

# Lasersko graviranje transmisijskih računalno generiranih holograma na površinu polikarbonatnih materijala

---

Puzjak, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Graphic Arts / Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:216:167698>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Graphic Arts Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAFIČKI FAKULTET

MARIJA PUZJAK

**LASERSKO GRAVIRANJE TRANSMISIJSKIH  
RAČUNALNO GENERIRANIH HOLOGRAMA NA  
POVRŠINU POLIKARBONATNIH MATERIJALA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu  
Grafički fakultet

MARIJA PUZJAK

**LASERSKO GRAVIRANJE TRANSMISIJSKIH  
RAČUNALNO GENERIRANIH HOLOGRAMA NA  
POVRŠINU POLIKARBONATNIH MATERIJALA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Modrić

Studentica:

Marija Puzjak

Zagreb, 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**GRAFIČKI FAKULTET**

**Getaldićeva 2**

**Zagreb, 15. 9. 2023.**

Temeljem podnijetog zahtjeva za prijavu teme diplomskog rada izdaje se

## **RJEŠENJE**

kojim se studentu/ici Mariji Puzjak, JMBAG 0128063325, sukladno čl. 5. st. 5. Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada od 13.02.2012. godine, odobrava izrada diplomskog rada, pod naslovom: Lasersko graviranje transmisijskih računalno generiranih holograma na površinu polikarbonatnih materijala, pod mentorstvom prof. dr. sc. Damira Modrića.

Sukladno čl. 9. st. 1. Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada od 13.02.2012. godine, Povjerenstvo za nastavu, završne i diplomske ispite predložilo je ispitno Povjerenstvo kako slijedi:

1. doc. dr. sc. Itrić Ivanda Katarina, predsjednik/ica
2. prof. dr. sc. Modrić Damir, mentor/ica
3. izv. prof. dr. sc. Budimir Ivan, član/ica

Dekan  
Prof. dr. sc. Klaudio Pap



*Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Modriću na pruženoj prilici da istražujem ovu temu te na svim korisnim savjetima i smjernicama. Također, zahvaljujem dr. sc. Vladimiru Cviljušcu na njegovom neumornom trudu i predanosti ovom radu.*

*Posebno zahvaljujem svojoj obitelji na stalnoj podršci.*

## SAŽETAK

Hologram je trodimenzionalna slika kreirana interferencijom koherentnih svjetlosnih zraka. Tako dobiveni interferencijski uzorak zapisan na fotoosjetljivom materijalu sadržava sve informacije o rasporedu, jakosti, smjerovima i fazama svjetlosnih valova reflektiranih od predmeta u trenutku snimanja. Zabilježene interferencijske pruge su optička rešetka kroz koju se svjetlost otklanja od početnoga smjera i konstruktivnom interferencijom u nekim smjerovima pojačava te tako reproducira sliku visoke rezolucije u trima dimenzijama.

U postupku izrade holograma klasičnu je holografiju zamijenila računalno generirana holografija u kojoj se numeričkim metodama simuliraju fizikalne osnove holografije. Zbog specifičnosti zapisa informacije i zahtjevnog postupka izrade, hologrami su glavnu primjenu pronašli u zaštitnom tisku. Hologrami se za tu namjenu izrađuju na nekoliko načina (CtF ispis, lasersko graviranje, embosiranje, ...).

U ovom radu prikazan je zapis transmisijskih računalno generiranih holograma na polikarbonat s pomoću laserskog graviranja. Za potrebe ovog rada upotrijebio se fiber laser, valne duljine 1064 nm, polikarbonat kao materijal na koji je zapisan hologram. Za konačan rezultat izrađen je primjer dokumenta koji sadrži nekoliko transmisijskih računalno generiranih holograma. Kako bi se ispitale pretpostavke kvalitetnog ispisa izrađen je set uzoraka koji su se upotrijebili za kalibraciju konačnog postupka.

**Ključne riječi:** holografija, računalno generirani hologram, lasersko graviranje, polikarbonat

## **ABSTRACT**

A hologram is a three-dimensional image created by the interference of coherent light beams. The resulting interference pattern recorded on the photosensitive material contains all the information about the arrangement, intensity, directions and phases of the light waves reflected from the objects at the time of recording. The recorded interference fringes are an optical grating through which light is deflected from the initial direction and amplified in some directions by constructive interference, thus reproducing a high-resolution image in three dimensions.

In the process of making holograms, classical holography was replaced by computer generated holography, in which numerical methods simulate the physical basis of holography. Due to the specificity of information recording and the demanding production process, holograms have found their main application in protective printing. Holograms for this purpose are made in several ways (CtF printing, laser engraving, embossing, ...).

In this work, the recording of transmission computer generated holograms on polycarbonate is demonstrated using laser engraving. For the purposes of this work, a fiber laser with a wavelength of 1064 nm and polycarbonate was used as the material on which the hologram was written. For the final result, an example document was created that contain several transmission computer generated holograms. In order to test the assumptions of quality printing, a set of samples was created that were used to calibrate the final process.

**Keywords:** holography, computer generated holograms, laser engraving, polycarbonate

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORIJSKI DIO.....</b>	<b>2</b>
2.1. HOLOGRAFIJA .....	2
2.2. FIZIKALNA OSNOVA.....	7
2.2.1. Interferencija i difrakcija .....	9
2.3. VRSTE HOLOGRAMA .....	11
2.3.1. Transmisijski hologrami .....	11
2.3.2. Refleksijski hologrami .....	12
2.3.3. Abrazijski hologrami .....	13
2.4. RAČUNALNO GENERIRANI HOLOGRAMI.....	15
2.5. NAČINI PROIZVODNJE.....	17
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>	<b>21</b>
3.1. CILJ I HIPOTEZE .....	21
3.2. METODOLOGIJA.....	22
3.3. IZRADA RAČUNALNO GENERIRANOG HOLOGRAMA.....	25
3.4. PRIPREMA ZA LASERSKO GRAVIRANJE.....	27
3.5. IZRADA TESTNIH UZORAKA .....	28
3.6. ANALIZA .....	30
3.7. IZRADA FINALNOGA ZAŠTITNOG ELEMENTA .....	37
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA .....</b>	<b>41</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>48</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>49</b>
<b>7. PRILOZI .....</b>	<b>51</b>
7.1. POPIS SLIKA .....	51
7.2. POPIS TABLICA.....	53
7.3. POPIS KRATICA .....	54



## 1. UVOD

Klasična holografija i računalno generirana holografija dvije su različite tehnike holografskog prikaza, a razlikuju se po načinu stvaranja holografske slike i primjene tehnologije. Kod klasične holografije za stvaranje holograma potreban je složeni postupak snimanja i obrade, koji uključuje postavljanje leća, zrcala, realnog objekta i laserskog svjetla. Za snimanje i rekonstrukciju holograma upotrebljavaju se valna svojstva svjetlosti, interferencija s pomoću koje se snimaju informacije objekta i difrakcija kojom se zatim rekonstruira snimljeni objekt.

Računalno generirana holografija ne koristi se fizikalnim metodama snimanja objekta nego se oslanja na numeričke metode kojim je simulirana fizikalna osnova holograma. Za izradu holograma upotrebljava se računalo i računalni algoritam s pomoću kojega se izračunavaju sve informacije objekta. Početne podatke čini 2D ili 3D objekt, koji se želi prikazati kao hologram, a obrađuje se u digitalnom obliku.

Računalno generirani hologrami mogu se izraditi na nekoliko načina – CtF ispis, ofsetni tisak, lasersko graviranje, embosiranje, itd. Zamisao ovog rada bila je ostvariti kvalitetan zapis transmisijskih računalno generiranih holograma na polikarbonat s pomoću laserskoga graviranja. Za izradu računalno generiranih holograma primijenio se fiber laser i polikarbonat kao materijal na koji su prvo izrađeni klinovi koji su služili za kalibraciju konačnog postupka. Nakon završene izrade klinova napravljena je optička i numerička analiza dobivenih holograma te su određeni parametri laserskog graviranja i postotci binarizacije interferencijskog uzorka koji su dali najbolje rezultate. Odabrani parametri i postotci binarizacije iskorišteni su za izradu finalnoga zaštitnog elementa.

## 2. TEORIJSKI DIO

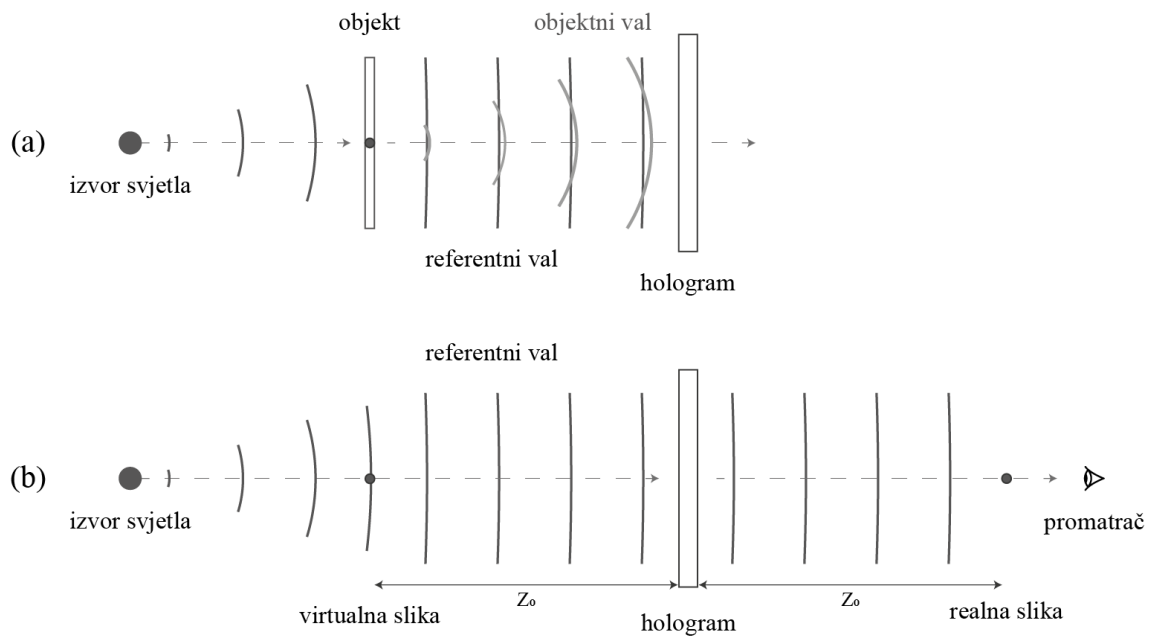
### 2.1. HOLOGRAFIJA

Kada svjetlost prođe kroz objekt ili se odbije od njega, ona se rasprši i nastane objektni val, a promatrač taj objektni val percipira kao vidljivu sliku ili oblik objekta. Objektni val obilježavaju dvije veličine: amplituda, koja odgovara svjetlini ili intenzitetu, te faza koja odgovara obliku objekta [1]. Pri snimanju objektnog vala na fotografski film, bilježi se raspodjela intenziteta svjetla, koja je vidljiva kao zatamnjenje na površini filma. Dobiveni rezultat je dvodimenzionalna slika, odnosno fotografija, koja je zabilježila samo intenzitet svjetla, a izgubila sve informacije o fazi. Gubitkom faze uništava se trodimenzionalno obilježje objekta, tj. nije moguće promijeniti perspektivu slike na fotografiji gledajući je iz drugog kuta. Fotografija je tako dvodimenzionalan zapis trodimenzionalne scene [2].

Za razliku od fotografije, holografija je metoda koja može zabilježiti amplitudu i fazu te se naziva i fotografija bez leće. Temeljne ideje holografije realizirao je 1948. godine Dennis Gabor, a riječ „holografija” izveo je od grčkih riječi „holos = potpuno” i „graphein” = pisati. Holografija označuje postupak trodimenzionalnog snimanja na dvodimenzionalnu površinu i prikazivanje informacija. U holografskom postupku na fotografski film snima se interferencijski uzorak koji nastaje kada referentni i objektni val interferiraju. Hologram se zatim ponovno osvjetli referentnim valom i rekonstruira se objektni val. Promatrač koji gleda hologram vidjet će trodimenzionalnu sliku objekta [3].

Dennis Gabor je izradio prvi hologram dok je radio na poboljšanju rezolucije elektronskog mikroskopa, a svoj rad nazvao je „eksperimentom slučajnosti”. Eksperiment je radio u dva koraka, snimanje i rekonstrukcija, a pritom se koristio živinom lučnom žaruljom kao izvorom svjetlosti, koja je u to vrijeme bila jedan od najboljih koherentnih izvora svjetla. Hologram koji je napravio bio je *in-line* transmisijski hologram, kojemu je objektna i referentna zraka dolazila iz istog smjera. Pri snimanju izvor svjetla i objekt morali su biti postavljeni okomito na fotografski film, a da bi snimanje holograma bilo moguće, morao se upotrijebiti proziran objekt (Slika 1 a). Na taj način dobivene su dvije zrake, objektna zraka, koja se odbila od objekta, i referentna zraka, koja je samo prošla kroz njega. Za rekonstrukciju primijenjena je ista referentna zraka pod istim kutom kao i

pri snimanju, ali sa stražnje strane holograma (Slika 1 b). Glavni nedostatak tog holograma bila je loša rekonstrukcija slike, i to zbog preklapanja virtualne i realne (konjugirane) slike s pravcem opažanja, pa je i rekonstrukcija bila loša i nerazlučiva [2, 4]. Gabor je svojim radom dokazao da dobiveni interferencijski uzorak sadržava sve informacije o izvornom objektu te da je moguće dobiti rekonstrukciju slike izvornog objekta. Iako je postignut uspjeh [5], daljnja su istraživanja u području holografije zaustavljena jer nije bilo dostupnih kvalitetnih koherentnih izvora svjetlosti [6].



