

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

Dorijan Mihajlica



Sveučilište u Zagrebu
Grafički fakultet

Smjer: Tehničko - tehnološki

ZAVRŠNI RAD

PRIMJENA HOLOGRAMA U ZAŠTITI PUTOVNICA

Mentor:

dr. sc. Damir Modrić

Student:

Dorijan Mihajlica

Zagreb, 2014

SAŽETAK

Temelji holografije potiču još od sredine 20. Stoljeća, a time i povijest holografije i rani počeci primjene. U ovom radu, osim razvoja holografije kroz povijest, objašnjeni su osnovni principi na kojima se bazira postupak izrade holograma, detaljno je razrađen postupak snimanja i rekonstrukcije holograma, koji nije moguće provesti bez optičkih komponenata koje se koriste prilikom snimanja i na koje je također obraćena velika pozornost. Razvojem tehnologije omogućava se računalno generiranje holograma, a samim time i apliciranje holograma na gotov proizvod, što su u ovom slučaju putovnice kao dokumenti koji zahtijevaju visoki stupanj sigurnosti i nemogućnosti krivotvorenja. Na kraju su spomenute tehničke i estetske posebnosti holograma, na koje se nadovezuje poglavlje o tendencijama razvoja primjene holograma.

Ključne riječi: holografija, hologram, računalno generiranje holograma,

zaštita putovnica, apliciranje na gotov proizvod, razvoj primjene

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJEST HOLOGRAFIJE	2
3. OSNOVNI PRINCIPI IZRADE HOLOGRAMA	8
3.1. Interferencija i difrakcija.....	10
3.1.1. Interferencija kod snimanja holograma.....	10
3.1.2 Difrakcija kod rekonstrukcije holograma.....	11
4. SNIMANJE I REKONSTRUKCIJA HOLOGRAMA	12
4.1. Snimanje holograma.....	12
4.2. Materijali za snimanje holograma.....	14
4.2.1. Fotografske emulzije.....	15
4.2.2. Fototermoplastični materijali.....	15
4.2.3. Fotorefrakcijski kristali.....	15
4.3. Rekonstrukcija holograma.....	16
5. OPTIČKE KOMPONENTE ZA SNIMANJE HOLOGRAMA	18
5.1. Optički stol za snimanje holograma.....	19
5.2. Okolina.....	19
5.3. Laser.....	19
5.3.1. Princip rada lasera.....	20
5.3.2. Primjena lasera u holografiji.....	21
5.4. Djelitelj snopa.....	21
5.5. Zrcala.....	21
5.6. Divergentna leća.....	21
5.7. Parabolično zrcalo.....	21
5.8. Držači (okviri) optičkih elemenata.....	21

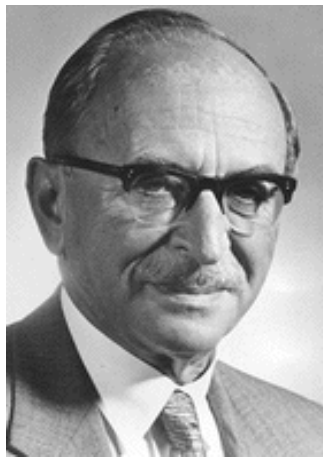
6. RAČUNALNO GENERIRANJE HOLOGRAMA.....	22
6.1. Računalno generirani hologram kao element zaštite na putovnicama.....	23
7. PRIPREMA, TISAK I APLICIRANJE HOLOGRAMA NA GOTOV PROIZVOD S NAGLASKOM NA NJIHOVU PRIMJENU U ZAŠTITNE SVRHE NA PUTOVNICAMA.....	24
7.1. Tehnike izrade tiskanog holograma.....	24
7.1.1. Izrada master holograma.....	24
7.1.2. Elektrooblikovanje i metaliziranje.....	25
7.1.3. Proces otiskivanja holograma.....	26
7.1.4. Tiskovne podloge za izradu holograma.....	27
7.1.5. Strojevi za otiskivanje holograma.....	28
7.2. Tehnika izrade fotopolimernih holograma.....	29
7.2.1. Karakteristike fotopolimernog holograma i njegova primjena.....	29
7.3. Kinegram®	30
8. TEHNIČKE I ESTETSKE POSEBNOSTI HOLOGRAMA.....	31
8.1. Prostorna paralaksa.....	31
8.2. Višestruke scene.....	31
8.3. Redundancija slikovne informacije.....	32
8.4. Omjer intenziteta referentnog i objektnog snopa.....	32
8.5. Ograničenja.....	32
9. TENDENCIJE RAZVOJA PRIMJENE HOLOGRAMA.....	34
10. ZAKLJUČAK.....	36
11. LITERATURA.....	37

1. UVOD

Holografija je skup postupaka kojima se dobiva prostorna slika predmeta zasnovana na pojavi interferencije valova. Holografija svoju primjenu nalazi u obliku umjetničkih djela, vizualnih dekoracija te kao zaštitni element na dokumentima (novčanice, putovnice, bankovne kartice...) ili ambalaži. Principi holografije se baziraju na jednostavnim principima interferencije i difrakcije, bez kojih izrada holograma ne bi bila moguća. Primjena holograma je pretežito bazirana na masovnoj reprodukciji, koja je moguća uz pomoć strojeva kojima se hologrami apliciraju na gotov proizvod. U daljnjem tekstu su detaljno objašnjeni postupak izrade i snimanja holograma, njihova aplikacija na gotov proizvod i ostale karakteristike koje definiraju hologram kao jedan od elemenata kojima se proizvodi ili dokumenti zaštićuju.

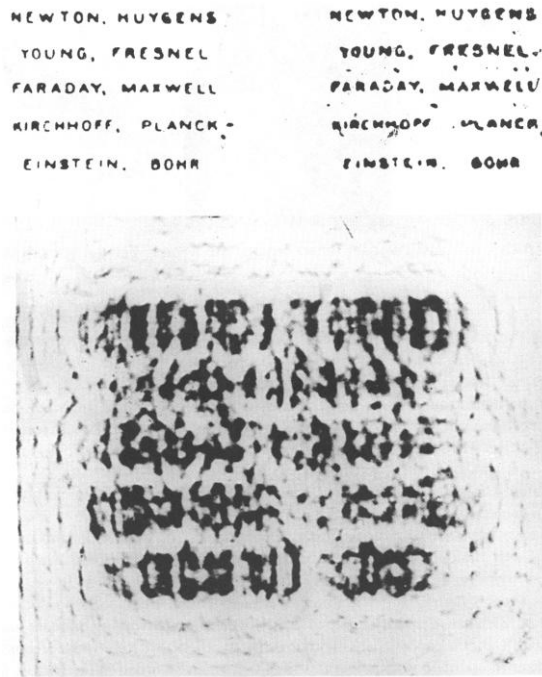
2. POVIJEST HOLOGRAFIJE

Već početkom 19. stoljeća na raspolaganju je bilo dovoljno znanja za razumijevanje načela holografije. Mnogo znanstvenika se približilo otkriću ovog područja fizike: G. Kirchhoff (1824–1887), Lord Rayleigh (1842–1919), E. Abbe (1840–1905), G. Lippmann (1845–1921), W.L. Bragg (1890–1971), M. Wolfke i H. Boersch, ali tek je 1947. mađarski fizičar Dennis Gabor ustanovio osnovna načela holografije, za što je nagrađen Nobelovom nagradom 1971. godine. [1]



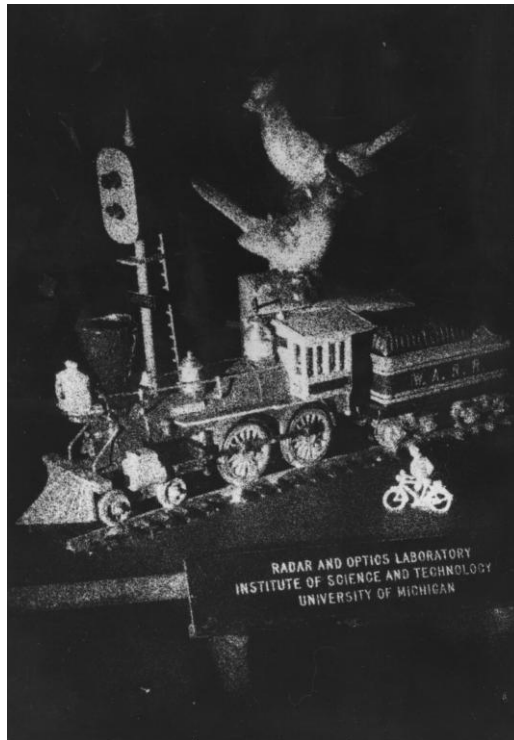
Slika 1. dr. Dennis Gabor (1900-1979), otac holografije [2]

Temelji holografije isprva su bili povezani s problemom optike elektrona. Gabor je zato izvodio svoje prve revolucionarne eksperimente koristeći elektro-lučne živine svjetiljke, koje su u to vrijeme bile najkoherentniji izvor svjetlosti kojim je bila moguća izrada holograma. Zbog tog ograničenja njegovi su hologrami sadržavali mnoge smetnje i nesavršenosti (Slika2.). [3]



Slika 2. Jedan od Gaborovih prvih holograma [4]

Gaborova teorija došla je gotovo 15 godina preuranjeno, te njegovo otkriće nije zaživjelo do ranih šezdesetih godina kada su otkrićem lasera inženjeri s University of Michigan, Emmett Leith i Juris Upatnieks, razvili napravu koja je reproducirala trodimenzionalnu sliku, što je rezultiralo prvim laserskim transmisijskim hologramom trodimenzionalnog objekta „Vlak i ptica“ (Slika 3.). Njihovi su hologrami omogućili uvjerljivije trodimenzionalne prikaze zbog prikladnih svojstava laserskog zračenja.



Slika 3. Hologram „Train and bird“ Emmetta Leitha i Jurisa Upatnieksa iz 1964. [4]

1962. godine Dr. Yuri N. Denisyuk u SSSR-u izrađuje holograme za čiju se reprodukciju koristi refleksija bijele svjetlosti (hologrami s transmisijom bijelog svjetla), te se po prvi put hologrami mogu promatrati uz osvjetljenje obične žarulje s žarnom niti ili npr. pod Sunčevim osvjetljenjem. To je bio značajan napredak jer su dotadašnje konfiguracije zahtijevale monokromatske zrake. [4].

Dok su 1963. godine Leith i Upatnieks radili na svom prvom laserskom transmisijskom hologramu, Denisyuk je započeo s proizvodnjom holograma umjetničkih objekata. Tada započinje brzi uspon razvoja holografskih tehnika. Neki umjetnici počinju koristiti hologram kao medij.

