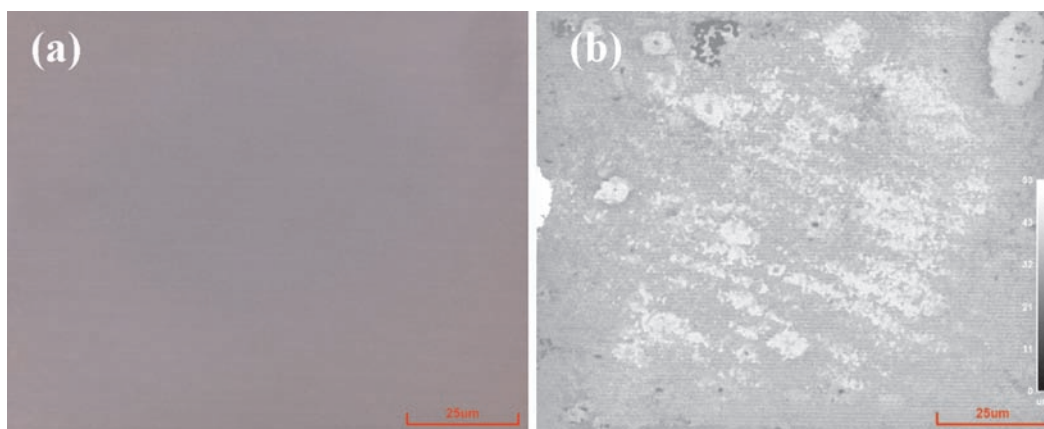
Tabela 2: Preračun uklonov polprepustne hologramske folije Optoseal, ki jih dobimo iz spektrogonometričnih meritev (**slika 13**). Podana je oznaka geometrije, v kateri dobimo uklon, vpadni kot θ_i in uklonski kot θ_m . Z enačbo (1) izračunamo p/m , tj. razmerje periode p in reda uklona m . Ker je $p \approx 450$ nm, dobimo tudi red uklona m .

geometrija	θ_i	θ_m	λ/nm	$(p/m)/\text{nm}$	m
45as75	45	-30	450	373	1
45as110	45	-65	580	359	1

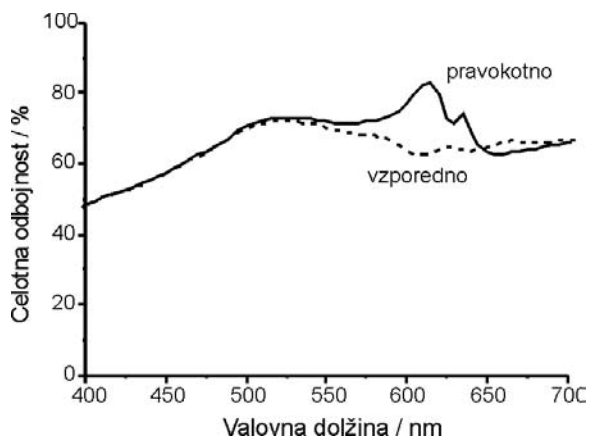
5 SKLEP

Na polprepustnih hologramskih folijah so navadno ploskve z ravnimi uklonskimi režami. Te so narejene iz tankih vzporednih črt z velikim lomnim količnikom (npr. ZnS), ki so zalite v polimeru. Posamezne ploskve s razlikujejo po periodi črt in njihovi smeri.

Perioda uklonske strukture, ki daje uklone pri opazovanju v beli svetlobi, mora biti manjša od koherenčne dolžine bele svetlobe (nekaj mikrometrov). Tako goste strukture ni mogoče gravirati z laserjem valovne dolžine 1064 nm.



Slika 11: Posnetek površine dokumenta, ki ima zaščitno folijo Optoseal. Posnetek je narejen s konfokalnim optičnim mikroskopom. Optični posnetek (a) in topografija (b).



Slika 12: Celotna odbojnost dokumenta z zaščitno folijo Optoseal pri vpadni ravnini vzporedno z uklonskimi režami (črtkana) in pravokotno nanje (polna črta)

Mikroskopski posnetki uklonske strukture polprepustnih hologramskih folij kažejo razmeroma veliko število napak in defektov. To pomeni, da popolna pravilnost uklonskih rež ni ključnega pomena.