Slika 1. *In-line* hologram, postupak (a) snimanja i (b) rekonstrukcije

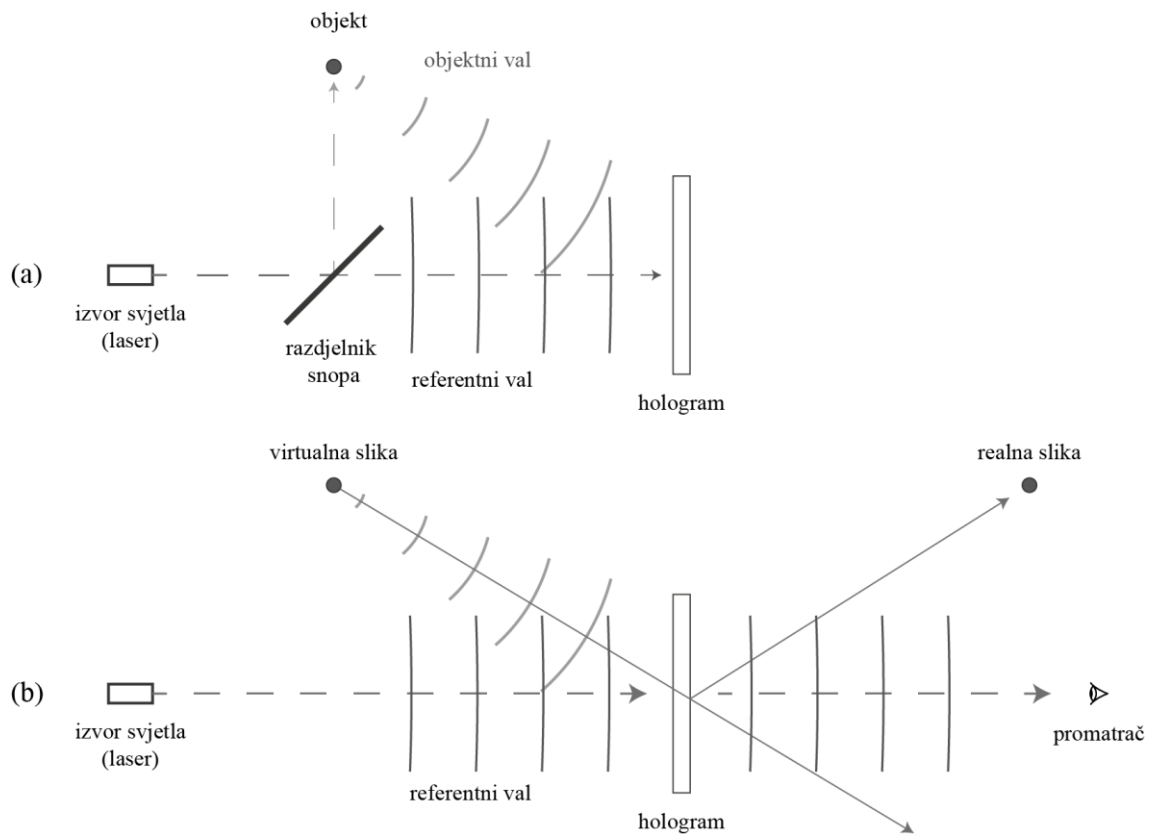
Pravo zanimanje za holografiju i njezin razvoj počeli su izumom lasera, 1960. godine, koji je bio idealan izvor koherentne svjetlosti. Theodore H. Maiman prikazao je prvi laser (eng. *light amplification by the stimulated emission of radiation*) [5], koristeći se rubinskim štapićem kao aktivnim elementom. Laseri se razlikuju od ostalih izvora svjetlosti na nekoliko načina. Jedan model u atomskoj fizici opisuje atom kao jezgru okruženu elektronima koji se nalaze u različitim orbitalama. Kada se atomu dovede odgovarajuća energija, elektroni mogu skakati iz niskoenergetskih orbitala u visokoenergetske orbitalne razine, što rezultira atomskom ekscitacijom putem apsorpcije energije.

Kod uobičajenih izvora svjetlosti, poput neonskog svjetla, fluorescentnih žarulja i dr., svjetlost se emitira spontanom emisijom. Pobuđeni elektroni u visokoenergetskim orbitalama spontano se vraćaju u niže energetske razine, oslobađajući fotone različitih valnih duljina, faze i smjera, čija energija (frekvencija) odgovara razlici energije navedenih razina. Laseri se razlikuju po tome što se koriste stimuliranom emisijom fotona. Kada foton pogodi pobuđeni atom u laserskom mediju, može potaknuti već pobuđeni atom da se vrati u osnovno stanje, oslobađajući dva fotona koji su identični u smjeru, fazi, polarizaciji i energiji.

Taj postupak stimulirane emisije fotona rezultira kaskadnim učinkom, pri čemu mnogi atomi emitiraju svjetlost duž iste osi. To se postiže stavljanjem laserskog medija u rezonantnu šupljinu, što izaziva pojačanje svjetlosti (optičko pojačanje). Da bi laser mogao funkcionirati, većina atoma u laserskom mediju mora biti u pobuđenom stanju. To se postiže održavanjem „inverzije naseljenosti” kontinuiranim unosom energije (kod lasera s kontinuiranim valovima) ili isprekidanim pumpanjem (kod lasera koji rade u pulsnom režimu).

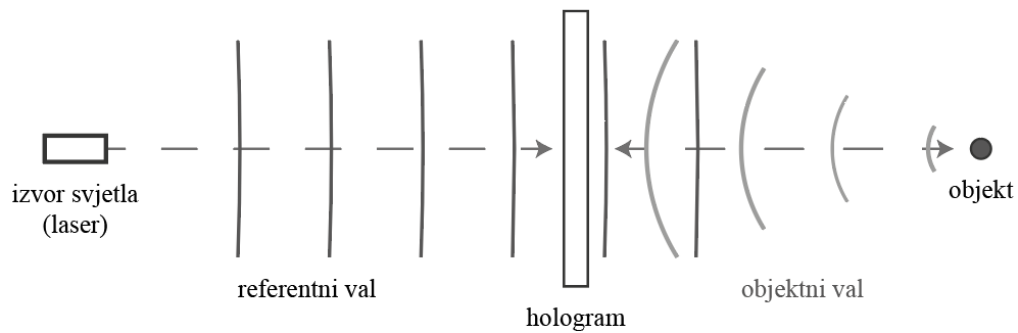
Malom broju fotona dopušteno je pobjeći iz laserskog medija kroz djelomično reflektirajuće zrcalo rezonatora. Ti izbjegli fotoni označuju lasersko svjetlo koje može biti u vidljivom spektru ili izvan njega, kao što su infracrveno ili ultraljubičasto svjetlo [6].

Razvojem laserske tehnologije stvorile su se mnogobrojne mogućnosti u napretku holografije. Zahvaljujući izumu lasera, 1962. godine Emmett Leith i Juris Upatnieks prevladali su probleme koje je Gabor imao kod *in-line* holograma i izradili su *off-axis* hologram. *Off-axis* hologram nastaje tako da se laserska svjetlost, podijeljena na objektu i referentnu zraku, usmjeri na fotografski film pod različitim kutom u odnosu prema objektnoj zraci (Slika 2 a). Pri osvjetljavanju holograma referentnom zrakom, dobivena virtualna i realna slika odvojene su jedna od druge te su dovoljno udaljene od izravne zrake (Slika 2 b). Kada se omogućio drukčiji pogled na holografiju i njezinu važnost, Dennis Gabor je za svoj doprinos dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1971. godine [2, 4].



Slika 2. *Off-axis* hologram, postupak (a) snimanja i (b) rekonstrukcije

Ruski znanstvenik Yuri N. Denisyuk želio je snimiti sve značajke valnog polja svjetlosti, odnosno uhvatiti valnu frontu svjetlosti interferencijom i rekonstruirati je difrakcijom [7]. Godine 1962. razvio je holograme refleksije bijele svjetlosti koji se mogu vidjeti uz osvjetljenje obične žarulje. Stvaraju se tako da se objekt osvjetljava kroz fotografski film, koji djeluje kao razdjelnik snopa, a pritom taj film mora biti određene prozirnosti na valnu duljinu lasera koji se upotrebljava pri snimanju (Slika 3). Svjetlost se reflektira od objekta (objektna zraka) do fotografskog filma, pri čemu nastaje preklapanje s ulaznom svjetlošću (referentna zraka), odnosno interferencija. Objektna i referentna zraka tako dolaze na fotografski film iz suprotnih strana [7, 8]. Dobiveni refleksijski hologram prikazan je u boji u kojoj je snimljen [9].



Slika 3. Postupak snimanja holograma refleksije bijele svjetlosti

Dugin (eng. *Rainbow*) ili Bentonov hologram razvio je 1968. Stephen A. Benton koji je omogućio vidljivost transmisijskih holograma u bijeloj svjetlosti. Ovisno o smjeru gledanja, promatrač rekonstruiranu sliku vidi u spektralnim bojama koje čine bijelu svjetlost. Tehnika snimanja *rainbow* holograma sastoji se od dva koraka [4, 5]. Prvo se snima transmisijski hologram, koji se ujedno naziva master hologram, a snima se s pomoću *off-axis* tehnike. Zatim se snima drugi hologram, za koji se kao objekt uzima realna slika navedenog transmisijskog holograma, na koji je prije snimanja postavljena vodoravna pukotina [9]. Svrha pukotine je ograničiti promatraču raspon paralakse, odnosno horizontalna pukotina eliminira vertikalnu paralaksu. Kada promatrač gleda hologram okomito, uočava promjene boje rekonstruirane slike [8]. Dugini hologrami prvi su tiskani hologrami zbog smanjene rezolucije, a bili su prekretnica u razvoju holografije. Takav način snimanja omogućio je masovnu proizvodnju holograma bez fizičkog predmeta postupkom termoutiskivanja pa se u to vrijeme holografija počinje komercijalizirati [5].

## 2.2. FIZIKALNA OSNOVA

Holografija je usko vezana za svjetlost, odnosno koristi se valnim svojstvima svjetlosti kako bi zabilježila informacije objekta s pomoću interferencije koherentnih valova i zatim ih rekonstruirala s pomoću difrakcije.

Svjetlost je elektromagnetski val koji se sastoji od magnetskog i električnog polja. Svjetlosni val opisuje se prostorno i vremenski promjenjivom amplitudom električnog polja [2]. Godine 1802. Thomas Young dokazao je da se svjetlost širi kao val. Za svoj pokus koristio se svjetlošću ispred koje je postavio zaslon s jednom pukotinom. Prolaskom svjetlosti kroz pukotinu dogodila se difrakcija svjetlosti i nastali su cilindrični valovi. Ispred nastalih valova, postavio je zaslon s dvjema pukotinama, a dobiveni rezultat bio je isti. Na konačnom zaslonu pojavile su se jednoliko razmaknute svijetle i tamne pruge koje su nastale preklapanjem valova, a postupak preklapanja valova nazvan je interferencija [4].

Klasična elektrodinamika opisana je skupom jednažbi poznatih kao Maxwellove jednažbe. Elektromagnetski val opisan je valnom jednažbom koja proizlazi iz Maxwellovih jednažbi. Posebno korisno rješenje valne jednažbe je val s određenom valnom duljinom  $\lambda$ . To je poznato kao rješenje harmonijskog vala i odgovara slučaju monokromatske svjetlosti. Rješenje harmonijskog vala zapisano je kao:

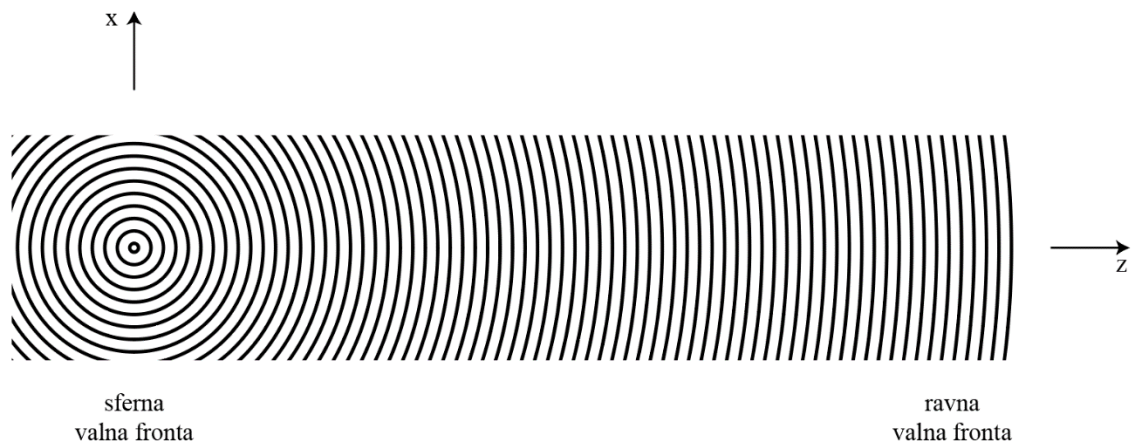
$$E(r, t) = A \sin(k \cdot r - \omega t + \varphi) \quad (1)$$

pri čemu je  $A$  amplituda i smjer vektora polja,  $k$  valni vektor,  $r$  vektor položaja,  $\omega$  kutna frekvencija i  $\varphi$  fazni pomak.

Postoje dvije vrste valova, koji su moguća rješenja harmonijskog vala za monokromatsku svjetlost, ravni val i sferni val. Glavna razlika između ravnih i sfernih valova jest u tome jesu li valne fronte ravne ili zakrivljene u području interesa [10].

Hologram bilježi određenu valnu frontu. Valne fronte čine površine konstantne faze za elektromagnetsko polje. Budući da se obično upotrebljavaju za prikaz prostornih varijacija polja, crtaju se ili izračunavaju za određeno vrijeme. Polje je periodično, a dana vrijednost faze rezultirat će višestrukim površinama. Te su površine odvojene valnom duljinom [11].