Značajnom napretku razvoja holografskih tehnika doprinio je izum rubinskog pulsirajućeg lasera, za što je zaslužan Dr. T. H. Maiman. Ovakav laser emitira vrlo intenzivan snop svjetla koji traje samo nekoliko nanosekundi. To omogućuje učinkovito „zamrzavanje“ pokreta te izradu holograma vrlo brzih događaja, kao što je npr. metak u letu ili izradu holograma živih objekata.

Shankoff i Pennington 1967. počinju koristiti dvobojnu želatinu („dichromated gelatin“ – DCG) kao medij za snimanje holograma. To je omogućilo snimanje holograma na bilo kojoj čistoj nepropusnoj podlozi.

1968. Dr. Stephen A. Benton razvija tzv. „dugin“ hologram (rainbow hologram) pomoću holografske tehnike koja koristi transmisiju bijelog svjetla. Nastala je slika koja se sastoji od duginog spektra boja. Boje se mijenjaju kako se promatrač udaljava i približava takvom hologramu. Ovaj izum značajno je pridonio razvoju holografije jer je njime omogućena masovna proizvodnja holograma tehnikom rezbarenja („embossed holograms“), koju je 1974. razvio Michael Foster, a 1979. komercijalizirao Steve McGrew. Rezbareni hologrami su jeftini za proizvodnju, a koriste se za gotovo sve sigurnosne aplikacije, npr. na putovnicama i bankovnim karticama. [5]



Slika 3. Dugin hologram „Portrait of Gabor“, Benton, Stephen A., 1977., staklo, MIT Museum [6]

1972. godine Lloyd Cross osmislio je integralnu holografiju kombinirajući tehnike holografije transmisijom bijelog svjetla s konvencionalnom kinematografijom za izradu trodimenzionalnih pokretnih slika. Nekoliko okvira 2-D pokretne slike snimljeno je na holografski film. Kada se gleda, ljudski mozak tu kombinaciju slika doživljava kao 3-D sliku (Slika 4.).



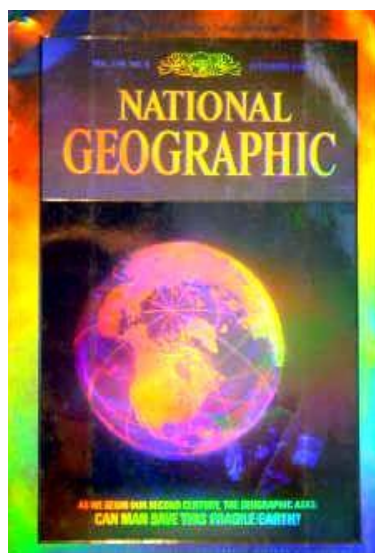
Slika 4. Serija fotografija načinjena za Crossov integralni hologram „Kiss II“ iz 1974.g., fotografija: Daniel Quat, 1977. [3]

1983. godine Mastercard Internacional Inc. je prva kompanija koja koristi holografsku tehnologiju za zaštitu bankovnih kartica (Slika 5.).



Slika 5. Prve bankovne kartice s rezbarenim hologramom [3]

National Geographic je prva publikacija koja od 1984. godine koristi holograme na svojim naslovnicama. Najznačajnije izdanje s hologramom je ono iz prosinca 1988. čije korice su u potpunosti „hologramske“: globus na prednjim koricama, trodimenzionalni tekst na hrptu te reklama na stražnjim koricama (Slika 6.).



Slika 6. National Geographic iz prosinca 1988. [3]

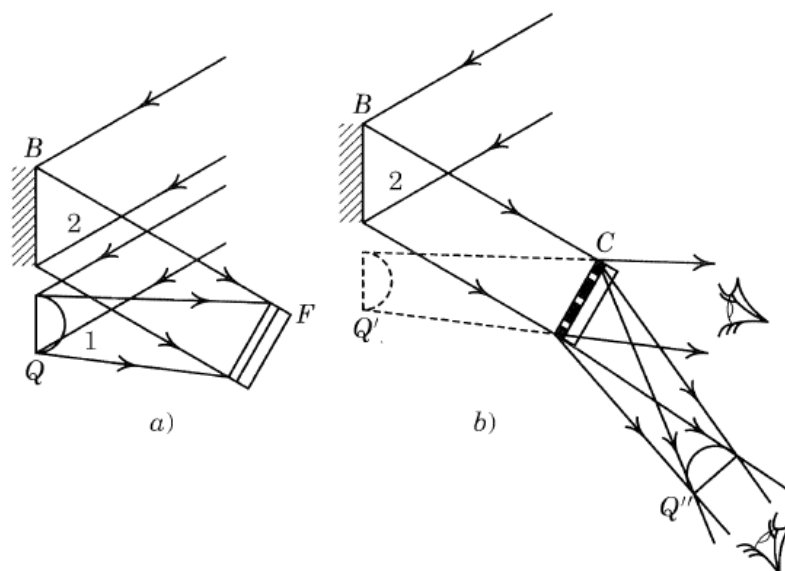
Tehnika izrade holograma fotopolimerima također je utjecala na masovnu proizvodnju holograma. Za razliku od rezbarenih holograma, koji su zapravo hologrami s transmisijom bijelog svjetla sa zrcalnom podlogom, fotopolimerni hologrami su refleksijski hologrami s plastičnom podlogom, koji daju vrlo oštru i jasnu sliku. Ova vrsta holograma uspješno se koristi u marketingu, poštanskom sustavu, ambalaži i u drugim područjima. [5]

Danas je razvoj holografije uglavnom usmjeren prema komercijalnom proizvodu, tjeran zasad nepremoštenim problemima minijaturizacije i financijske nepristupačnosti. Ciljajući na sljedeći proboj u ovoj obećavajućoj tehnologiji koji bi holografske memorije stavio na stol pred danas nešto zahtjevnijeg, ali sutra prosječnog korisnika računalnih sustava, u potragu za boljim holografskim materijalima i holografskim tehnikama, osim velikih sveučilišta (California Institute of Technology, Stanford University, The University of Arizona, Carnegie Mellon University), uključili su se i industrijski divovi poput IBM, AT&T Bell, Rockwell, Lucent Technologies i Bayer Corporation. Nove ideje, koncepti, ali i prototipovi nastavljaju obećavati.

3. OSNOVNI PRINCIPI IZRADE HOLOGRAMA

Holografija je skup postupaka kojima se dobiva prostorna slika predmeta zasnovana na pojavi interferencije valova. U holografiji, za razliku od obične fotografske metode, na fotografsku emulziju registrira se ne samo zavisnost između amplituda (ili njihovih kvadrata, tj. intenziteta) svjetlosnih valova, raspršenih (reflektiranih) malim dijelovima površine predmeta, nego i zavisnost između faza tih valova.

Sušтина holografske metode prikazana je na *Slici 7*. Na filmu *F* (fotografskoj ploči) registrira se interferencijska slika koja nastaje slaganjem vala 1 reflektiranog od strane predmeta *Q*, koja se naziva *signalnim valom* ili *predmetnim snopom*, i s njim koherentnog vala 2, koji se naziva *referentnim valom (snopom)* i koji potječe od istog izvora svjetlosti kojim je osvijetljen predmet, a nakon refleksije od zrcala *B* pada neposredno na film *F*. Razvijanjem filma nastaje interferencijska slika koja se naziva *hologramom objekta Q*. Ona se sastoji od vrlo sitnih zamršenih sličica (pruga) nastalih od izmjeničnih interferencijskih maksimuma i minimuma zacrnjenja filma i za razliku od fotografske slike nema nikakve sličnosti s predmetom.



Slika 7. Princip izrade holograma [7]

Za dobivanje holograma potrebno je ostvariti interferencije svjetlosti s velikom razlikom optičkih putova, odnosno potrebna je svjetlost visokog stupnja koherencije. Zbog toga se u holografiji kao izvori svjetlosti upotrebljavaju laseri.

Sliku predmeta s njegova holograma C dobiva se prosvjetljavanjem filma kao kod dijapozitiva referentnim valom 2 s istog lasera koji je bio korišten za snimanje holograma. Pri tome mora biti sačuvana i orijentacija filma s hologramom u odnosu prema referentnom valu. Val 2 difraktira na hologramu. Zbog te difrakcije primjećuju se dvije prostorne slike predmeta: realna i virtualna. Virtualna slika predmeta Q' nalazi se, u odnosu prema hologramu, na istom mjestu na kojem je bio smješten predmet Q prilikom snimanja holograma. Ta je slika vidljiva kad se kroz hologram gleda kao kroz prozor. Realna slika Q'' nalazi se na drugoj strani holograma. Ona izgleda kao da se nalazi u zraku ispred holograma i zrcalna je refleksija predmeta.

Obično se rabi virtualna hologramska slika, koja je vizualno identična s predmetom. Ona ne samo da ima prostorna svojstva nego se i perspektivno mijenja ovisno o položaju očiju promatrača prema hologramu. Na primjer, pomičući glavu duž holograma mogu se vidjeti oni dijelovi koji bi pri drugom položaju glave bili zaslonjeni tim predmetom.

Interferencijska slika u svakoj točki holograma potječe od svjetlosti odbijene od svake točke predmeta. Zbog toga svaki dio holograma sadržava informacije o cijelom predmetu i omogućuje izradu slike cijelog predmeta ako se npr. veći ili manji dio holograma ošteti. Što su manje dimenzije sačuvanog fragmenta, manja je količina svjetlosti koja difrakcijom stvara sliku. Zbog toga hologram, kad se radi o sigurnosti čuvanja informacija, ima bitne prednosti u usporedbi s običnim fotografskim pozitivom ili negativom čiji dijelovi sadržavaju samo informacije o dijelovima predmeta koji su na njima snimljeni.

Holografija omogućuje i dobivanje slika prostornih predmeta u boji. U procesu dobivanja „obojenog“ holograma upotrebljava se monokromatska svjetlost iz triju lasera u tri osnovne boje (npr. crvenoj, zelenoj, plavoj). Zapis interferencijske slike za te tri duljine vala radi se na isti film jedan za drugim ili istodobno. Da se dobije prostorna

slika predmeta u boji, treba na hologram usmjeriti istodobno tri referentna snopa pod kojima je taj hologram snimljen.