Uklonski efekti se pojavijo, kadar jih opazujemo v vpadni ravnini pravokotno na uklonske reže. Ker imajo analizirane polprepustne folije vse uklonske reže v isti smeri, je v ravnini, ki je vzporedna z njimi, nemogoče opaziti uklonske efekte.

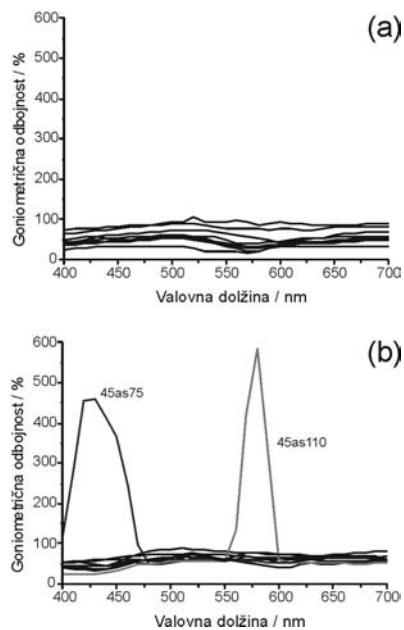
Celotna odbojnost polprepustnih hologramskih folij pri vpadnem kotu 8° ne kaže izrazitih uklonskih efektov; prevladuje odbojnost podlage, na kateri je hologramska folija. Pri merjenju v vpadni ravnini pravokotno na uklonske reže se na odbojnost podlage naloži šibak interferenčni efekt, kar potrjuje enotno usmerjenost črtne strukture hologramske folije.

Tudi spektrogonometrična odbojnost kaže barvne efekte le, kadar je vpadna ravnina pravokotno na uklonske reže. Iz rezultatov meritev lahko določimo periodo uklonskih rež hologramske folije. Rezultati se razmeroma dobro ujemajo s strukturo, ki jo dobimo na mikroskopskih posnetkih in z opazovanji.

Spektrogoniospektrometrične meritve smo opravili z aparaturom, ki je namenjena kontroli kotno odvisnih premazov v avtomobilski industriji. Rezultati kažejo, da je mogoče to aparaturom uporabiti za identifikacijo optičnih efektov na hologramski foliji, ki ščiti dokument. Ker je uporabljena aparatura prenosna in namenjena delu na terenu, je taka meritev popolnoma nedestruktivna.

Zahvale

Projekt št. L2-2150 je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega



Slika 13: Spektrogonometrična odbojnost dokumenta z zaščitno folijo Optoseal, merjena v ravnini vzporedno z uklonskimi črtami (a) in pravokotno nanje (b)

proračuna. Za sofinanciranje se zahvaljujemo tudi podjetju Cetus, d. d.

Mojca Friškovec se zahvaljuje Tehnološki agenciji Slovenije za sofinanciranje po programu Mladi raziskovalci iz gospodarstva. Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti, prednostne usmeritve 1.1.: Strokovnjaki in raziskovalci za konkurenčnost podjetij.

Avtorji se zahvaljujejo g. Romanu Habichtu iz podjetja HSH, d. o. o., za možnost testnega merjenja s spektrogonometrom X-Rite MA98.

6 LITERATURA

- [1] R. L. Van Renesse, *Optical Document Security*, 3rd edition, Artech house Boston, London, 2005
- [2] A. Argoitia, R. Phillips, *Proc. SPIE*, 6075 (2006), 60750P1–60750P18
- [3] M. Baloukas, L. Martinu, *Applied Optics*, 47 (2008), 1585–1593
- [4] L. Kotačka, T. Těthal, V. Kolařík, *Proc. SPIE*, 5954 (2005), 59540K1–59540K9
- [5] J. Jahns, Q. Cao, S. Sinzinger, *Laser & Photon. Rev.*, 2 (2008), 249–263
- [6] S. Sumriddetchkajorn, Y. Intaravanne, *Proc. SPIE*, 7003 (2008), 7003181–7003189
- [7] E. Hecht, *Optics*, 4th edition, Addison-Wesley, San Francisco, 2002