Najjednostavniji primjer elektromagnetskog vala je ravni val. Obilježavaju ga ravne valne fronte koje su okomite na smjer širenja vala [12]. Ravni val definiran je kao val koji ima konstantnu fazu u svim točkama ravnine okomite na smjer širenja za određeno vrijeme  $t$  [13]. Drugi primjer elektromagnetskog vala je sferni val koji zrači iz izotropnoga točkastog izvora [11]. Nakon što se sferne valne fronte prošire na veliku udaljenost od izvora, njihove valne fronte postaju efektivno ravne, odnosno radijus zakrivljenosti postaje gotovo beskonačan, pa se kaže da su nastali ravni valovi (Slika 4) [7].



Slika 4. Prikaz valne fronte za ravne i sferne valove

Sferni val je osnovni val za širenje svjetlosti prema Huygensovu načelu. Godine 1678. Christiaan Huygens postavio je teoriju o modelu širenja svjetlosti prema kojem je svaka točka na valnoj fronti izvor novih sfernih valova koji će se širiti na sve strane istom brzinom kao i osnovni val [14].

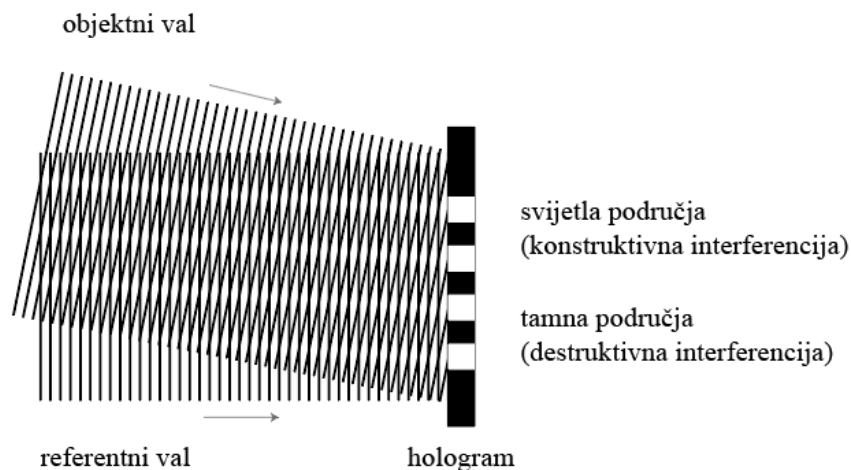
Svjetlosni valovi koji se primjenjuju u holografiji jesu koherentni i monokromatski. Valovi koji imaju samo jednu frekvenciju nazivaju se monokromatski. Koherentno svjetlo koje emitira izvor nastaje kada svi valovi imaju konstantnu faznu razliku u prostoru i vremenu. Prostorna koherencija opisuje međusobnu korelaciju različitih dijelova iste valne fronte, a vremenska koherencija opisuje korelaciju vala u različitim vremenskim trenucima. Vremenska koherencija povezana je s time koliko je izvor monokromatski [13]. Lasersko svjetlo emitira svjetlost jedne valne duljine, odnosno svjetlost samo jedne boje, a to znači da je laser izvor monokromatskih i koherentnih



valova. Laserska svjetlost je i prostorno i vremenski koherentna, a to je jedan od preduvjeta za interferenciju [4, 9].

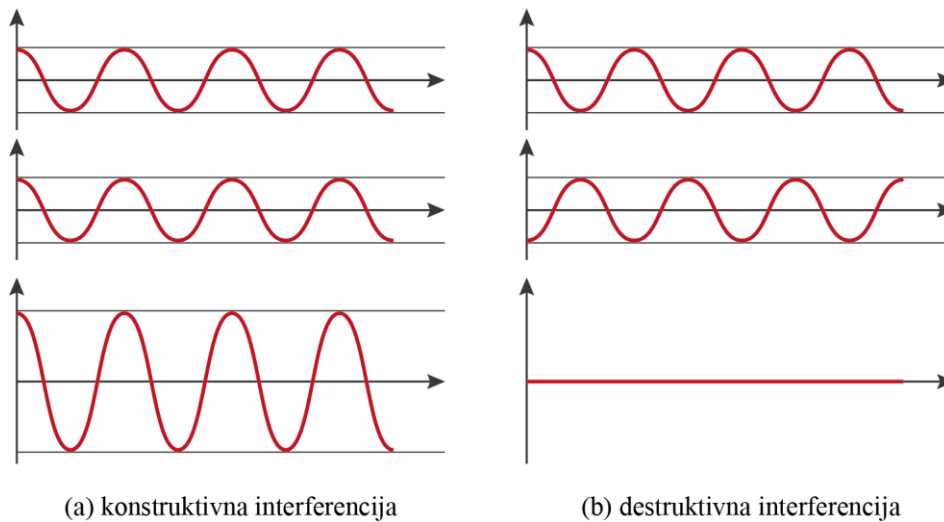
### 2.2.1. Interferencija i difrakcija

Holografija se zasniva na interferenciji dviju svjetlosnih zraka, referentne i objektne. Na samom hologramu prikazan je uzorak interferencije koji sadržava informacije o smjeru, intenzitetu i fazi valne fronte koja je reflektirana sa snimljenog objekta. Za snimanje holograma potrebna je zraka koherentne laserske svjetlosti koja se dijeli na dvije zrake, koje se sustavom zrcala usmjeravaju prema fotografskom filmu gdje se preklapaju. Jedna zraka osvjetljava film izravno (referentni val), a druga zraka (objektni val) osvjetljava objekt i raspršena svjetlost od objekta zatim odlazi na film, gdje objektni i referentni val interferiraju jedan s drugim (Slika 5).



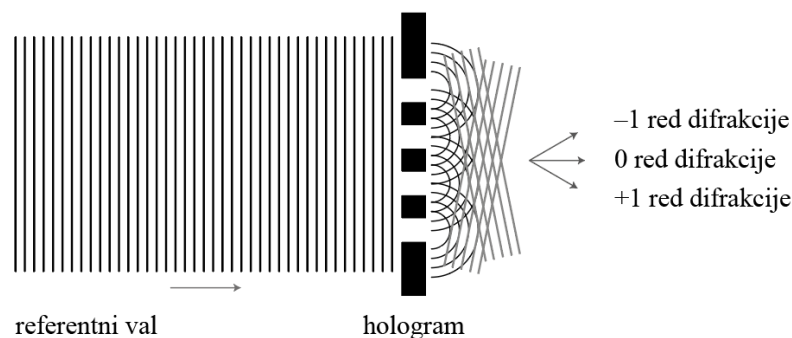
Slika 5. Interferencija referentnog i objektnog vala – postupak snimanja

Interferencija je proces u kojem se dva ili više valova, koji se međusobno preklapaju, zbrajaju prema načelu superpozicije (Slika 6). Dva vala ili više valova koji imaju jednaku valnu duljinu, amplitudu i fazu stvaraju konstruktivnu interferenciju (rezultira svijetlim područjima), a ako su zrake izvan faze nastaje destruktivna interferencija (rezultira tamnim područjima) [2, 4, 5, 9].



Slika 6. Interferencija valova

Za rekonstrukciju izvorne valne fronte hologram je potrebno osvijetliti referentnim valom, a postupkom difrakcije rekonstruira se objektni val te se dobije virtualna i realna slika snimljenog objekta. Pri tom procesu hologram djeluje kao difrakcijska rešetka. Prema Huygensovom načelu, svaka točka rešetke generira novi sferni val, a superpozicijom valova stvaraju se ravni valovi koji rekonstruiraju sliku [2, 4, 5]. Valno polje iza holograma sastoji se od triju dijelova (Slika 7), odnosno stvaraju se tri difrakcijska reda: -1, 0 i 1. Direktni val je jednak referentnom valu, u kojem se mijenja amplituda i označuje nulti red difrakcije. Konjugirani val prikazuje konjugirani objektni val koji je pomaknut u fazi za neki kut (ovisno o valnoj duljini svjetlosti, rezoluciji rešetke, ...), odnosno slika je okrenuta (-1 red difrakcije). Objektni val prikazuje realnu sliku koja se pojavljuje na mjestu izvornoga snimljenog objekta [1, 2, 5].



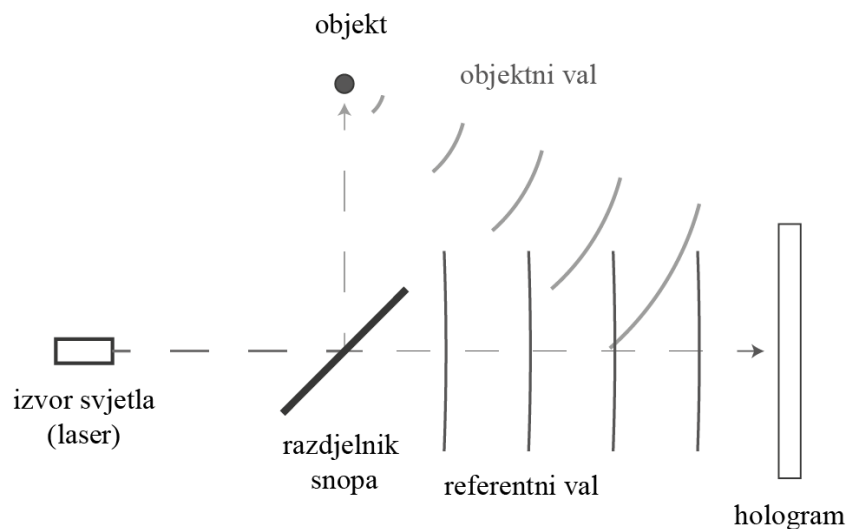
Slika 7. Rekonstrukcija izvorne valne fronte – difrakcija

## 2.3. VRSTE HOLOGRAMA

Hologrami se razlikuju s obzirom na debljinu medija na koji se zapisuju, prema načinu snimanja, načinu rekonstrukcije i sl., ali svi se temelje na dvjema vrstama holograma: transmisijskom i refleksijskom hologramu [4]. Razlika između transmisijskih i refleksijskih holograma ovisi o tome hoće li se hologram promatrati propuštanjem ili reflektiranjem svjetla, a to se određuje pri snimanju samog holograma [2]. U izradi refleksijskih holograma film se osvjetljava s obje strane respektivno, a za izradu transmisijskih holograma film je osvjetljen objema zrakama (objektnom i referentnom) s iste strane [4].

### 2.3.1. Transmisijski hologrami

Transmisijski hologram rekonstruira sliku tako da svjetlost prolazi kroz interferencijski uzorak (optičku rešetku koju čine transparentni i netransparentni dijelovi), odnosno hologram. Hologram je moguće rekonstruirati primjenom lasera ili bijele svjetlosti. Ako se rabi laserska zraka, promatrač je mora usmjeriti kroz hologram i slika se tvori na toj strani. U slučaju da se primijeni bijela svjetlost, postavlja se sa stražnje strane holograma i slika se stvara u oku promatrača.



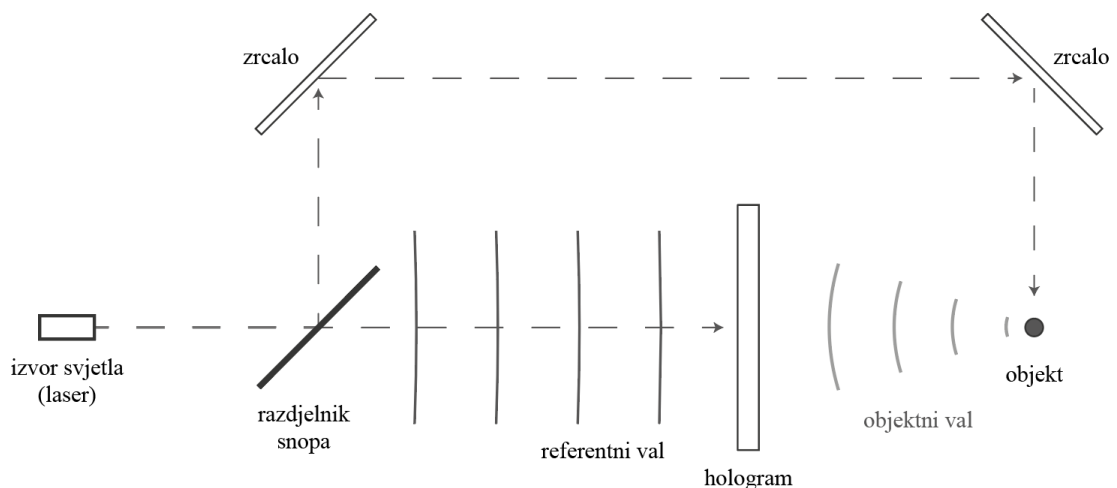
Slika 8. Snimanje transmisijskog holograma

Pri snimanju transmisijskih holograma referentna i objektna zraka dolaze s iste strane holografske folije (Slika 8). Kada se razvijeni film osvjetli, difrakcija i interferencija izazivaju stvaranje valne fronte koja je slična izvornoj valnoj fronti. Transmisijski hologrami mogu se izraditi s pomoću računalno generirane holografije, u kojoj se difrakcijski uzorak više ne dobiva snimanjem nego se izračunava na osnovi integralnih jednadžbi difrakcije [2, 4, 5].

### 2.3.2. Refleksijski hologrami

Refleksijski hologrami odražavaju upadnu svjetlost prema promatraču. Da bi se vidjela rekonstrukcija slike, hologram je potrebno osvjetliti bijelom svjetlosti koja dolazi iz točkastog izvora, koja je postavljena pod određenim kutom i udaljenosti, a pritom se nalazi sa strane promatrača [4, 5].