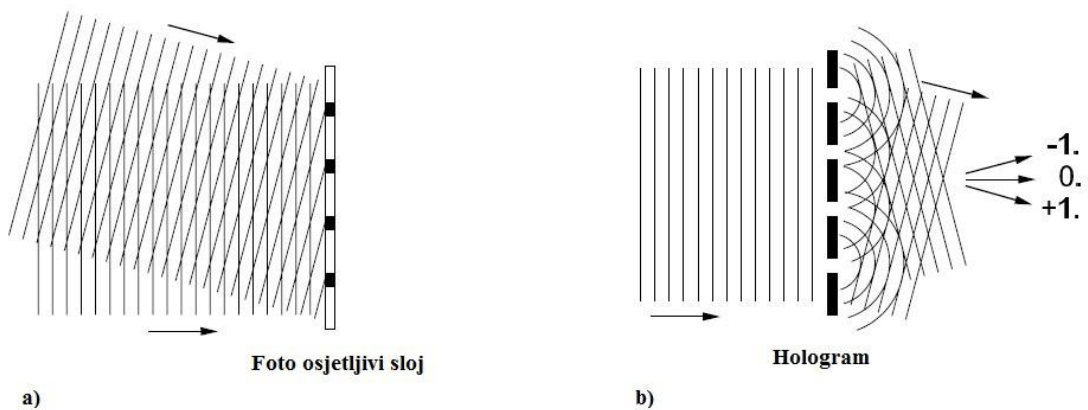
Kod prostornih (volumnih) holograma dobivenih na filmovima s većom debljinom sloja fotoemulzije, interferencijska slika nastala slaganjem referentnog i prostornog snopa nije plošna već prostorna. Takav je hologram sličan prostornoj difrakcijskoj rešetki. Od bijele svjetlosti koja pada na taj hologram on izdvaja monokromatsku svjetlost valne duljine jednake onoj koja je upotrijebljena prilikom snimanja. Dobivanje slike zapisane na prostornom hologramu moguće je osvjetljivanjem monokromatskom svjetlošću odgovarajuće valne duljine, kao i bijelom svjetlošću. Dakle, ako je prostorni hologram „u boji“, za dobivanje prostorne slike u boji dovoljno je osvjetliti ga bijelom svjetlošću. [7]

3.1. Interferencija i difrakcija

3.1.1. Interferencija kod snimanja holograma

Svjetlost čine elektromagnetski valovi čije su valne duljine u području od 10 nm do 1 mm. Superpozicija dvaju koherentnih valova, poznata kao interferencija, odgovorna je za snimanje holograma.

Predmetni val, odnosno val raspršen na površini predmeta, nosi podatke o površini predmeta. On može interferirati s ravnim elektromagnetskim valom ako su oni koherentni. U holografiji se takav val naziva referentnim valom. Prema *Slici 8.* predmetni i referentni val padaju na fotografski sloj. Superpozicija valova tvori podjednako udaljene interferentne pruge, tj. svijetla i tamna područja. Tamna područja nastaju kada se valovi međusobno ponište superpozicijom maksimuma i minimuma. Svijetla područja nastaju kad se preklapaju maksimumi (ili minimumi) valova. Nakon osvjetljavanja i razvijanja fotografskog sloja, nastaje rešetka gdje su osvjetljena područja tamna. [1]



Slika 8. Hologram s predmetnim valom: a) snimanje holograma (konstrukcija difrakcijske rešetke), b) rekonstrukcija predmetnog vala (difrakcija pomoću rešetke) [1]

3.1.2. Difrakcija kod rekonstrukcije holograma

U procesu rekonstrukcije valne fronte zabilježenog predmetnog vala hologram se obasjava referentnim valom. Hologram djeluje kao optička rešetka (difrakcijska rešetka), pa referentni val dijelom prolazi bez ogiba kao val nultog reda, a djelomičnim ogibom referentnog vala nastaju valovi prvog reda (Slika 8.b). Jedan val prvog reda rekonstruira realnu sliku predmeta u njegovom izravnom položaju, dok drugi val iste amplitude, ali suprotne faze daje virtualnu sliku predmeta. [8]

Ovisno o načinu difrakcije svjetlosti na hologramu, hologrami mogu biti:

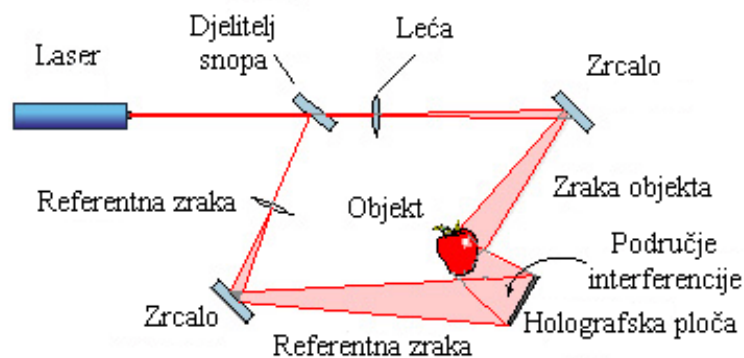
- a) amplitudni – ako su interferencijske pruge na hologramu definirane promjenama zacrnljenja emulzije. Ovi hologrami mijenjaju amplitudu elektromagnetskog vala tijekom rekonstrukcije;
- b) fazni – ako su interferencijske pruge definirane promjenama faze. Fazni hologrami mijenjaju fazu elektromagnetskog vala pri rekonstrukciji zbog promjene indeksa loma ili debljine holograma.

4. SNIMANJE I REKONTRUKCIJA HOLOGRAMA

4.1. Snimanje holograma

Za snimanje holograma svjetlosni snop iz lasera dijeli se djeliteljem snopa na dva snopa. Kako je promjer snopa vrlo mali ($\approx 1\text{mm}$) snopovi se rašire pomoću leća tako da mogu u potpunosti obasjati predmet, odnosno fotografsku ploču (holografski materijal). Jedan se snop vodi pomoću zrcala do predmeta na kojem se raspršuje. Raspršeni snop predstavlja predmetni val, a drugi snop je referentni. Oba vala se sastaju na fotografskoj ploči, a interferirati će ako je geometrijska razlika njihovih putova unutar koherentne duljine lasera, tj. ako su koherentni. Važno je i da smjerovi polarizacije predmetnog i koherentnog vala nisu okomiti jer u suprotnom neće moći interferirati.

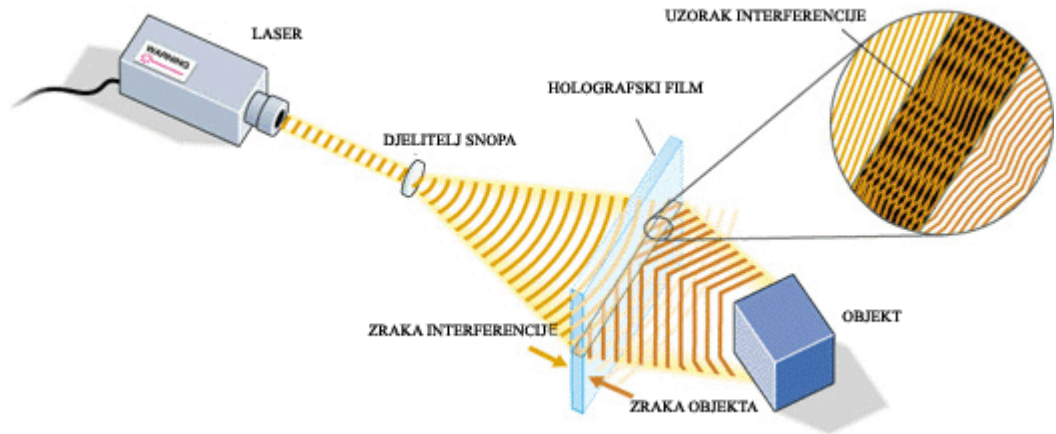
Ako su zadovoljeni svi uvjeti, na fotografskoj ploči bit će zabilježena interferencija predmetnog i referentnog vala (Slika 9.). Zapis u holografskom materijalu ostaje u vidu fizikalnih ili kemijskih promjena nekog optičkog svojstva materijala, npr. apsorpcije, indeksa loma ili debljine fotoosjetljivog medija. Promjena optičkog svojstva prostorno je modulirana kroz čitav volumen holografskog materijala upravo interferencijskim uzorkom za vrijeme snimanja. [9]



Slika 9. Nastanak holograma realnog objekta na holografskoj ploči. Objekt i referentni val prilaze ploči s iste strane [9]

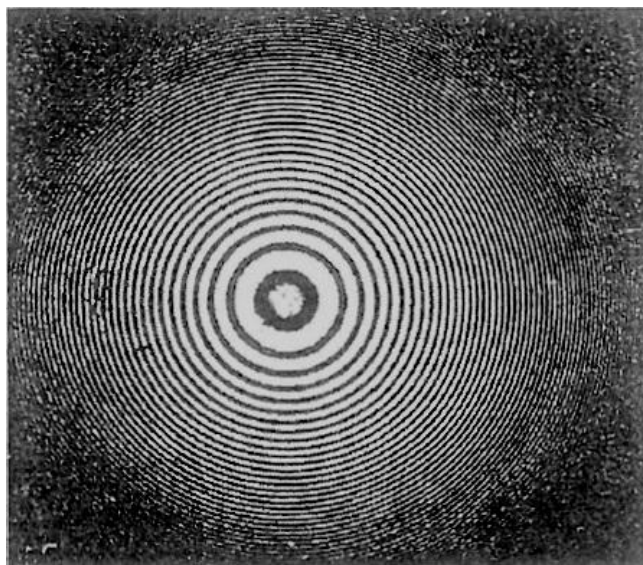
Još jedan od načina za postizanje interferencije dviju zraka istog lasera u holografskom materijalu je pomoću divergentne leće koja rasprostire svjetlost lasera po holografskoj ploči (Slika 10.). Veći dio svjetlosti prolazi kroz ploču i obasjava objekt.

Onaj dio svjetlosti koji se odbije od objekta vraća se natrag na ploču sa suprotne strane i stvara interferencijski uzorak karakterističan za referentnu (početnu) zraku i objekt od kojeg se odbila. Interferencijski uzorak vremenski je neovisan upravo zahvaljujući upotrijebljenoj koherentnoj svjetlosti.



Slika 10. Nastanak holograma realnog objekta na holografskoj ploči. Objektni i referentni val prilaze ploči sa suprotnih strana. [9]

Ako je predmet za snimanje holograma točkast, raspršeni val na tom predmetu će biti sferni. Interferencijom jednog sfernog i ravnog vala na fotografskoj ploči zabilježen je niz koncentričnih prstenova (Slika 11.)