Refleksijske holograme snima se s pomoću optičkog sustava s dvjema zrakama, referentnom i objektnom, koje se dijele iz jedne laserske zrake. Da bi se mogao izraditi refleksijski hologram, potrebno je da referentna i objektna zraka na fotografski film dolaze s različitih strana medija na koji zapisujemo njihov interferencijski uzorak (Slika 9). Kako bi se snimljeni hologram mogao poslije rekonstruirati, hologram je potrebno osvjetliti rekonstrukcijskom zrakom pod istim kutom kao što je bila i referentna zraka pri snimanju [2, 4, 5].



Slika 9. Snimanje refleksijskog holograma

### 2.3.3. Abrazijski hologrami

Uz navedene holograme, postoji još jedna vrsta holograma koja se katkad naziva refleksijski hologram jer se njegova rekonstrukcija događa na isti način kao u navedenom hologramu. Prethodna podjela holograma odnosila se na geometrijski susret objektivne i referentne zrake, dok je ova podjela vezana za način izrade. Hologram takve vrste naziva se abrazijski hologram i sastoji se od velikog broja zakrivljenih linija koje rekonstruiraju sjajne točke. Naziva se i rukom rađeni hologram, jer je moguće šestarom, koji ima dvije igle, struganjem po površini pleksiglasa izraditi tanke udubine koje će rekonstruirati sjajne točke.

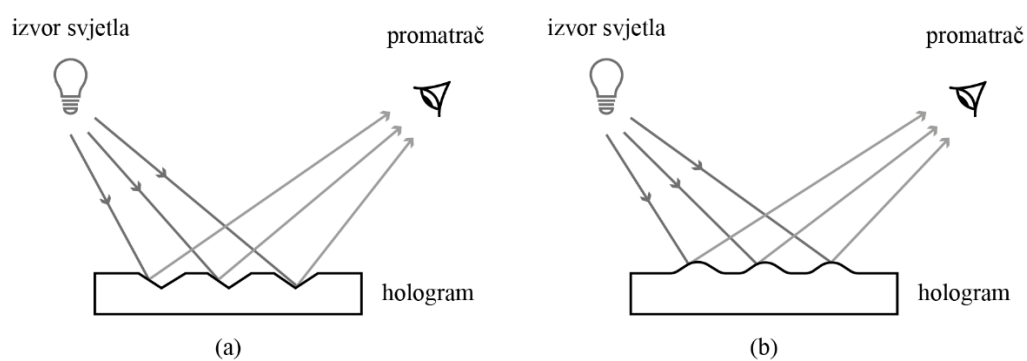
Slika predmeta ili motiva može biti trodimenzionalna. U tom slučaju upotrebljava se program za 3D modeliranje, poput Blendera, u kojem je potrebno izraditi 3D oblik. Nakon toga oblik treba prenijeti u odgovarajući softver koji ga pretvara u oblik sastavljen od točaka. Kako bismo dobili rotaciju oblika, potrebno je odrediti kut rotacije, a zatim treba povezati svaku točku linijom (Slika 10). Također, motiv može biti dvodimenzionalan, ali onda se primjenjuje vektorski program poput Adobe Illustratora, u kojem je potrebno izraditi oblik linijskog dizajna. Kada je motiv izrađen, potrebno je odrediti putanju, točnije liniju po kojoj će se svaka točka reflektirati te razmak između linija i zatim to primijeniti na motiv.

Postoje dva tipa toga holograma, a razlika je u izgledu linija koje reflektiraju upadno svjetlo na površini. Razlikuju se abrazijski hologram, koji ima linije kao brazde ili izbočine, što ovisi o načinu proizvodnje (Slika 11).

Jedan od načina kojim je moguće izraditi takav hologram jest lasersko graviranje, a materijal korišten za hologram može biti pleksiglas ili metal. Izrađene linije u programu graviraju se s pomoću lasera na pleksiglas ili metal, čineći udubine koje, kada se osvijetle, rekonstruiraju motiv. Parametri koji su bitni za izradu laserskim graviranjem su snaga (W), brzina (m/s) i frekvencija (Hz). Drugi način izrade je tisak UV laka na površinu papira, gdje sada reflektirajuće linije čini sasušeni UV lak koji je izbočen na površini. Kod tiska UV laka, moguće je namjestiti nekoliko parametara, a to su snaga UV lampi, odnosno brzina kojom suše, debljina nanosa laka ( $\mu\text{m}$ ), debljina linije (px) i brzina stroja.



Slika 10. Postupak izrade 3D modela abrazijskog holograma



Slika 11. Prikaz abrazijskog holograma ovisno o načinu proizvodnje, (a) lasersko graviranje i (b) tisak UV laka

## 2.4. RAČUNALNO GENERIRANI HOLOGRAMI

Razvoj računalne tehnologije pridonio je nastanku računalno generirane holografije (eng. *Computer Generated Holography – CGH*) koja je omogućila izradu holograma numeričkom metodom. Korištenjem numeričkih metoda omogućena je simulacija fizičkih procesa koji su potrebni za optičko snimanje i rekonstruiranje pravih holograma, odnosno to je metoda digitalnoga generiranja interferencijskog uzorka [15]. Na ovaj način izbjegli su se nedostaci klasične holografije, koja je za svoju izradu holograma zahtijevala složenu postavu leća, zrcala i lasera, realni objekt te stroge laboratorijske uvjete, bez prisutnosti vibracija te nečistoća u zraku koje bi narušile kvalitetu holograma [5]. Za izradu računalno generiranih holograma potrebni su samo računalo i softver, što je ubrzalo postupak izrade holograma i uvelike smanjilo troškove njihove izrade, za razliku od klasične holografije za koju je bila potrebna skupa laboratorijska oprema. Primjenom računala u postupku generiranja holograma omogućena je izrada bilo kojeg modela (objekta). U klasičnoj holografiji uvijek je potreban fizički objekt koji se snima na fotoosjetljiv materijal. Prednost CGH-a je u tome što trodimenzionalan objekt ne mora postojati u stvarnom vremenu i prostoru, nema ograničenja u veličini objekta te jedino ograničenje čini vrijeme koje je potrebno utrošiti za izračun [1, 5, 15].

Uz to, kod računalno generiranih holograma moguće je manipulirati elementima, točnije za svaku točku u hologramu može se posebno odrediti da sadržava drukčiju informaciju te da se rade namjerne pogreške. Na taj način u holograme se mogu implementirati mnogobrojni efekti koji kod klasične holografije nisu mogući. Mogućnošću tiskanja holograma najveću primjenu imaju u grafičkoj industriji, osobito u zaštitnom tisku (dokumenti – osobne iskaznice, putovnice, novčanice i sl.; ulaznice; proizvodi, i sl.), prvotno radi zaštite od krivotvorenja, ali i kao dizajnerska rješenja pojedinih grafičkih proizvoda. Poznati su i kao difraktivni optički varijabilni slikovni uređaji (eng. *Diffraction optically variable image devices – DOVIDs*). [4, 5] Vrlo su cijenjeni zbog svoje sigurnosti, za njihovu je proizvodnju potrebna skupa i specijalizirana oprema, a moguće ih je izraditi na različitim razinama sigurnosti. Proces krivotvorenja moguće je otežati tako da krivotvorenje bude preskupo ili predugo, od upotrebe varijabilnih i/ili personaliziranih informacija (kao što su serijski brojevi, datumi ili kodirani osobni podatci), promjenjivih parametara obrade, pa do upotrebe posebnih materijala.

Krivotvorenje je dodatno otežano kombinacijom posebnih zaštita s računalno generiranim hologramima [4, 5, 16].



## 2.5. NAČINI PROIZVODNJE

Klasične holograme nije moguće proizvesti uobičajenom tehnikom ispisa, i to zbog složenih postava leća, zrcala, lasera i realnog objekta, uz stroge laboratorijske uvjete, posebnih materijala za snimanje te potrebe za visokom rezolucijom i preciznosti. Interferencijski uzorak koji čini hologram zahtijeva kvalitetno izrađene rubove kako bi rekonstrukcija slike bila moguća. Računalno generirana holografija riješila je nedostatke klasične holografije i omogućila je korištenje klasičnih metoda izrade. Računalno generirane holograme moguće je uspješno proizvesti ovim metodama: CtF ispisom, laserskim graviranjem, embosiranjem, ofsetnim tiskom i drugim.

### **Computer to Film (CtF) ispis**

S pomoću CtF ispisa moguće je proizvesti kompleksno snimanje filmova na temelju digitalnih podataka. Uređaj za postavljanje slike prima slikovne podatke (matricu točaka ili piksela, prenesenih iz RIP-a) i ispisuje ih red po red na vrlo osjetljiv materijal. Procesor rasterskih slika (eng. *Raster Image Processor – RIP*) je softver koji rasterizira (prevodi) računalne vektorske datoteke u rasterske slike, poznate kao bitmap, koja je sastavljena od matrice točaka koje uređaj razumije i ispisuje. Tijekom tog procesa svaka se točka ispisuje na materijal s pomoću laserske zrake. Podatci dobiveni RIP-om su u bitmap formatu, koji određuju položaj na kojoj se točki treba snimiti (laserska zraka uključena/isključena). Svi elementi stranice (tekst, grafika, slika) sastoje se od određenoga minimalnog elementa (jedna točka rastera) čija je veličina određena rezolucijom uređaja za postavljanje slike. Laserski impulsi moraju biti smješteni iznimno precizno jer odstupanja od samo 1  $\mu\text{m}$  mogu izazvati znatne pogreške u ispisu. Film koji se upotrebljava u procesu sastoji se od nekoliko slojeva. Prozirna nosiva baza folije sastoji se od poliestera, obloženog slojem osjetljivim na svjetlo, a sadržava srebrov halogenid (emulziju srebra) kao fotografski aktivni sastojak. Preko osjetljivog sloja nalazi se zaštitni premaz koji štiti od mehaničke abrazije, a sa stražnje strane nosive folije nalazi se antihalo sloj koji sprječava potpunu refleksiju svjetlosti [17]. Fotografski proces počinje eksponiranjem osjetljivog sloja filma. Stvara se latentna slika koju je potrebno razviti kako bi se srebrov halogenid reducio na ione metalnog srebra koje daje zacrnjenje u slici. Nakon toga potrebno je

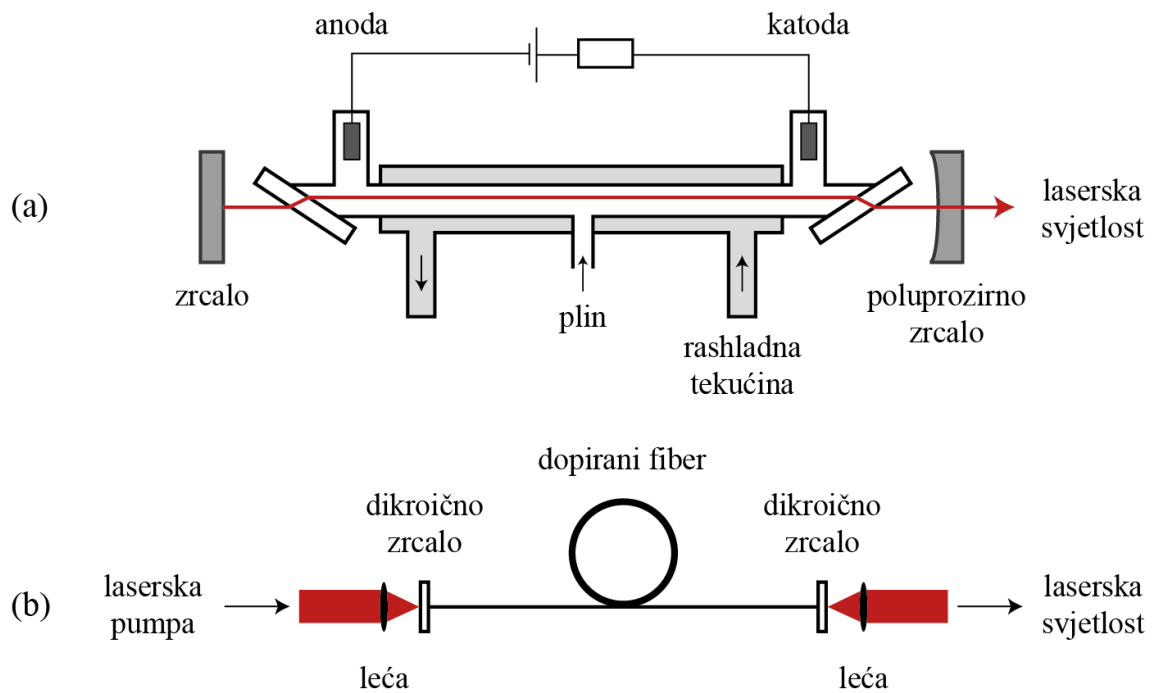
ukloniti ostalo srebro iz fotoosjetljive emulzije, kako bi se dobila konačna slika, a to se provodi u postupku fiksiranja [17, 18].

Dokazano je da je s pomoću CtF ispisa moguće proizvesti računalno generirane holograme izrazito visoke kvalitete. CtF proizvodnja omogućuje niske troškove i brzu izradu uz visoku rezoluciju, a svaki hologram može učiniti jedinstvenim po veličini, obliku, rasterizaciji i informaciji koje sadržava [16]. U nedavnom je istraživanju dokazano da je moguće postići rezolucija CtF ispisa holograma od 6400 dpi (2500 px/cm) [19].

### **Lasersko graviranje**

Lasersko graviranje je beskontaktni proces označavanja površine fokusiranom laserskom zrakom. Svjetlosna energija koju materijal apsorbira trenutačno se pretvara u toplinsku energiju, dostignuvši temperaturu taljenja i isparavanja sloja površine materijala do određene dubine. Ta je tehnika izrade praktična i složena, a laserskom glavom upravlja se određenim računalnim programom. Prednosti te tehnike su brza proizvodnja i mogućnost graviranja različitih vrsta materijala. Kvalitetna i brza izrada tijekom procesa graviranja ponajviše ovise o svojstvima materijala (apsorpcija, refleksija, transmisija, talište i dr.), svojstvima laserskog izvora (valna duljina, snaga, brzina, veličina točke, frekvencija i dr.) i parametrima postupka (hrapavost površine, dubina graviranja i dr.). Postoje mnoge vrste industrijskih lasera, a neki od najvažnijih su CO<sub>2</sub> i fiber laser (Slika 12).