Slika 11. Interferencija sfernog i ravnog vala [8]

Raspršeni val na realnom predmetu bit će zbroj mnoštva sfernih valova. Njihovom interferencijom s ravnim valom na hologramu će biti zabilježeno mnoštvo prstenova koji se međusobno presijecaju. Promjene u kontrastu prstenova ovise o amplitudi, odnosno intenzitetu valova raspršenih na predmetu. Podaci o fazi raspršenih valova sadržani su u različitim udaljenostima između prstenova. Nakon fotografskog postupka razvijanja i fiksiranja završena je faza snimanja holograma.

S optičkog gledišta hologram predstavlja interferogram. Međutim, kako je holografija spoj fizike koherentnih polja i teorije komunikacija, može se reći da je na hologramu zabilježena modulacija prostornih frekvencija predmetnog vala na ravnom valu. [8]

4.2. Materijali za snimanje holograma

Fotografske ploče visoke rezolucije i filmovi, bili su prvi materijali korišteni za snimanje holograma. Danas se sve više istražuju mogućnosti raznih organskih polimera kao materijala za snimanje holograma. Uzevši u obzir i analogni zapis (hologrami na kreditnim karticama, identifikacijskim dokumentima, CD medijima...) i digitalni način zapisivanja, postoji više važnih zahtjeva koji se postavljaju pred neki materijal kako bi se mogao koristiti za snimanje holograma. [9]

Hologram može biti snimljen u mediju kao varijacija apsorpcije, faze ili boje. Materijal za snimanje mora reagirati na upadno svjetlo, tako da dolazi do promjene u njegovim optičkim svojstvima. Kod apsorpcijskih ili amplitudnih materijala dolazi do promjene apsorpcije materijala za snimanje, kao posljedica ekspozicije, dok se osvjetljavanjem i razvijanjem faznih materijala mijenja njegova debljina ili indeks loma materijala. Prilikom rekonstrukcije snimljenog holograma kod faznih materijala nema apsorpcije upadnog svjetla, tako da je ono u cijelosti iskorišteno za formiranje slike, dok se pri rekonstrukciji amplitudnog holograma znatna količina upadnog svjetla apsorbira. Stoga fazni materijali imaju veću iskorištenost upadnog svjetla u usporedbi s amplitudnim materijalima. [10]

Materijali za holograme mogu se podijeliti u tri skupine: fotografske emulzije, fototermoplastične materijale, fotorefrakcijske kristale.

4.2.1. Fotografske emulzije

Najčešće se koriste fotografske ploče i filmovi visoke rezolucije zbog njihove osjetljivosti u širokom spektralnog području i visoke moći razlučivanja. Na staklenu podlogu ili plastični film nanosena je emulzija koja sadrži zrnca srebra-halogenida. Prosječna veličina zrna je $0.08 - 0.03 \mu\text{m}$, dok je debljina emulzije $5 - 15 \mu\text{m}$. Postupak fiksiranja i razvijanja holograma isti je kao i kod klasičnih fotografija. Ovi materijali su prikladni za snimanje transmisijskih i refleksijskih holograma.

4.2.2 Fototermoplastični materijali

Hologrami se mogu snimati na ploču koja je građena npr. od stakla presvučenog tankim prozirnim slojem indijevog oksida (fotovodič) i sloja termoplastike. Primjenom električnog polja na sloju termoplastike inducira se pozitivni naboj dok se na sloju fotovodiča javlja negativni naboj. Nakon osvjetljavanja termoplastičnog sloja predmetnim i referentnim valom na ploču se ponovno primjenjuje električno polje. Na termoplastičnom sloju nastaje prostorno promjenljivo električno polje koje ovisi o interferenciji valova. Termoplastika se lagano grije tako da nastalo električno polje deformira površinu. Hlađenjem termoplastike na sobnu temperaturu ove informacije ostaju sačuvane. Cijeli postupak traje manje od jedne minute. Prednost ovog materijala je u tome što se ploča ne miče za vrijeme primjene električnog polja, te grijanja i hlađenja. Ponovnim grijanjem holografski zapis se briše i ploča se može ponovno koristiti.

4.2.3. Fotorefrakcijski kristali

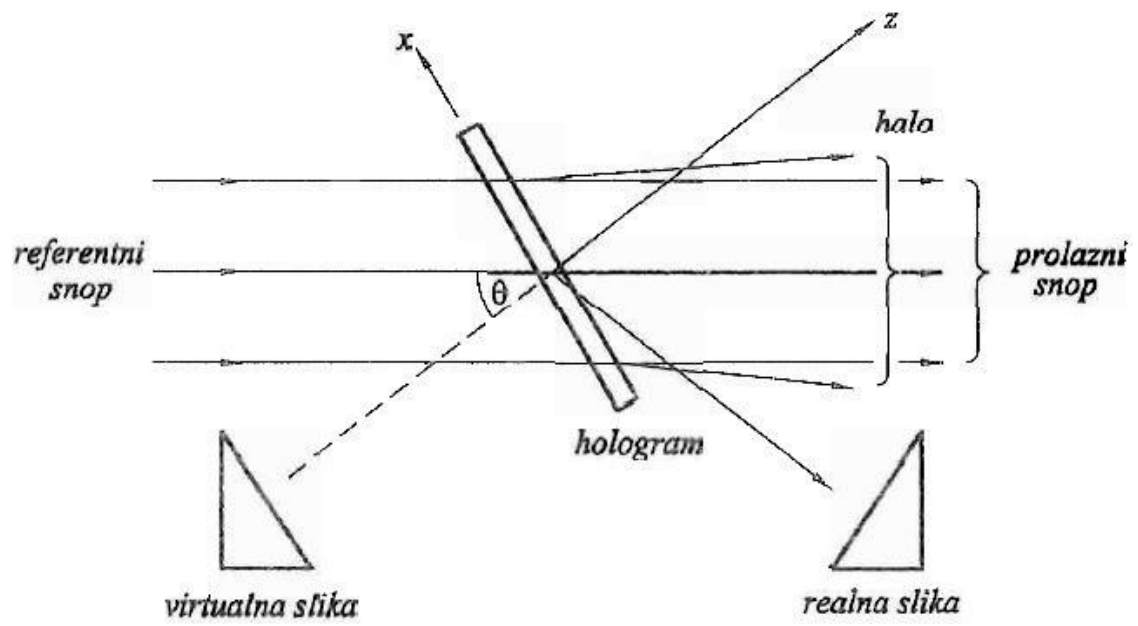
Fotorefrakcijski kristali su noviji materijali za snimanje holograma. Kada takav kristal osvjetle predmetni i referentni val, u osvjetljenom području oslobađaju se elektroni. Ti elektroni putuju u neosvijetljene dijelove kristala i tamo ostaju uhvaćeni. Zbog toga se unutar kristala javlja prostorno promjenljivo električno polje čije modulacije slijede interferenciju valova. Time se ujedno modulira indeks loma kristala. Način na koji kristal raspršuje svjetlo pri rekonstrukciji ovisi o nastalom

električnom polju. Najčešće korišteni kristali su bizmut-silicijev oksid BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$), litijev niobat (LiNbO_3), litijev tantalat (LiTaO_3). Ovi materijali se odlikuju visokom rezolucijom, efikasnošću i dobrom osjetljivošću. Nedostatak ovakvih materijala je mogući gubitak holografskog zapisa nakon ponovnog osvjetljavanja. Da bi se uklonio taj nedostatak istražuju se novi materijali, pa se u tu svrhu npr. kristali litijevog niobata dopiraju s raznim elementima (npr. željezom, cerijem). S gledišta kemije čvrstog stanja fotorefrakcija (*PRE - photorefractive effect*) najzanimljivija je u usporedbi s ostalim fotopromjenjivim optičkim svojstvima. [8]

Niti jedan materijal ne ispunjava sve zahtjeve, potrebne da bi bio idealan holografski materijal. Tek se treba pronaći materijal koji će posjedovati visoku opću osjetljivost emulzija srebro-halogenida, veliku korisnost difrakcija i sposobnost modulacija indeksa loma dikromatnih želatina i fotopolimera, te mogućnost višestrukog snimanja koju imaju fotorefraktivni kristali, a uz sve to da je osjetljiv u području cijelog vidljivog spektra. [10]

4.3. Rekonstrukcija holograma

(Slika 12.) Da bi se iz holograma opet rekonstruirala slika, potrebno je ponoviti postupak kakav je upotrijebljen pri dobivanju holograma. Kada se snimljeni hologram rasvijetli jednakim ravnim referentnim valom koji pada na njega pod jednakim kutom kao i pri snimanju, svjetlo kroz hologram djelomično prolazi bez ogiba, kao val nultog reda, a djelomično se ogiba formirajući valove 1. reda. Jedan val prvog reda daje realnu sliku objekta, a drugi val prvog reda daje virtualnu sliku. Obje slike su trodimenzionalne, s time da se realna slika može dalje registrirati (snimiti) fotografskim postupkom, a virtualna ne. Slika objekta dobivenog reprodukcijom holograma vjerna je objektu, iste je veličine kao i objekt, a ovisno o kutu promatranja holograma moguće je vidjeti predmete koji stoje jedan iza drugoga. Promatrač koji gleda hologram ima dojam da gleda na svijetli predmet kroz okvir holograma.

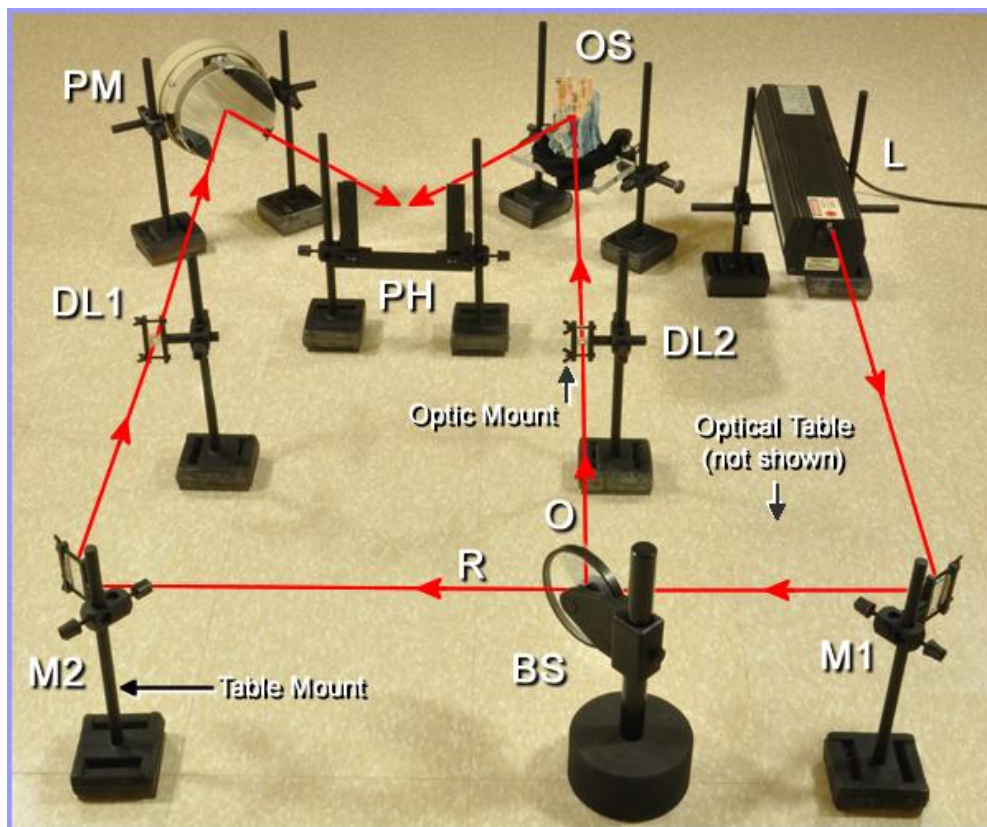


Slika 12. Rekonstrukcija holograma [8]

5. OPTIČKE KOMPONENTE ZA SNIMANJE HOLOGRAMA

Slika 13. prikazuje osnovnu postavu za snimanje transmisijskog holograma. Laserski snop lasera (L) putuje do prvog zrcala (M1) i reflektira se prema djelitelju snopa (BS) koji ga dijeli na dva snopa. Jedan je referentni snop (R), a drugi je predmetni snop (O). Referentni snop (R) putuje kroz djelitelj snopa do drugog zrcala (M2) i reflektira se do divergentne leće (DL1) koja širi snop koji se potom na paraboličnom zrcalu (PM) reflektira prema fotografskoj ploči (PH).

Istovremeno objektni snop (O) putuje do divergentne leće (DL2) koja širi snop koji osvjetljava objekt snimanja (OS) od kojeg se reflektira na fotografsku ploču (PH). Interferencijom referentnog i objektnog snopa na fotografskoj ploči nastaje holografski interferencijski uzorak na mikroskopskoj razini.



Slika 13. Osnovna holografska postava: L – laser, BS – djelitelj snopa, M1 i M2 – zrcala, DL1 i DL2 – divergentne leće, PM – parabolično zrcalo, OS – objekt snimanja, PH – fotografska ploča, Table Mount/Optic Mount – držači, Optical Table – optički stol

[11]

5.1. Optički stol za snimanje holograma

Optički stol svojom konstrukcijom treba osigurati površinu izoliranu od utjecaja vibracija iz okoline.

5.2. Okolina

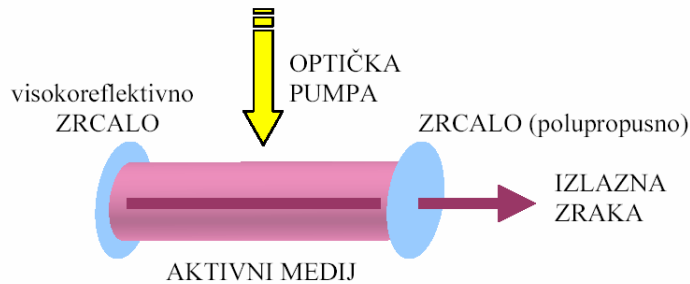
Optički stol treba biti postavljen u prostoriji koja je što je moguće više izolirana od vibracija te koja se može potpuno zamračiti jer fotografska ploča ne bi trebala biti izložena niti jednom drugom svjetlu osim onom od lasera koji se upotrebljava za osvjetljavanje holograma. Bilo kakvo strujanje zraka oko optičkog stola uzrokovat će pomicanje optičkih elemenata što onemogućuje snimanje holograma. Isto tako zagađivači iz zraka prijanjaju na optičke površine i uzrokuju distorzije te zagušuju laserski snop.

5.3. Laser

Laser je izvor svjetlosti kod kojeg se za razliku od konvencionalnih izvora svjetlosti, svjetlost generira mehanizmom stimulirane emisije. Akronim LASER znači *Light Amplification by Stimulated Emission or Radiation*. [8] Preteča lasera je maser koji radi na jednak način kao laser, ali u drugom frekvencijskom području. Maser je izvor mikrovalova, dok je laser izvor elektromagnetnih valova u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra. Ukupni elektromagnetni spektar proteže se od radio valova (valne duljine $10^4 - 10^2$ cm) do gama zračenja (valne duljine $10^{-10} - 10^{-12}$ cm).

Lasersko zračenje, u odnosu na zračenje običnih svjetlosnih žarulja, karakterizira koherentnost, usmjerenost i monokromatičnost. Koherentno zračenje je zračenje kod kojeg svi svjetlosni valovi od kojih je ono sastavljeno titraju u fazi (svi su događaji sinkronizirani). Laserska zraka je usmjerena, dakle zračenje se rasprostire samo u relativno uzak prostorni kut, pa su i udaljenosti rasprostiranja takvog zračenja velike. Nadalje, lasersko zračenje je monokromatsko, tj. sastoji se od relativno uskog frekventnog spektra, odnosno samo od jedne boje.

Osnovne dijelove lasera čine rezonator (dva zrcala), aktivni laserski medij i optička pumpa (Slika 14.).



Slika 14. Shematski prikaz osnovnih dijelova lasera [12]

5.3.1 Princip rada lasera

Na atom u stabilnom stanju upada foton odgovarajuće energije kojeg emitira optička pumpa, pa dolazi do apsorpcije fotona te elektron prelazi u pobuđeno stanje (stanje više energije). Nakon kratkog vremena elektron se iz pobuđenog stanja postupno vraća u osnovno stanje te emitira foton. Emitirani foton putuje po rezonatoru kojeg sačinjavaju dva zrcala i na jednom se zrcalu reflektira natrag. Kada ponovno dolazi do atoma zatekne ga u pobuđenom stanju jer je on u međuvremenu primio novi foton od optičke pumpe. Neravnotežno stanje u atomu u kojem je naseljenost nekog pobuđenog stanja veća od naseljenosti osnovnog stanja naziva se inverzija naseljenosti. Inverzija naseljenosti je nužan uvjet za generiranje laserske emisije. U uvjetima inverzije naseljenosti stimulirana emisija nadjača spontanu emisiju i pri tome dolazi do pojačanja intenziteta svjetlosti, odnosno laserske emisije. Fotoni nastali procesom stimulirane emisije potpuno su identični i upravo je to uzrok koherentnosti laserskog zračenja.

Laseri se razlikuju po različitim aktivnim laserskim medijima u kojima se stvara lasersko zračenje, što određuje osnovna svojstva emitiranog zračenja (frekvenciju, spektralnu poluširinu, snagu...). Aktivni laserski medij može biti plin, pa su to plinski laseri (He-Ne, Ar, Xe, CO₂, N₂), kristal (Ti:safir, Nd:YAG,...), organska boja, molekula (KrF, ArF, XeCl) ili poluvodič (diodni, elektronski laseri). S obzirom na raspodjelu emitiranog zračenja u vremenu, laseri mogu biti kontinuirani i pulsni. Kod kontinuiranih lasera svjetlost je konstantna u vremenu, dok se kod pulsni lasera svjetlost periodički mijenja u vremenu.

5.3.2. Primjena lasera u holografiji

Laseri koji se načešće koriste u holografiji su plinski, od kojih je najzastupljeniji He-Ne laser jer je relativno najjeftiniji, te razni ionski laseri, kao što su argonski, kriptomski te He-Cd laseri. U upotrebi su i kristalni laseri od kojih u holografiji prednjači rubinski laser. [1]

5.4. Djelitelj snopa

Djelitelj snopa ima tri važne funkcije: 1. razdvojiti laserski snop na dva dijela (referentni i objektni snop), 2. kontrolirati intenzitet oba snopa, 3. precizno usmjeriti oba snopa.

5.5. Zrcala

Zrcala služe reflektiranju predmetnog i referentnog vala u različitim smjerovima nad optičkim stolom.

5.6. Divergentna leća

Uloga divergentne leće je da uski laserski snop raširi kako bi fotografska ploča i objekt bili ujednačeno osvijetljeni. Može biti jednostavna bikonkavna leća ili složeniji optički instrument, kao što je mikroskopski objektiv.

5.7. Parabolično zrcalo

Parabolično zrcalo je zrcalna površina u obliku rotacijskog paraboloida. Uloga paraboličnog zrcala je da kolimira (učini paralelnim) divergirani referentni snop kako bi holografska slika bila uvećana.

5.8. Držači (okviri) optičkih elemenata

Držači su potrebni ne samo da učvršćuju, podupiru i stabiliziraju optičke komponente nego i da osiguraju da laserski snop bude paralelan sa optičkim stolom te da bude na određenoj visini od površine.

6. RAČUNALNO GENERIRANJE HOLOGRAMA

Računalno generirani hologram (CGH) je hologram načinjen računalnim izračunavanjem interferentnog uzorka nastalog interferencijom objektnog i referentnog vala. Da bi se formirao hologram, mora se učiniti točna analogija s optički snimljenim hologramom. To se radi tako da se izračuna raspodjela svjetla na fotografskoj ploči, doda se referentni val, sve se zbroji i kvadrira. Dobiveni rezultat se crta uz pomoć plotera (uvećan predložak) i predložak se prenosi na fotografsku ploču. Tako dobivamo hologram (jednako kao i kod klasične holografije) osvjetljavamo laserskom svjetlošću da bi rekonstruirali valnu frontu i dobili sliku predmeta. [13]

Nepostojanje stvarnog fizičkog objekta kojeg je potrebno snimati, već mogućnost odabira bilo kojeg virtualnog ili stvarnog objekta čija se slika može matematički modulirati, osnovna je prednost računalno generiranih holograma. Time je također omogućeno povećanje ili smanjenje slike, dok to nije moguće kod optičke holografije gdje zapis ne dopušta smanjivanje ili povećanje realnih dimenzija.

Sama oprema koja služi za snimanje holograma može biti izvor problema u stvarnom svijetu. Neadekvatna kvaliteta lasera i optike može narušiti kvalitetu određenih karakteristika holograma. U virtualnom svijetu takvi problemi ne postoje jer su sve komponente matematički definirane i kao takve su savršene. Laseri su savršeno koherentni i kolimirani, optika je beskonačno precizna i za razliku od snimanja analognih holograma za koje je uvijek potreban neki vremenski period, virtualni hologrami se snimaju u beskonačno kratkom virtualnom vremenu. [14].