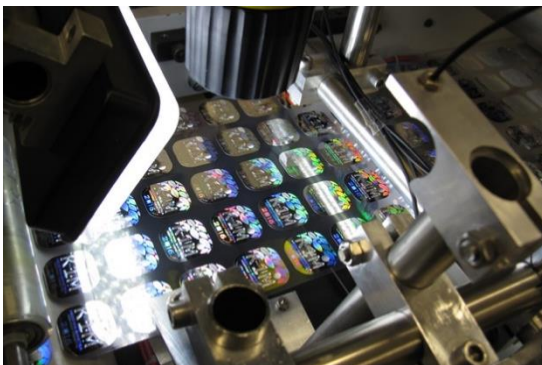
CO<sub>2</sub> laser je plinski laser koji se kao aktivnim medijem koristi molekulama ugljikova dioksida, a radi na načelu relaksacije molekula iz određenih pobuđenih energetske stanja. S pomoću toga plinskog lasera mogu se gravirati organski materijali kao što su papir, drvo, koža i neki polimeri koji sadržavaju aditive. Za razliku od CO<sub>2</sub>, fiber laser je čvrstog stanja, a aktivni medij sastoji se od optičkog vlakna premazanog rijetkim zemnim elementima kao što su erbij (Er), neodimij (Nd), iterbij (Yb). Važnost tog lasera proizlazi iz materijala na koje djeluje, a pogodan je za metale, plastiku, staklo, keramiku, drvo i dr. [20].



Slika 12. Građa lasera, (a) CO<sub>2</sub> laser i (b) fiber laser

## Embosiranje

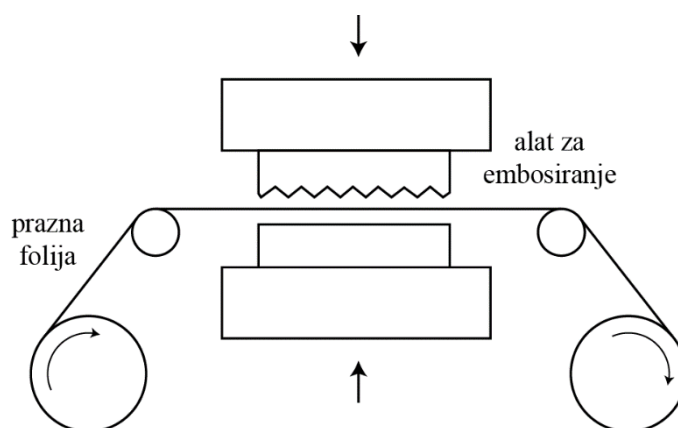
Poseban tiskarski postupak izrade holograma naziva se embosiranje (utiskivanje). Embosirani (reljefni) hologrami su transmisijski hologrami vidljivi s pomoću bijele svjetlosti, koji se apliciraju na reflektirajuću reljefnu površinu (Slika 13) tako da se difraktira svjetlost [5].



Slika 13. Embosirani hologrami (Izvor: <https://holographic.website/>)

Postupak embosiranja primjenjuje se za masovnu proizvodnju velike količine identičnih holograma po razumnoj cijeni [9]. Primjenjuje se na kreditnim karticama, novčanicama, putovnicama i drugim dokumentima i vrijednosnicama te kao oznake za zaštitu proizvoda od krivotvorenja. Proizvodnja embosiranih holograma sastoji se od nekoliko koraka: proizvodnja glavnog (master) holograma u fotorezistu, izrada tiskovne forme (matrice) ili shima za utiskivanje, utiskivanje holograma i postupak vrućeg žigosanja (eng. *hotstamping*) na proizvod [2, 5].

Fotorezisti su prozirni fotoosjetljivi polimerni materijali kod kojih se postupkom razvijanja uklanja dio materijala. Mogu se razlikovati pozitivni fotorezisti, u kojima izloženi materijal postaje topiv u otapalu, i negativni fotorezisti, u kojima izloženi materijal postaje netopiv u otapalu [9]. Hologram snimljen u fotorezistu površinski je reljefni nakon postupka razvijanja i ne može se upotrebljavati kao alat za utiskivanje. Stoga je potrebno izraditi izdržljivu metalnu „repliku”, odnosno tiskovnu formu ili shim. Struktura površinskog reljefa master holograma prenosi se galvaniziranjem u metal. Master prvo mora biti vodljiv, nakon čega se uranja u kupku za galvanizaciju gdje se na površinu holograma nanosi tanak sloj metala (nikla) do željene debljine. Master se uklanja, a negativna struktura otisnuta u metalu, shim (matrica od nikla), stavlja se na tiskovnu ploču ili valjak te služi kao tiskovna forma. Zagrijana tiskovna forma utiskuje se u termoplastične materijale pri izradi tiskanih holograma (Slika 14). U posljednjem koraku hologram se u postupku vrućeg žigosanja utiskuje na proizvod tako da sa stražnje strane sadržava nanos ljepila koji je osjetljiv na toplinu [2, 4, 5].



Slika 14. Postupak embosiranja – utiskivanje

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

#### **3.1. CILJ I HIPOTEZE**

Cilj ovoga rada bila je ispitati mogućnosti i pretpostavke kvalitetnoga laserskog graviranja transmisijskih računalno generiranih holograma na površinu polikarbonatnih materijala (podloge koje se najčešće upotrebljavaju u izradi raznih identifikacijskih dokumenata) kako bi se dobili kvalitetni elementi zaštite dokumenata.

Da bi se potvrdile navedene mogućnosti, u radu su ispitane sljedeće hipoteze:

H1 – laserskim graviranjem moguće je ostvariti kvalitetan zapis transmisijskih računalno generiranih holograma na polikarbonatnu podlogu

H2 – odredit će se optimalne pretpostavke zapisa zadovoljavajuće kvalitete korištenjem laserskoga graviranja transmisijskih računalno generiranih holograma

H3 – tako realizirani hologram zadovoljava sve pretpostavke zaštitnog elementa.

### 3.2. METODOLOGIJA

Za eksperimentalni dio rada rađeno je lasersko graviranje transmisijskih računalo generiranih holograma na polikarbonat. Izračun računalo generiranih holograma izveden je postojećom metodom i računalnim programom u koji je bilo potrebno unijeti definirane parametre kako bi se dobio željeni rezultat: dimenzije hologram  $a \times a$  (mm), rezoluciju ispisa (dpi), postotak binarizacije interferencijskog uzorka (0 – 100 %) i format zapisa digitalnog holograma (pgm) [21]. Za realizaciju zapisa računalo generiranih holograma upotrijebljen je MOPA fiber laser (Slika 15), valne duljine 1064 nm, snage 30 W, brzine 7000 mm/s i frekvencije od 30 do 50 kHz.

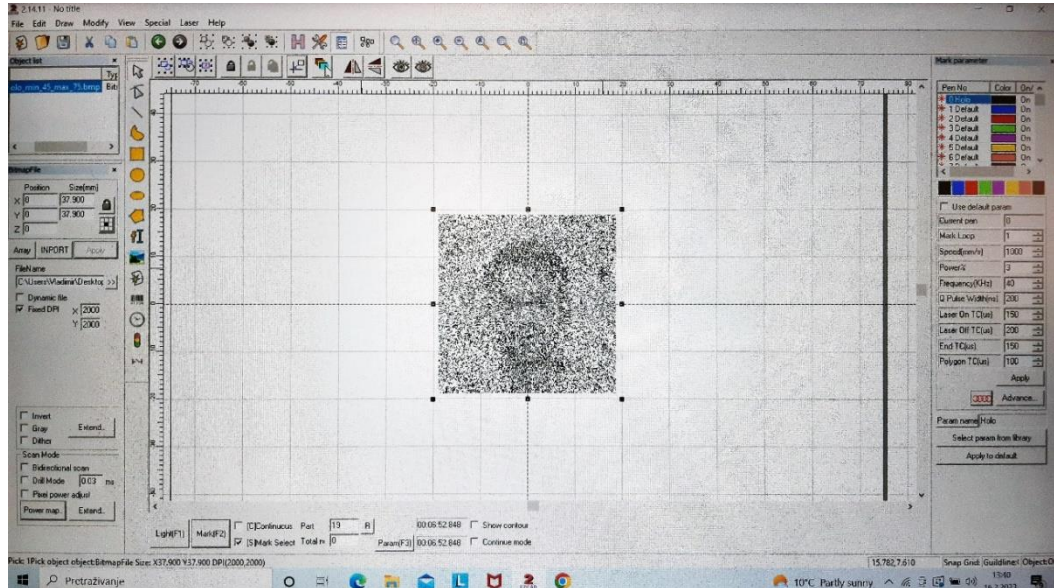


Slika 15. MOPA fiber laser i računalo sa softverom za upravljanje laserom

Taj tip lasera proizvodi tvrtka JPT, a njihov se fiber laser koristi konfiguracijom pojačala snage glavnog oscilatora (eng. *Master Oscillator Power Amplifier – MOPA*). Glavni oscilator proizvodi svjetlost s manjom količinom energije koja se zatim dovodi do pojačala snage, gdje se dodatno pojačava, kako bi se postigla veća snaga lasera. Također, ima mogućnost podešavanja raznih laserskih parametara kao što su visoka frekvencija

ponavljanja impulsa (eng. *Pulse Repetition Frequency – PRF*), trajanje impulsa, oblik pulsa, itd. [22].

Za upravljanje laserom korišten je softver Ezcad 2.14.11, a prije njegove upotrebe bilo je potrebno istražiti značajke i upoznati njegovu korisničko sučelje (Slika 16).



Slika 16. Prikaz korisničkog sučelja Ezcad 2.14.11

Pri graviranju podešeni su parametri označavanja, točnije snaga i brzina graviranja. Zapis holograma izveden je na prozirnopolikarbonatu dimenzije 85 x 55 mm i debljine 0,70 mm (Slika 17). Kako bi se postigao kvalitetan zapis holograma, izrađen je set uzoraka koji su služili za kalibraciju konačnog rezultata. Za izradu uzoraka korištene su dvije površine polikarbonata, a na svakoj površini zapisana su po tri klina.



Slika 17. Polikarbonat prije graviranja

Nakon graviranja, dobiveni uzorci snimljeni su s pomoću mikroskopa Leica EZ4 D Stereo (Slika 18), koji ima raspon povećanja 8 – 35x, maksimalnu razlučivost 170 Lp/mm i trosmjerno LED osvjetljenje. Snimljeni uzorci obrađeni su u programu Adobe Photoshop 2020, kako bi svi imali jednaku svjetlinu i kontrast te je proveden postupak binarizacije. Nakon toga za svaki je hologram izračunat postotak propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak s pomoću histograma. Podatci su evidentirani u obliku tablice i uspoređeni s digitalnim (originalnim) vrijednostima. Analizom podataka odabrane su najbolje vrijednosti koje su zatim korištene za izradu konačnoga rezultata. Konačni rezultat je primjer dokumenta koji sadržava dva transmisijska računalno generirana holograma.



Slika 18. Leica EZ4 D Stereo mikroskop (Izvor: <https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/stereo-microscopes/p/leica-ez4-d/>)



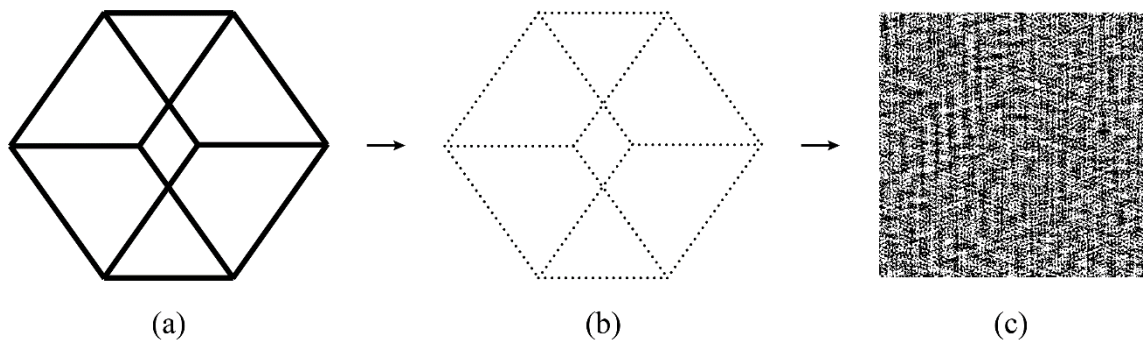
### 3.3. IZRADA RAČUNALNO GENERIRANOG HOLOGRAMA

Računalno generirani hologram je numerički (grafički) prikaz interferencijskog uzorka koji je stvoren računalnim algoritmom. Primjenom numeričke metode omogućena je simulacija fizičkih procesa klasične holografije. Za izradu CGH-a potrebno je samo računalo i računalni program u koji se unose sve potrebne značajke kojim se generira hologram. Tim načinom omogućena je izrada 2D ili 3D modela (Slika 19 a), bez upotrebe realnog objekta.

Za izradu holograma u softveru je definirano nekoliko parametara kako bi se dobio kvalitetan rezultat. U unosa parametara prvo je određena konačna dimenzija holograma koja se gravirala, a zatim rezolucija izrade graviranja. Uz to, bilo je potrebno upisati i valnu duljinu lasera kojim se gravirao konačni rezultat te odrediti postotak binarizacije interferencijskog uzorka kojim se definiralo koliko svjetlosti može proći kroz dobiveni hologram.