Računalno generirani hologrami pohranjeni su u računalnim datotekama u formi matrica, kod kojih svaki element matrice predstavlja jedan piksel konačnog holograma koji definira fazu i amplitudu generirane valne fronte. Da bi se matematički izračunati složeni interferentni uzorak transformirao u stvarni fizički oblik, matrični se elementi moraju transformirati u parametre optičkog medija (filma). Takav optički medij modulira amplitudu i fazu svjetlosnog vala kojeg upotrebljavamo za rekonstrukciju holograma.

Računalno generirani hologrami našli su svoju primjenu kao elementi zaštitnog tiska. Pritom, gledajući hologram iz određenog kuta možemo vidjeti generiranu sliku ili pak više slika pod različitim kutovima (image flip) ili blagim zakretanjem kuta difrakcije trodimenzionalnog predmeta. Daljnja prednost je mogućnost generiranja mnoštva sitnih detalja na i oko predmeta (logotip, kodovi i sl.) koje nismo u mogućnosti realizirati na realnom predmetu. Postoji i mogućnost nasumičnog generiranja tih detalja, tako da ni mi ne znamo gdje se oni nalaze. Zahvaljujući efektu redundancije, možemo izraditi ili aplicirati samo dio holograma, budući da nam bilo koji njegov dio prikazuje cjelovitu sliku predmeta. Ipak, dio informacije se gubi, pa je u slučaju krivotvorine usporedbom s originalom lako ustanoviti da je riječ o kopiji. [16].

6.1. Računalno generirani hologram kao element zaštite na putovnicama

Računalno generiranje holograma omogućuje implementaciju dodatnih elemenata zaštite u sam hologram. Kao mjera protiv krivotvorenja u hologramima koji se apliciraju na putovnice koriste se *interaktivni hologrami*. To su hologrami koji sadržavaju barem jedan sigurnosni element u obliku volumnog holograma koji je promjenjiv u interakciji s vanjskim podražajima tako da je efekt promjena slike prilikom promatranja iz različitih smjerova gledanja potaknut određenim vanjskim podražajem. Promjena koju izaziva podražaj takvih sigurnosnih elemenata mora biti relativno brzo reverzibilna (od 0.1 do 10 s). Krivotvoreni hologrami detektirali bi se po razlici u promjeni na podražaj ili po izostanku takve promjene što je relativno jednostavna metoda detekcije. [1]

7. PRIPREMA, TISAK I APLICIRANJE HOLOGRAMA NA GOTOV PROIZVOD S NAGLASKOM NA NJIHOVU PRIMJENU U ZAŠTITNE SVRHE NA PUTOVNICAMA

Kao elementi za zaštitu raznih dokumenata poput putovnica, osobnih iskaznica, bankovnih kartica, sportske opreme, kozmetičkih proizvoda, farmaceutskih proizvoda i računalnih programa, danas se najčešće upotrebljavaju tiskani i fotopolimerni hologrami. Fotopolomerni hologrami se zbog brojnih prednosti sve više upotrebljavaju u te svrhe nad tiskanim hologramima.

7.1. Tehnika izrade tiskanog holograma

Proces izrade tiskanih holograma možemo podijeliti u nekoliko faza: izrada master holograma, elektrooblikovanje i metaliziranje, otiskivanje.

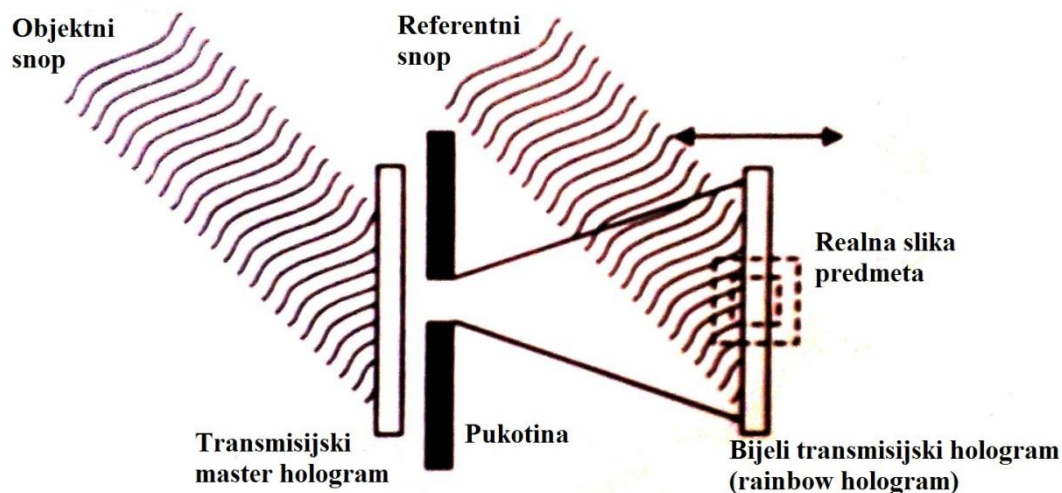
7.1.1. Izrada master holograma

Za izradu tiskanog holograma u prvoj fazi je potrebno izraditi master hologram. To je najzahtjevnija faza u procesu izrade tiskanog holograma. Najčešće je master hologram bijeli transmisijски hologram, ali se master hologrami mogu podijeliti na: refleksijski master hologram i transmisijски master hologram.

Kod snimanja refleksijskog holograma djelitelj snopa razdvaja laserski snop na referentni i objektni snop u omjeru 1:1. Iako su teoretski oba snopa jednakog intenziteta u stvarnosti je referentni snop malo svjetliji jer objektni snop dolazi do fotografske ploče reflektiran od predmeta koji snimamo.

Kod snimanja transmisijskog holograma djelitelj snopa razdvaja laserski snop na referentni i objektni snop u omjerima 4:1. Za razliku od refleksijskog holograma gdje referentni i objektni snop padaju na fotografsku ploču s iste strane, kod transmisijskog holograma zrake se nalaze sa različitih strana fotografske ploče.

Budući da najčešće trebamo bijeli transmisijски hologram, transmisijски master hologram okrenemo za 180° kako bismo dobili realnu sliku predmeta. Nakon toga, snimanjem istog transmisijskog master holograma kroz pukotinu dobivamo bijeli transmisijски hologram. [13]



Slika 15. Shematski prikaz dobivanja bijelog transmisijskog holograma od transmisijskog master holograma [13]

7.1.2. Elektrooblikovanje i metaliziranje

U procesu elektrooblikovanja se na snimljeni bijeli transmisijski hologram u fotorezistu nanosi sloj nikla, te nastaje matrica 1. generacije. Matrica 1. generacije se uklanja s fotorezista, te se na nju procesom elektrooblikovanja ponovno nanosi sloj nikla čime dobivamo matricu 2. generacije, koja nam služi kao tiskovna forma u procesu otiskivanja holograma.

Elektrooblikovanje je elektrokemijski proces taloženja metala iz otopine koja sadrži ione metala kojeg taložimo. To je i katodni proces, dakle u samom elektrokemijskom sustavu izradak je katoda. Pri tome podloga kao i sama otopina moraju biti vodljive.

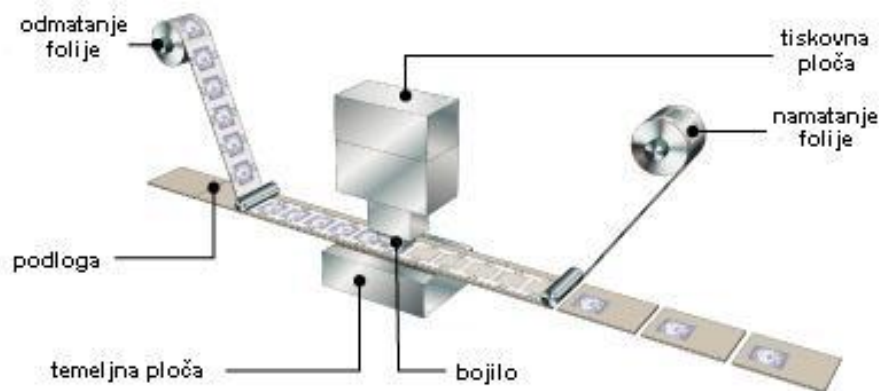
Operacije koje se izvode nakon elektrooblikovanja su strojna i završna obrada istaloženog metala, odvajanje matrice od nosača i podlaganje. Mehaničko odvajanje matrice od trajnog nosača izvodi se udarcem ili iznenadnim potezanjem, postepenom silom, hlađenjem, grijanjem ili polugom u slučaju relativno ravnih dijelova. Potrošni nosači se odvajaju od matrice ovisno o vrsti materijala od kojeg su izrađeni, uglavnom

otapanjem u kiselinama ili lužinama, taljenjem te zagrijavanjem. Podlaganje matrice izvodi se stavljanjem matrice na podlogu od nekog drugog materijala koji se onda obrađuje na potrebne dimenzije kako bi se matrica mogla fiksirati u tiskarski stroj. [15]

7.1.3. Proces otiskivanja holograma

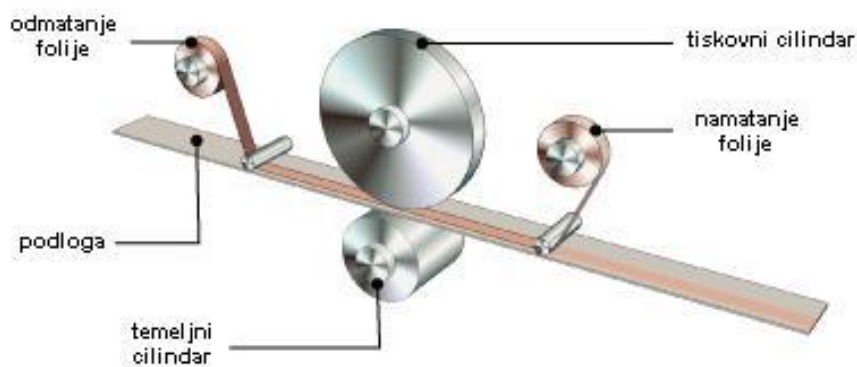
Otiskivanje holograma na željenu tiskovnu podlogu ostvaruje se mehaničkim pritiskom pri povišenoj temperaturi sistemom ploča o ploču ili valjak o valjak. Sama konstrukcija tih sistema istovjetna je konstrukciji klasičnih tiskarskih strojeva.

Otiskivanje pritiskom ploče o ploču, *hot-stamp* folija otiskuje se na podlogu diskontinuiranim pomacima zagrijane matrice gore dolje pri čemu oblik matrice određuje oblik otiska (Slika 16.). Ova metoda se koristi kod potrebe za vrlo preciznim otiskivanjem pojedinačnih holograma na točno definirano mjesto na podlozi.



Slika 16. Otiskivanje pritiskom ploče o ploču [16.]

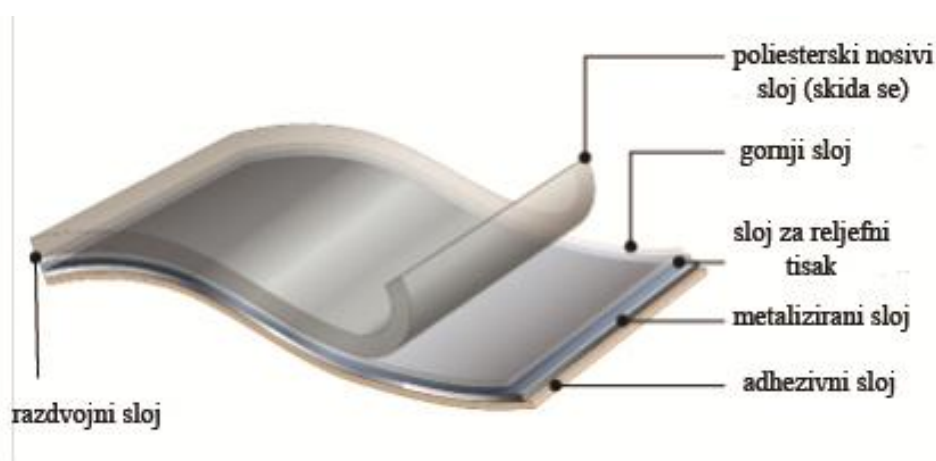
Prilikom otiskivanja valjak o valjak (Slika 17.), zagrijani cilindar rastaljuje razdvojni i adhezivni sloj folije, što uzrokuje trajno prijanjanje slojeva laka s podlogom (plastikom, termalnim ili običnim papirom). Otiskivanje je u ovom slučaju kontinuirani proces, pa se ne koristi kod naklada koje zahtijevaju veliku preciznost.



Slika 17. Otiskivanje sistemom valjak o valjak [16.]

7.1.4. Tiskovne podloge za izradu holograma

Otisak holograma se izvodi na specifičnoj višeslojnoj podlozi. Takozvana *hot-stamp* folija (Slika 18.) sastoji se od poliesterskog nosivog sloja debljine oko 12-25 μm na koji je nanesen razdvojni sloj čija je temperatura tališta unutar usko određenog raspona. Zatim slijedi niz slojeva laka koji daju foliji otpornost na trošenje, a ujedno predstavljaju i medij u koji se pod temperaturom i pritiskom utiskuje reljefna struktura holograma. Metalizirani sloj, najčešće aluminijski, povećava svjetlinu holograma i reflektira svjetlost s površine holograma. Na metaliziranom sloju nalazi se adhezivni sloj koji osigurava adheziju podloge na metalni sloj. [17]



Slika 18. *Hot-stamp* folija [17]

Otiskivanje se odvija uz povišenu temperaturu s vrućim cilindrima kada se reljef matrice utiskuje u termoplastični lak. Nakon otiska lak se presvlači metalom što otisak čini vidljivim. Postupak nakon premazivanja metalom odnosi se na prenošenje holograma na željenu tiskovnu podlogu. Zagrijavanjem se uklanja nosivi sloj te hologram ostaje na podlozi zaštićen samo slojem laka (Slika 19.) Zbog sloja metala kojim se presvlači lak dobiveni hologram vrlo dobro reflektira svjetlost te je vidljiv na običnom dnevnom svjetlu, a najbolja jasnoća slike postiže se upadom svjetlosti pod kutem od 45°. [16]



Slika 19. Prijenos na željenu tiskovnu podlogu [16]

7.1.5. Strojevi za otiskivanje holograma

Strojevi za otiskivanje holograma mogu tiskati iz role ili iz arka. Za otiskivanje holograma koriste se zaklopni strojevi sa temeljnom i tiskovnom pločom ili rotacijski tiskarski strojevi sa temeljnim i tiskovnim cilindrom, a najveće brzine otiskivanja su veće od 7000 otisaka/h. Na rotacijskim strojevima tiska se iz role ili iz arka, dok se na zaklopnim strojevima izvodi tisak iz arka. Povećanjem brzine otiskivanja opada kvaliteta tiska, koja je ovisna o temperaturi i pritisku. [18]

7.2. Tehnika izrade fotopolimernih holograma

Fotopolimerni hologrami izrađuju se postupkom koji možemo usporediti s klasičnim procesom tiska. Umjesto tiskarske boje, za dobivanje vidljive slike koristi se laserska svjetlost. Uz pomoć laserske svjetlosti slika se kontaktno kopira sa master holograma. Master hologram u ovom slučaju ima istu ulogu kao tiskarski cilindar kod ofsetnog tiska iz role ili arka. Odnosno, master hologram ima ulogu tiskovne forme koja se koristi u klasičnom otiskivanju, a laserska svjetlost ima ulogu tiskarske boje.

Proces proizvodnje obično započinje dvodimenzionalnim predloškom koji preporučuje naručitelj. Nakon toga dizajneri stvaraju trodimenzionalna idejna rješenja zadanog predloška. Kada naručitelj odabere konačan dizajn izrađuje se probni hologram. Odobreni master hologram se nakon toga masovno reproducira. Tako se dobiva fotopolimerni hologram koji nosi sliku kroz cijeli presjek fotosenzitivnog filma. Obično su takvi hologrami smješteni na nosaču, u obliku naljepnica, koji je namotan u rolu. Te se naljepnice kasnije mogu prenijeti na ambalažu ili druge proizvode koje zaštićujemo od krivotvorenja.

7.2.1. Karakteristike fotopolimernog holograma i njegova primjena

Velika prednost fotopolimernog holograma u odnosu na tiskani hologram je niz proizvodnih mogućnosti. Fotopolimerne slike mogu biti laminirane različitim adhezivima, zaštitnim filmovima, podlogama koje povećavaju kontrast te premazani nizom različitih zaštitnih premaza. Odabrane holografske slike mogu se primijeniti bez vrućeg otiskivanja čime se često pojednostavnjuje primjena holograma u cilju zaštite proizvoda.

Fotopolimerni hologram karakterizira jasan trodimenzionalan prikaz snimljenog predmeta te intenzivne boje. Zbog jedinstvenog vizualnog učinka i unaprijeđenih zaštitnih oblika, danas se sve više primjenjuju na putovnicama, bankovnim karticama, identifikacijskim iskaznicama itd.

7.3. Kinegram®

Kinegram je visoko-zaštićeni sigurnosni element, brend jedne vrste holograma tvrtke *OVD Kinegram AG*. To je računalno generirani hologram koji se primarno koristi za zaštitu državnih dokumenata. Kako samo ime nalaže, slika Kinegrama predstavlja kinetičko-optičke efekte koje promatrač može vrlo lako uočiti.

Kinegram se bazira na jedinstvenom procesu izrade optički varijabilnih linija vrlo visoke rezolucije. Linije su kreirane na način da tvore niz dinamičkih slika koje zakretanjem kinegrama stvaraju pokret. Svaki kinegram je izrađen prema zahtjevima kupca, a sastoji se od niza elemenata različitih nivoa sigurnosti.

Neki od tih elemenata su kinetički *guilloche*-i, razne linijske strukture čije kretanje unutar samog kinegrama mogu biti linearne, radijalne, rotirajuće, zatim razne mikro-strukture koje ne mogu biti kopirane niti sofisticiranim optičkim tehnikama bez gubitka njihovih karakteristika, nevidljivi mikroprofili koji vrše difrakciju upadnog svjetla i mnogi drugi.



Slika 20. Transparentni Kinegram® na identifikacijskoj stranici putovnice RH

[19]

Prednosti Kinegrama pred standardnim hologramom su slijedeće: lagana verifikacija i prepoznatljivost, velika uočljivost čak i pri malom osvjetljenju, kinetička slika, neograničene mogućnosti izrade dizajna, vrlo fleksibilna tehnologija izrade koja omogućuje prilagodbu dizajna prema određenom nivou sigurnosti koju zahtijeva kupac, aplikacija Kinegrama se ograničava na visoko zaštićene dokumente i ne koristi se za aplikaciju na komercijalne proizvode za razliku od holograma, moguća je integracija strojno čitljivih elemenata.

Kinegrami mogu biti izrađeni u obliku potpuno metaliziranih, djelomično metaliziranih i potpuno demetaliziranih folija. U izradi putovnica, najčešće se koriste potpuno demetalizirane Kinegram folije jer su transparentne te mogu služiti za djelomično prekrivanje fotografije ili potpuno prekrivanje identifikacijske stranice, što predstavlja vrlo dobar zaštitni element. [19]

8. TEHNIČKE I ESTETSKE POSEBNOSTI HOLOGRAMA

8.1. Prostorna paralaksa

Paralaksa se opisuje kao promjena vidnog kuta koja se konstantno zbiva u našem oku, zbog čega nam predmeti oko nas djeluju različito udaljeni. Jednako kako naše oko trodimenzionalno doživljava predmete oko nas, na isti način doživljava i trodimenzionalnost njihove holografske rekonstrukcije. Mijenjanjem kuta gledanja promatrač doživljava nove prostorne prikaze istog objekta, a ne samo frontalni prikaz. To je moguće jer u hologram nije spremljen statički prikaz, nego sve optičke informacije i informacija o perspektivi objekta.

8.2. Višestruke scene

Jedna od najzanimljivijih karakteristika holograma je mogućnost snimanja više neovisnih scena u istom volumenu (holografskoj ploči), te njihova odvojena reprodukcija ovisno o različitom upadnom kutu referentne zrake na ploču.

Pri izradi višetrukog holograma (sa više od jedne scene), najprije se snimi prvi objekt, zatim se osvjetljenje prekida i osvjetli se drugi objekt, ali pod različitim upadnim

kutem referentne zrake. Nastali interferentni uzorak sastoji se od dva neovisna niza hiperbola, a prilikom rekonstrukcije holograma, ovisno o upadnom kutu referentne zrake, bit će rekonstruirana valna fronta jednog ili drugog objekta. Ovo vrijedi i za realnu i virtualnu sliku.