Definirani parametri su: dimenzija holograma (5 x 5 mm), rezolucija ispisa (2000 dpi), laserska valna duljina (1064 nm), vrsta holograma (transmisijski), postotak binarizacije interferencijskog uzorka (5 – 95 %) i format zapisa digitalnog holograma (pgm). Također, u softver je učitani točkasti 3D model kocke, koji je napravljen u programu za 3D modeliranje. Veličina modela koji je napravljen u 3D programu bila je dimenzije 5 x 5 mm, a prilikom izračuna holograma, model je povećan na maksimalnu veličinu kako bi ispunio cijeli frekventni prostor holograma. Konačna veličina modela bila je 20 x 20 mm na udaljenosti od 150 cm. Model je ispunjen je s 500 točaka koje su ravnomjerno raspoređene i spremljen je u OBJ formatu kao točkasti model (eng. *Point Cloud Model*) (Slika 19 b). Svaka točka u modelu definirana je u koordinatnom sustavu, a svaka točka označuje zasebni objektni val.

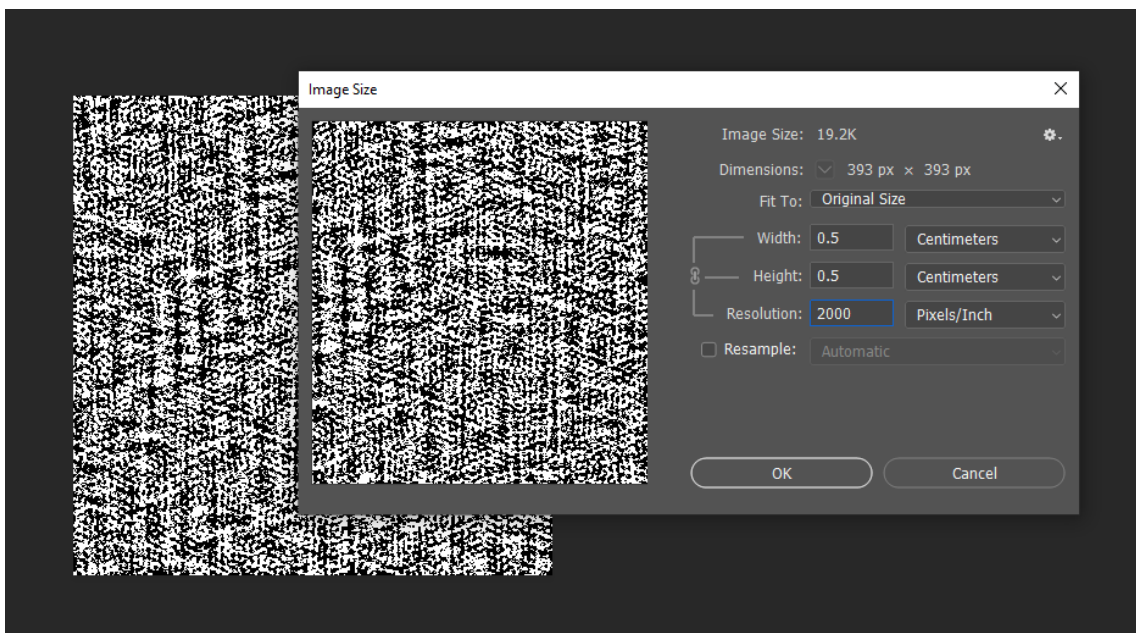
Ukupno je dobiveno 19 holograma s jednom perspektivom, a svaki je dimenzije 5 x 5 mm. Svaki se hologram razlikuje po propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak u rasponu od 5% do 95%, s povećanjem od 5%. Za orijentaciju modela 3D kocke odabran je kut od 45° zbog kompleksnosti jer su vidljivi svi bridovi kocke. Dobiveni hologrami su u sivim tonovima (Slika 19 c), a zatim su obrađeni u Adobe Photoshopu i korišteni za kalibraciju.



Slika 19. Prikaz (a) 3D modela kocke pod kutom od  $45^\circ$ , (b) točkastog modela kocke i (c) končanog holograma jedne perspektive od 50% propusnosti

### 3.4. PRIPREMA ZA LASERSKO GRAVIRANJE

Priprema za lasersko graviranje počela je kada su dobiveni hologrami u obliku binarne datoteke u PGM formatu, pojedinačno otvoreni u Adobe Photoshopu kako bi bili pretvoreni u fizičke veličine. Bilo je potrebno promijeniti rezoluciju i dimenziju holograma. Kada je hologram otvoren u Photoshopu, otključan je layer, a zatim je u izborniku „Slika” (eng. *Image*) odabrana opcija „Veličina slike” (eng. *Image Size*). Prije nego što je promijenjena rezolucija bilo je potrebno isključiti Resample kako bi se dimenzija holograma promijenila ovisno o rezoluciji koja se upiše. Unesena je rezolucija od 2000 dpi, što je rezultiralo fizičkom veličinom holograma od 5 x 5 mm (Slika 20).

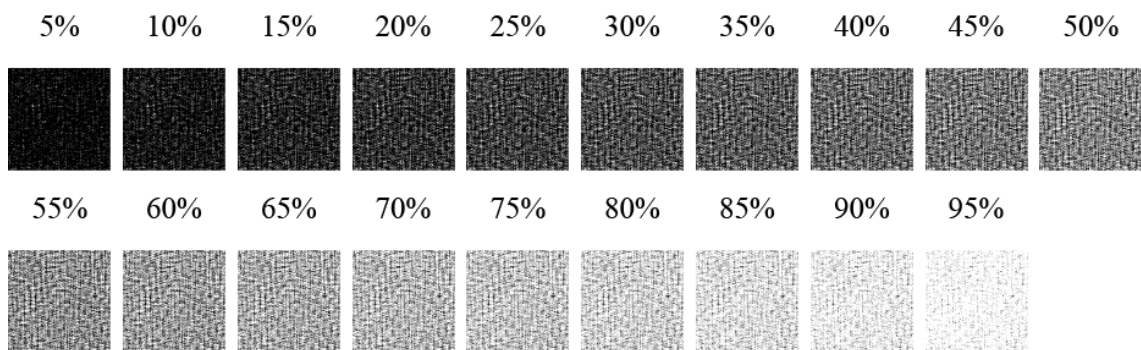


Slika 20. Prikaz rezolucije i dimenzije holograma od 50 % propusnosti

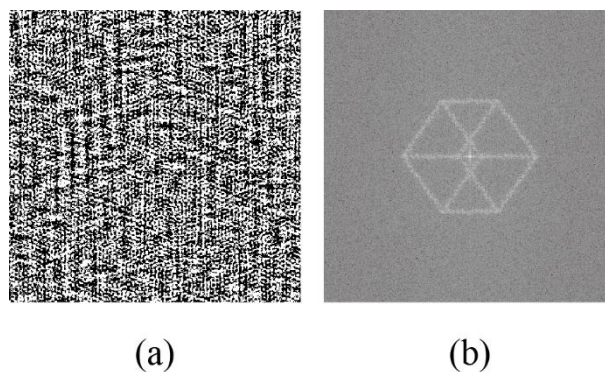
Također, bilo je potrebno promijeniti „Način rada” (eng. *Mode*) u Bitmap u kojem će se hologram prikazati i zatim obrađivati pri graviranju. Hologram je prikazan u samo dvjema bojama, odnosno sastoji se od crnih (vrijednost 0) i bijelih (vrijednost 1) piksela. Bijeli pikseli označuju transparentni dio holograma, kroz koji svjetlost prolazi, a crni pikseli zaustavljaju prolazak svjetla. Nakon navedenih promjena, hologram je spremljen u BMP formatu i spreman za izradu.

### 3.5. IZRADA TESTNIH UZORAKA

Za testne uzorke izrađeno je šest različitih klinova. Svaki klin sadržava 19 holograma koji se razlikuju po binarizaciji u rasponu od 5 % do 95 % (Slika 21). Postotci binarizacije pokazuju koliko je svjetlosti prošlo kroz interferencijski uzorak. Na slici (Slika 22) je prikazan holograma koji ima 50 % propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak te je prikazana njegova FFT rekonstrukcija. Razlika između klinova je u parametrima označavanja koji su podešeni u softveru Ezcad.



Slika 21. Prikaz holograma mijenjanih prema postotku binarizacije koji su korišteni za kalibraciju



Slika 22. Prikaz (a) holograma s 50 % propusnosti svjetla i (b) FFT rekonstrukcija

Kako bismo dodali bitmap dokument u Ezcad softver, potrebno je u traci izbornika ili u bočnoj traci koja se nalazi s lijeve strane odabrati opciju „Uvoz” (eng. *Import Bitmap File*) ili „Dodavanje datoteke” (eng. *Add File*) te odabrati željeni dokument. U Ezcad je moguće uvesti svaki dokument pojedinačno, koji je zatim prikazan na radnoj površini. Kada su uvezeni svi hologrami, izvedeno je njihovo poravnanje tako da je u izborniku

„Uredi” (eng. *Modify*) odabrana opcija „Poravnanje” (eng. *Align*). Poravnanje se provodi prema referentnoj točki, odnosno odabrani hologrami usklađeni su prema posljednje odabranom hologramu. Nakon poravnanja, slijedio je postupak u kojem su promijenjeni parametri označavanja za svaki klin prije graviranja.

Tijekom graviranja od parametara promijenjeni su snaga i brzina, a frekvencija lasera u cijelom je postupku graviranja bila ista (Tablica 1). Na prvom polikarbonatu (ili uzorku) izrađena su tri klina koja imaju istu brzinu, a razlikuju se po snazi ispisa. Za početne parametre (prvog klina) odabrana je brzina graviranja od 1000 mm/s, snaga lasera od 3 % i frekvencija od 40 kHz. Za druga dva klina smanjena je snaga lasera, prvo na 2 %, a zatim na 1 %. Na drugom polikarbonatu (uzorku) mijenjana je brzina graviranja, a snaga lasera ostala je ista. Brzina graviranja na drugom uzorku za prvi klin povećana je dvostruko, odnosno na 2000 mm/s, a snaga lasera ostala je na 1 %. Za druga dva klina snaga lasera smanjivana je za pola, prvo na 1500 mm/s, a zatim na 1250 mm/s.

Tablica 1. Parametri korištenog lasera

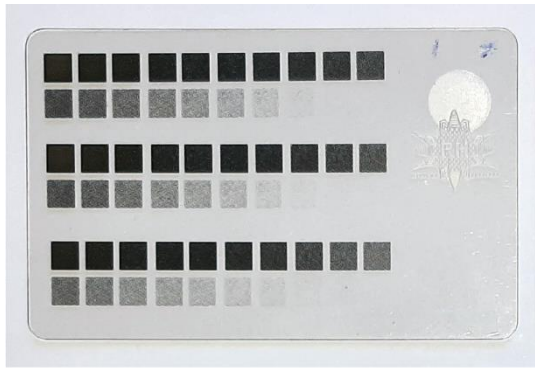
Oznaka	Brzina	Snaga	Frekvencija
K1_R1	1000 mm/s	3% (0,9 W)	40 kHz
K1_R2	1000 mm/s	2% (0,6 W)	40 kHz
K1_R3	1000 mm/s	1% (0,3 W)	40 kHz
K2_R1	2000 mm/s	1% (0,3 W)	40 kHz
K2_R2	1500 mm/s	1% (0,3 W)	40 kHz
K2_R3	1250 mm/s	1% (0,3 W)	40 kHz

Prije postupka graviranja bilo je potrebno namjestiti poziciju graviranja na polikarbonatu s pomoću opcije „Svjetla” (eng. *Light*) koja služi da se vidi kako će izgledati konačno graviranje. Nakon što se na radnoj površini lasera namjestio materijal, opcija „Light” je zatvorena, spušten je sigurnosni mehanizam (zaštitni poklopac) i odabrana je opcija „Označavanje” (eng. *Mark*). Navedena opcija provela je stvarno označavanje na površini materijala, a u stvari izvela je postupak graviranja svih holograma koji su uvedeni u softver.

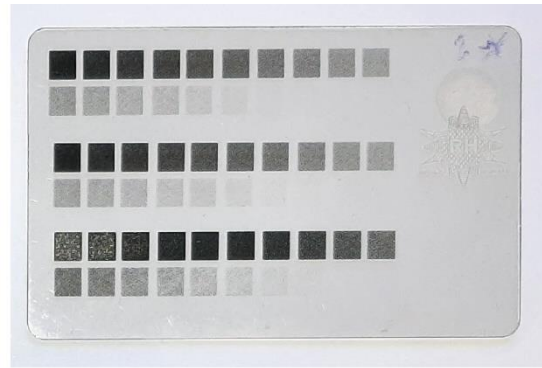
### 3.6. ANALIZA

Tijekom postupka graviranja, nakon izrade prvog klina, provedena je kratka analiza da se vidi dobiveni rezultat holograma. Uočeno da je laser ošteti (spalio) polikarbonat na mjestima na kojima su hologrami s manjim postotcima propusnosti svjetla. Površina polikarbonata na kojoj se nalaze hologrami s postotkom binarizacije od 5 % do 30 % ima žućkastu boju i rezultira vrlo lošom optičkom rekonstrukcijom holograma. Zbog nastalih problema kod prvog klina, za izradu idućeg smanjena je snaga lasera na 2 %, kako bi se smanjilo oštećenje materijala. Nakon graviranja, uočen je isti problem, ali ovaj put za holograme s postotkom binarizacije od 5 % do 25 %. Vidljivo je da je smanjenjem snage smanjeno i oštećenje materijala te poboljšana optička rekonstrukcija. U izradi trećeg klina također je smanjena snaga lasera, ovaj put na 1 % i ponovno je bilo vidljivo smanjenje oštećenja. Hologrami u rasponu od 5 % do 15 % binarizacije dali su vrlo lošu optičku rekonstrukciju i žućkaste su boje (Slika 23 a).

Nakon završene izrade prvog uzorka, za drugi je uzorak izabrana snaga lasera od 1 % koja će biti ista za sva tri klina, a brzina graviranja mijenjat će se ovisno o dobivenim rezultatima. Kod izrade prvog klina na drugom uzorku korištena je brzina graviranja od 2000 mm/s i dobiveni su bolji rezultati, odnosno nije bilo oštećenja na materijalu. Jedini problem jest gubitak informacija. Vrijednosti u rasponu od 60 % pa nadalje jedva su vidljive na površini materijala, a samim time gubi se i rekonstrukcija holograma. Kako je problem bio prevelika brzina, odlučeno je da se smanji brzina graviranja na 1500 mm/s za idući klin. U izrađenom klinu nema oštećenja materijala, ali je i dalje problem gubitak informacija te je zbog toga smanjena brzina na 1250 mm/s. Zbog smanjene brzine nastao je ponovno problem oštećenja materijala kao u prvom uzorku, odnosno hologrami u rasponu od 5 do 15 % dali su lošu rekonstrukciju i površina materijala je žućkaste boje (Slika 23 b).



(a) prvi uzorak - K1\_(R1 - R3)

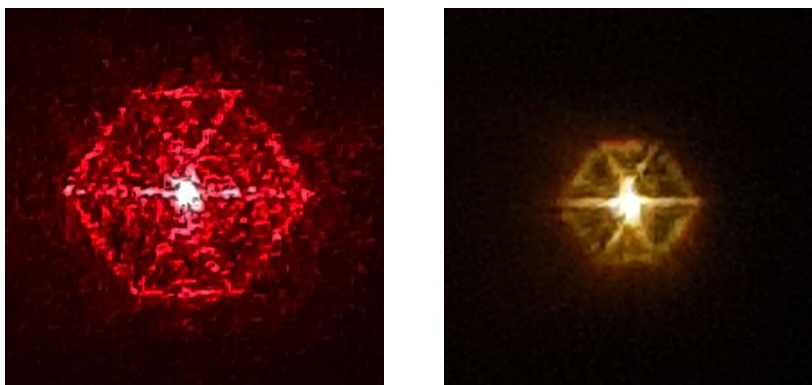


(b) drugi uzorak - K2\_(R1 - R3)

Slika 23. Prikaz testnih uzoraka

Nakon izrade uzoraka, napravljena je temeljita analiza optičke rekonstrukcije za koju je korišten prvo izvor bijele svjetlosti, a zatim laser. Analizom prvog klina K1\_R1 dobiven je raspon prihvatljive propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak za vrijednosti od 35 % do 75 %. Dobivena je rekonstrukcija 3D kocke s oštrim linijama (Slika 24), čija kvaliteta rekonstrukcije prvo raste, a zatim pada ovisno o kvaliteti zapisa interferencijskog uzorka. Kod početnih vrijednosti u rasponu od 5 do 30 %, zbog oštećenja materijala i holograma (interferencijskog uzorka) optička rekonstrukcija 3D kocke je za prve vrijednosti jako loša, a za ostale je jedva vidljiva uz problem nastanka optičkog šuma koji narušava kvalitetu rekonstrukcije holograma. Isto tako, nakon postotka binarizacije od 80 % rekonstrukcija holograma je sve lošije kvalitete. Kod analize drugog klina K1\_R2 određen je raspon prihvatljive propusnosti svjetla u rasponu od 30 do 75 %, a za treći klin K1\_R3 određeno je u rasponu od 25 % do 70 %.

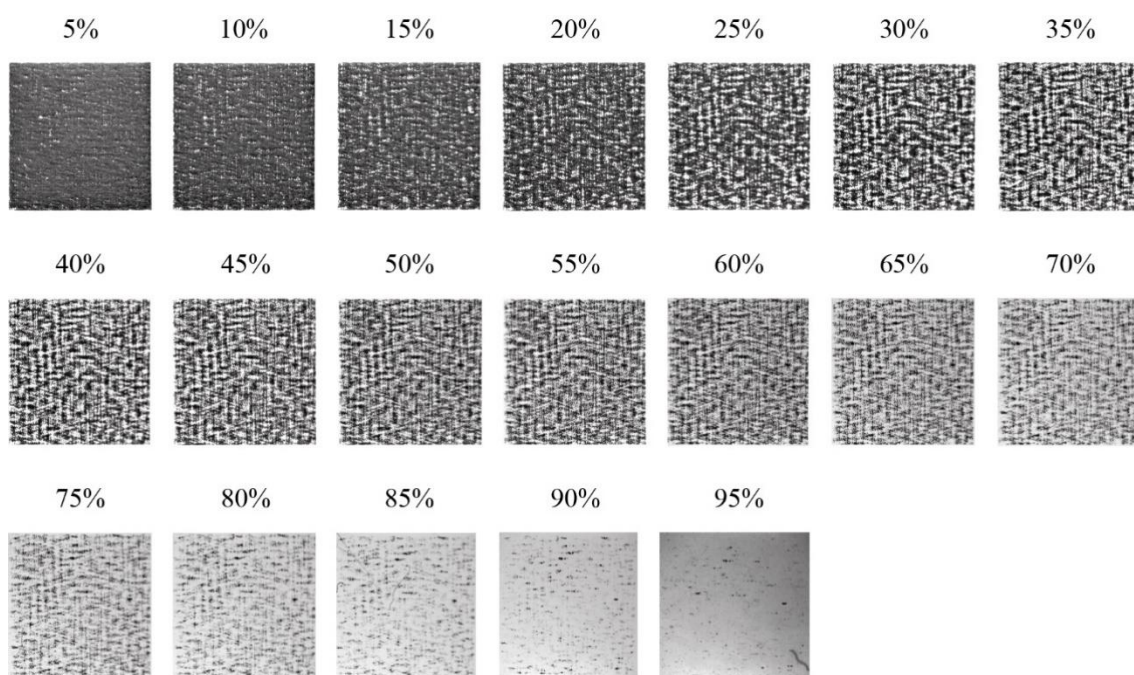
Tijekom analize prvog klina K2\_R1 i drugog klina K2\_R2 na drugom uzorku, dobiveni su bolji rezultati kod manjih postotaka binarizacije, u odnosu prema većima, koji su bili jedva vidljivi na materijalu. Za prvi klin određen je raspon prihvatljive propusnosti svjetla za holograme s postotkom binarizacije od 10 % do 45 %, a za drugi klin u rasponu od 15 do 45 %. Kod posljednjeg klina K2\_R3 problem je oštećenje materijala zbog kojega manji postotci binarizacije ponovno ne čine dobru rekonstrukciju holograma te je raspon prihvatljive propusnosti svjetla od 25 % do 70 %.



Slika 24. Prikaz optičke rekonstrukcije holograma K1\_R1 s 50 %, (a) pomoću lasera i (b) bijele svjetlosti

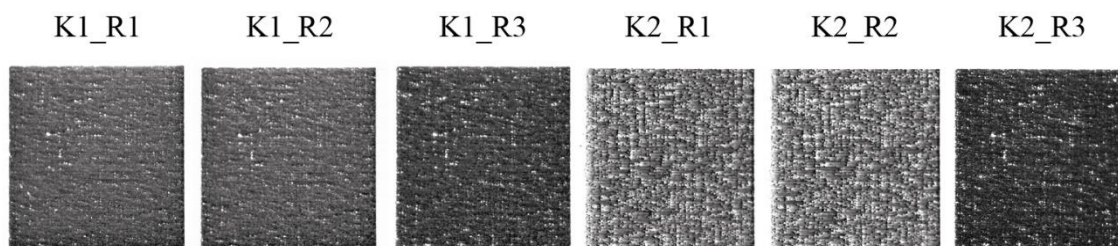
Idući korak bilo je snimanje klinova (Slika 25) s pomoću mikroskopa Leica EZ4 D Stereo, a prije početka snimanja bilo je potrebno podesiti parametre. Prvo je na mikroskopu određena vrsta rasvjete koja dolazi s donje strane te je postavljena na maksimalnu jačinu, a zatim je uzorak stavljen na postolje mikroskopa i određeno je povećanje mikroskopa na 15 x. Donja rasvjeta za snimanje uzorka izabrana je zbog toga što je materijal proziran. Za snimanje (upravljanjem) mikroskopom korišten je program u kojem su također podešeni parametri, a odabrana je opcija „Acquire” koja služi za prilagodbu parametara vezanih za izgled konačne slike, od prilagodbe svjetlosti tijekom snimanja pa do pohrane slike. U izborniku „Kontrola slike” (eng. *Image Controls*) odabrana je opcija „Propušteno svjetlo” (eng. *Transmitted light*) zbog toga što su uzorci koji se snimaju transparentni. Odabrana je opcija „Automatsko podešavanje bijele boje” (eng. *Auto White Balance*) koja daje referenciju boje da objekti koji su bijeli kroz okular budu bijeli i na slici nakon snimanja. Za format snimljene slike odabrana je rezolucija 2048 x 1536 px u kojoj je zabilježena svaka slika. Ukupno je snimljeno 114 slika, odnosno holograma.





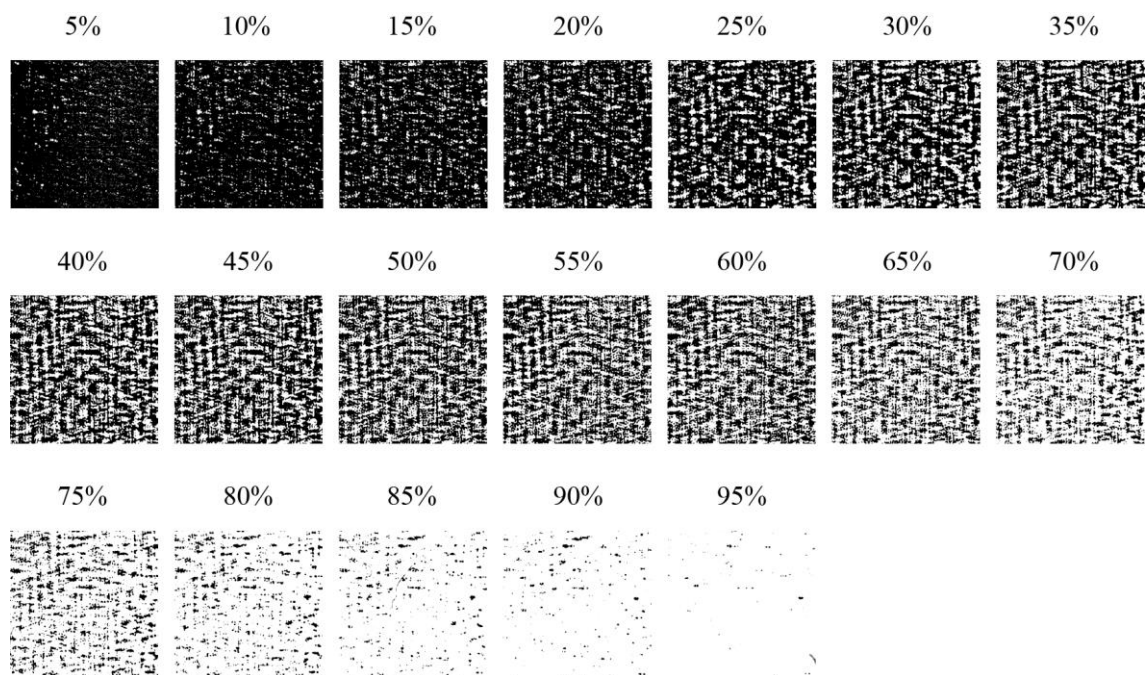
Slika 25. Prikaz snimljenog klina K1\_R1

Pri snimanju holograma na mikroskopu uočena je razlika u zapisu interferencijskog uzorka. Razlika je u tome kako je laser napravio zapis na površini. Laser je holograme kod klinova K2\_R1 i K2\_R2, koji imaju 5 % propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak, zapisao kao linije, a ne kao točke od kojih se i uzorak sastoji. Na slici (Slika 26) prikazana je usporedba između svih holograma s 5 % propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak.



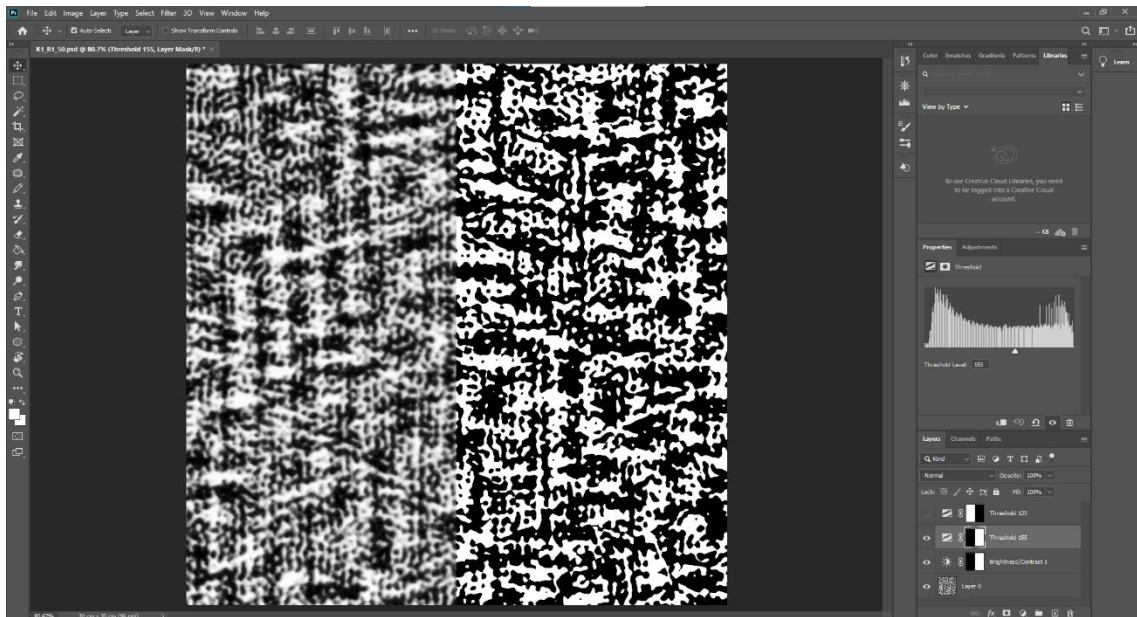
Slika 26. Hologrami s 5 % propusnosti svjetla

Snimljeni uzorci obrađeni su u Adobe Photoshop, kako bi svi imali jednaku svjetlinu i dimenziju. Svaki hologram konvertiran je u „Crno-bijeli” prikaz (eng. *Grayscale*) kako bi svaki piksel u hologramu imao vrijednost intenziteta od 0 (crna) do 255 (bijela). Zatim su svi hologrami izrezani na istu dimenziju, uz nastojanje da uvijek bude ista pozicija. Posljednji korak bilo je stavljanje maske „Threshold” kojom se određuje određeni prag vrijednosti. S pomoću te maske dobivena je binarizacija holograma koja sadržava samo dvije boje – crnu i bijelu (Slika 27), tako da svi pikseli s vrijednostima koje su iznad postavljenog praga postanu bijeli, a svi pikseli s vrijednostima ispod praga da budu crni.