8.3. Redundancija slikovne informacije

Ukoliko hologram razbijemo u više dijelova, svaki će dio dati sliku gotovo cijelog objekta, ali samo onaj prostorni kut koji vidi taj dio holograma. Smanjivanje veličine holograma rezultirat će gubitkom perspektive, rezolucije i svjetline u odnosu na cijeli hologram. Svaki će, pa i najmanji dio snimljenog holograma pri rekonstrukciji dati sliku cijelog snimljenog objekta. Dakle, veličina holografske ploče korištene pri izradi holograma je neovisna o veličini scene. Veliki hologram možemo smatrati sumom više manjih holograma. To svojstvo koristi se pri snimanju bijelih refleksijskih holograma.

Ova karakteristika koristi se kod zaštitnih holograma. Naime, prilikom tiska otiskuje se samo dio holograma koji sadrži informacije o originalu. Ta se informacija gubi prilikom kopiranja, tako da se odmah može zaključiti je li hologram original ili kopija.

8.4. Omjer intenziteta referentnog i objektnog snopa

Praktična holografija zahtijeva da referentna zraka bude većeg intenziteta od svjetla reflektiranog od bilo koje točke objekta. Odnos intenziteta svjetla između referentne i objektno zrake varira od 1:1 do 1:10 što se postiže upotrebom djelitelja snopa prilikom snimanja. Zbog te razlike u intenzitetu, veća je reflektivnost „zrcala“ formiranih interferencijom referentnog i objektnog snopa od reflektivnosti „zrcala“ nastalih nepoželjnom interferencijom zraka reflektiranih od bilo koje dvije točke objekta.

8.5. Ograničenja

Uz same uvjete prilikom snimanja i razvijanja holograma postoji još niz ograničenja koji sužavaju upotrebu holograma. Jedan od njih je i izbor objekta koji snimamo. Objekti trebaju biti svijetli, ali bez blještavila jer bolje reflektiraju svjetlost od tamnih boja. Veličina objekta ograničena je formatom holografske ploče na

koju se snima. Snimanje objekata u pokretu moguće je samo korištenjem pulsno rubinskog lasera, ali tada je ograničena prostornost scene. Postoji i ograničenje na monokromatske prikaze, uz izuzetak tzv. „rainbow“ holograma, što znači da će hologrami snimljeni crvenom svjetlosti He-Ne lasera prilikom rekonstrukcije biti crvene boje. Ukoliko želimo snimiti višebojne holograme kombinira se svjetlost iz triju lasera (crvenog, zelenog, plavog) u jednu jedinu zraku.

Kao i u svim sustavima za prenošenje informacija, izlazna informacija uvijek je popraćena pozadinskim šumom. Pri snimanju holograma osim tzv. šuma zrna, uzrokovanog samom veličinom zrna u fotografskoj emulziji, tj. raspršivanjem svjetla pri nailasku na zrno srebra, javlja se tzv. intermodulacijski šum. Kada je objekt koji snimamo točkasti izvor intermodulacijski šum nije uopće prisutan. S druge strane, što je predmet veći i što je bliže holografskoj ploči, to je veća i prostorna frekvencija neželjenih interferentnih uzoraka, a samim time povećava se i problem šuma. [15]

9. TENDENCIJE RAZVOJA PRIMJENE HOLOGRAMA

Hologrami su svoju primjenu našli u mnogim industrijskim granama, tako i u grafičkoj. Otiskivanje holograma najčešći je i ekonomski najisplativiji način za njihovo masovno umnožavanje. Alternative, kao što su fotopolimerni filmovi ili filmovi oslojeni emulzijom srebro-halogenida, mogu biti i do deset puta skuplje u odnosu na otisnute materijale. Danas se hologrami u grafičkoj industriji primjenjuju kao dekoracija na ambalaži, za izradu ukrasnih papira, ali najčešće se koriste kao elementi za zaštitu proizvoda. [17]

Krivotvorenje proizvoda u porastu je u velikom broju industrijskih grana, a svjetski gubici koji su posljedica krivotvorenja premašuju 250 milijardi dolara godišnje. Hologrami spadaju u DOVID (*Diffractive Optical Variable Image Devices*), te ih je nemoguće kopirati na fotokopirnim uređajima, skenirati ili otisnuti bilo kojom standardnom tehnikom tiska. DOVID su bazirani na difrakcijskim strukturama sadržanim u slojevima folije, a vidljivi su kao različiti uzorci, boje ili pokreti ovisno o kutu promatranja i kutu osvjetljenja.

Zaštitni hologrami danas se često koriste na ambalaži (CD-ima, kozmetici, farmaceutskim proizvodima, sportskoj opremi i sl.), raznim ulaznicama, identifikacijskim karticama, kreditnim karticama, vrijednosnim papirima (novčanice, dionice, vladine vrijednosnice i sl.), putovnicama i ostalim proizvodima koji su podložni krivotvorenju. Svi europski proizvođači holograma članovi su IHMA-e (Internacional Holographic Manufacturers Association), koja evidentira svaki izrađeni hologram i ograničava pravo korištenja postojećih holograma. [15]

Holografija ima tendenciju razvoja u smjeru masovne primjene u svrhu zaštite i proizvođača i potrošača; na prehrambenim i farmaceutskim proizvodima, na dokumentima, financijskim markicama, novčanicama te svim vrstama grafičkog i medijskog proizvoda. Holografija je u službi kontrole financijskih tokova, kontroli poreza i transakcija na državnoj razini.

Primjena holografije je sve veća na dokumentima koji se kasnije nadopunjavaju tiskom na laserskim pisačima.

Prvi korak zaštite ambalaže proizvoda je upotreba holograma u tisku, tehnike koja se ne može reproducirati ili kopirati niti jednom drugom grafičkom tehnikom. Najčešći dodaci su zaštite koje se utvrđuju strojnim čitanjem.

Sami "zaštitni elementi" neće doprinjeti uspjehu ako se ne provodi edukacija o postojanju, važnosti tih grafika, te o razlikovanju originala od mogućih falsifikata. Strategija zaštite sadrži kontinuirano razvijanje novih patenata kako bi se zaskočilo napredovanje falsifikatorskih i raznih alternativnih metoda falsificiranja. Ne smije se stvoriti standard u postupcima zaštite u tisku već su potrebna stalna unapređenja kroz tehnologiju i znanost, kroz nove fizikalno kemijske sustave zaštite. Najbolje zaštite su vrhunska kodiranja prepoznavanja slike i boje, ali te zaštite su samo strojno čitljive različitim laserskim sustavima što ne osigurava običnom potrošaču bilo kakvu verifikaciju. Mijenjanje strategije zaštite je nužno što zahtjeva nove toškove. S druge strane mogu nastati značajne štete ako se ovom pitanju ne posveti dužna pažnja.

Hologram otvara mnoge mogućnosti u razvoju višeslojne vizualne poruke, poruke u pokretu i prostornog 3D prikaza. Moguće ga je dotiskivati na ambalažu u modificiranim serijama i oblicima, za svaku seriju proizvoda posebno. Male naklade mogu se vrhunski realizirati digitalnim tiskom koji podnaša troškovnu realizaciju u niskoj nakladi, što je izvrsno za posebne primjene: svečanosti, poslovne poklone, ali čak i samo jedan primjerak grafičkog proizvoda povodom nekog događaja. [20]

10. ZAKLJUČAK

Holografija je od Gaborovih eksperimenata prevalila dug put i odavno je svoju primjenu pronašla u širokom spektru djelatnosti (umjetnički radovi, naljepnice, farmaceutski proizvodi, ambalaža, elektronički uređaji i mediji kao CD-i, novčanice, putovnice itd.), a definitivno je jedna od najvećih prednosti njezina primjena u svrhu zaštite.

Hologrami kao elementi zaštite dokumenata onemogućuju njihovo krivotvorenje bilo kojom tehnikom otiskivanja ili umnožavanja dokumenata (npr. skener ili fotokopirni uređaj) iz razloga što se u postupku kontrole tih dokumenata odmah uočava razlika između originalnog i krivotvorenog dokumenta.

Međutim, da bi se održala takva razina sigurnosti i zaštite dokumenata, potrebno je pratiti razvoj tehnologije i težiti razvoju inovativnih rješenja, čime se otvaraju mogućnosti primjene novih patenata zaštite a samim time i uređaja za kontrolu i detekciju krivotvorina.

11. LITERATURA

1. Ackermann G., Eichler J. (2007). *Holography - A Practical Approach*, Wiley-VCH, Weinheim
2. ***<http://www.web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/pazanin/povijest.htm>, 4.8.2014.
3. ***<http://www.holophile.com/history.htm>, 4.8.2014.
4. Saxby G. (2004). *Practical Holography 3rd edition*, IOP, London
5. Vacca J. (2001). *Holograms & Holography: Design, Techniques, & Commercial Applications*, Charles Rivermedia, Inc., Hingham
6. ***<http://www.webmuseum.mit.edu/browser.php?m=objects&kv=68318&i=15146>, 4.8.2014.
7. Detlaf, A. A., Javorski, B. M. (2008.) *Priručnik iz fizike*, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb
8. Bistričić, L., Henč-Bartolić, V. (2001.) *Predavanja i auditorne vježbe iz fizike lasera*, Element, Zagreb
9. Pažanin, D. (2003./2004.) *Holografija*, dostupno na: <http://www.web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/pazanin/holografija.doc>, 16.8.2014.
10. ***<http://www.hololight.net/materials.html>, 1.9.2014.
11. ***http://www.3dimagery.com/build_overview.html, 17.8.2014.
12. ***<http://www.azoo.hr/images/stories/dokumenti/Laseri.pdf>, 20.8.2014.
13. Gvozdrenović N., (2002). *Hologram i njegova primjena u zaštiti dokumenata od krivotvorenja*, diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
14. Divjak A., (2012). *Računalno generiranje holograma fotorealističnih 3D ljudi*, diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
15. Pajazetović A., (2005). *Izrada i primjena holograma u grafičkoj industriji*, diplomski rad, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
16. Vujica M., (2012). *Hologrami kao elementi zaštitnog tiska*, Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
17. ***<http://www.kurz.de/en/>, 1.9.2014.
18. ***http://www.hlhologram.com/Hologram_machine_list.htm, 1.9.2014.
19. Stražnický, Ž., (2011). *Mehanički utjecaj na postojanost funkcionalnosti i kvalitete elektroničke putovnice*, magistarski rad (predboljonjski sustav), Grafički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
20. ***<http://www.ziljak.hr/tiskarstvo/tiskarstvo05/1vilko.html>, 1.9.2014.