Slika 27. Prikaz binariziranih holograma klina K1\_R1

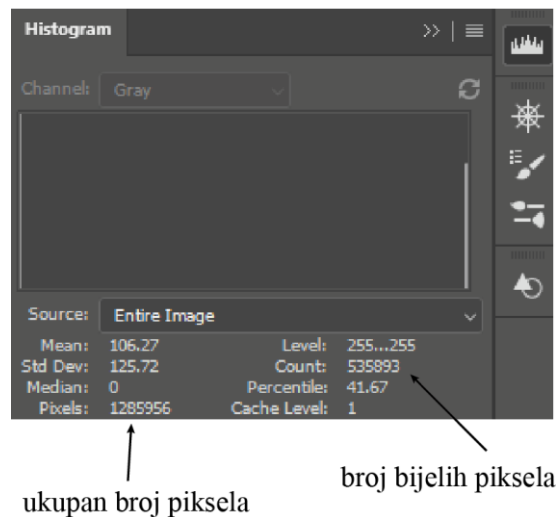
Zbog razlike u svjetlini lijeve i desne strane svakog holograma, koja je nastala tijekom snimanja na mikroskopu, stavljene su dvije maske „Thresholda” s različitim pragom vrijednosti. Na lijevi dio holograma stavljen je prag na 125, a na desni dio hologram 155 (Slika 28).



Slika 28. Prikaz holograma K1\_R1 s 50 % propusnosti svjetla koji na desnoj polovici ima masku „Threshold”

Takvom obradom holograma nastojale su se dobiti numeričke vrijednosti, koliko bijelih piksela čini svaki hologram, koje označuju propusnost svjetla kroz njega. Te su vrijednosti dobivene u Adobe Photoshopu s pomoću alata „Histogram”. Histogram je grafički prikaz raspodjele tonova od tamnijih do svijetlih, koji pritom prikazuje i numeričke vrijednosti kao što je ukupan broj piksela koji čini hologram, broj bijelih i crnih piksela, standardnu devijaciju i srednju vrijednost.

Za svaki hologram otvoren je histogram koji u svojem grafičkom prikazu sadržava dvije linije, jednu s lijeve strane, koja predstavlja crnu vrijednost (0), te drugu s desne strane, koja predstavlja bijelu vrijednost (255) (Slika 29). Postotak propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak dobiven je tako da je broj bijelih piksela podijeljen s ukupnim brojem piksela i zatim dobiveni rezultat pomnožen sa 100.



Slika 29. Prikaz histograma za hologram K1\_R1 s 50 % propusnosti svjetla

Iz dobivenih podataka napravljena je daljnja analiza numeričkih vrijednosti, s pomoću kojih su odabrane optimalne pretpostavke zapisa računalno generiranih holograma.

### 3.7. IZRADA FINALNOGA ZAŠTITNOG ELEMENTA

Za konačan rezultat izrađen je primjer dokumenta, dimenzije 85 x 55 mm, koji sadržava dva transmisijska računalno generirana holograma. Prije postupka izrade bilo je potrebno izraditi pripremu dokumenta u Adobe Illustratoru (Slika 30), pripremiti motive kojim će se maskirati hologrami te izraditi objekte koji će se prikazati tijekom rekonstrukcije holograma.



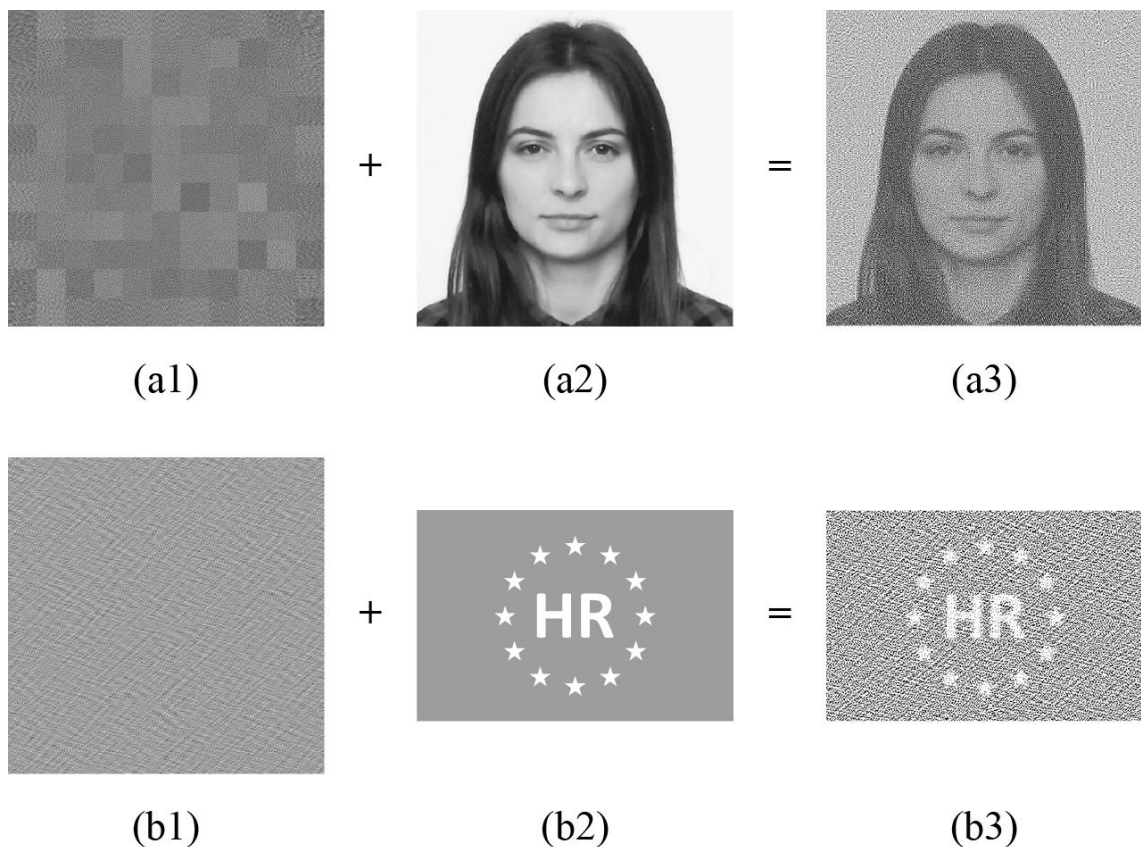
Slika 30. Digitalni prikaz konačnog dokumenta

Iz prethodno analiziranih podataka odabrani su parametri za lasersko graviranje kojim su ostvareni najbolji rezultati, a korišteni su za izradu klina K1\_R1 i to su snaga lasera od 3 %, brzina graviranja od 1000 mm/s i frekvencija od 40 kHz. Uz to, odabrani su postotci binarizacije interferencijskog uzorka kojim se utječe na to koliko svjetlosti može proći kroz hologram. Za izradu finalnoga zaštitnog elementa korišteni su postotci binarizacije od 35 % do 75 %.

Za maskiranje holograma upotrijebljena je slika i logo zastave Europske unije koja sadržava oznaku HR. Slika je sastavljena od holo-blokova koji su dimenzije 2 x 2 mm, a objekt koji je korišten za izradu holograma je 3D kocka. Svaki holo-blok ima različitu perspektivu kocke, koja se razlikuje po kutu rotacije, a odabran je kut od 7°, čineći ukupnu rotaciju kocke za 35° u svim smjerovima od središnjeg dijela slike. Konačan CGH sadržava 121 holo-blok i veličine je 22 x 22 mm. Logo zastave je dimenzije 12 x 8 mm i za objekt je korišten tekst „RH” koji je prikazan u samo jednoj perspektivi, a pri

rekonstrukciji vidi se i njegov konjugirani član. Konačan CGH, rađen za logo, dimenzije je 12 x 12 mm, a nakon njegova maskiranja izrezan je na dimenziju loga.

Sljedeći korak bilo je maskiranje holograma u računalnom programu, a zatim je napravljena potpuna binarizacija dobivenih holograma u Adobe Photoshopu. Postupak je isti kao i kod pripreme holograma za kalibraciju. Potrebno je upisati rezoluciju 2000 dpi, odabrati Bitmap način rada te spremiti u BMP formatu (Slika 31).



Slika 31. Prikaz maskiranja holograma: (a1), (b1) CGH hologram, (a2), (b2) motivi za maskiranje i (a3), (b3) konačni zaštitni elementi

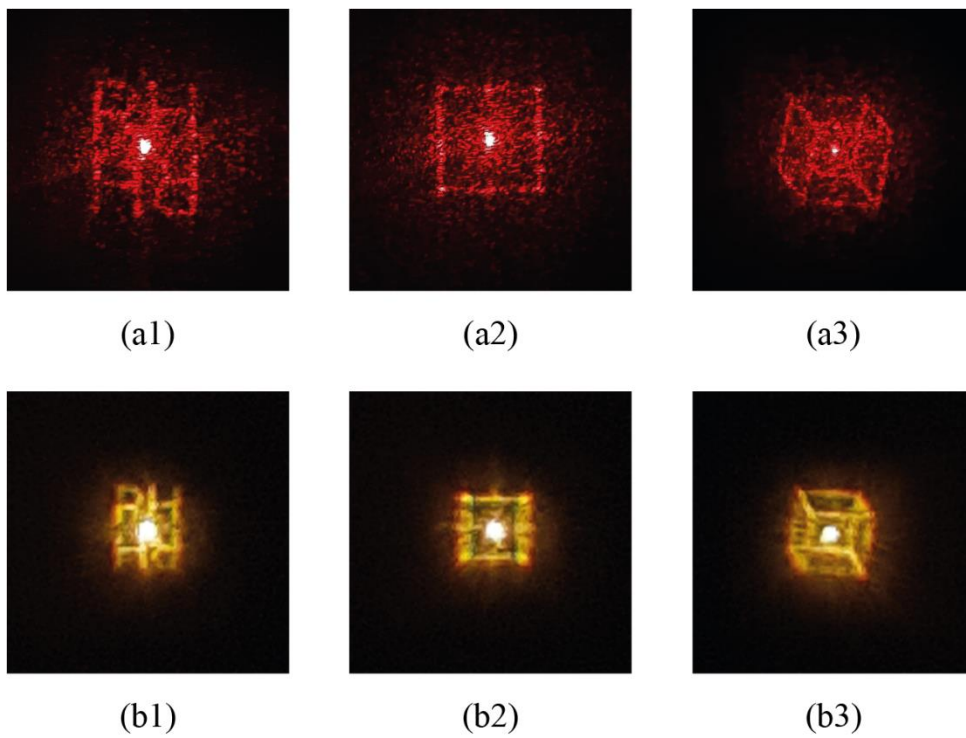
Postupak laserskog graviranja na polikarbonat rađen je u tri koraka. Prvo je u Ezcad softver dodan tekstualni dio dokumenta, za koji je u opciji „Uzorak” (eng. *Hatch*) odabrana ispuna, jer bez te opcije laser gravira samo obrub oblika. Nakon što je

napravljen tekstualni dio u Ezcad je dodan prvi zaštitni element, odnosno slika, a nakon graviranja dodan je i drugi zaštitni element – logo (Slika 32).



Slika 32. Primjer konačnog dokumenta

Slika (33 a1 i b1) prikazuje rekonstrukciju holograma s jednom perspektivom, vidljiv je tekst „RH” koji može biti zamijenjen bilo kojim drugim tekstom ili brojevima, čineći svaki hologram jedinstvenim. Na slici (Slika 33 a2 i a3) prikazana je optička rekonstrukcija kocke s pomoću lasera, a na slici (Slika 33 b2 i b3) prikazana je rekonstrukcija s pomoću bijele svjetlosti. Kocka se prikazuje u različitoj perspektivi ovisno o tome koji je holo-blok osvjetljen.



Slika 33. Rekonstrukcija konačnih holograma (kocke i teksta)



#### 4. REZULTATI I RASPRAVA

Vizualnom analizom dobivenih holograma vidljivo je da pri manjoj brzini graviranja nastaje oštećenje materijala, uzrokujući i promjene u njegovoj boji. Uz to, rekonstrukcija holograma početnih postotaka binarizacije bila je neuspješna zbog tih oštećenja. Postupkom graviranja nastojalo se riješiti taj problem tako da je smanjena snaga kroz prva tri klina, ali uočena je znatno manja razlika u poboljšanju. Zato je odlučeno promijeniti brzinu graviranja, kojom su dobiveni bolji rezultati za niže vrijednosti binarizacije u rasponu od 5 % do 50 %, ali dobivene su lošije vrijednosti za binarizaciju u rasponu od 55 % do 95 %. Zbog upotrebe male snage i veće brzine, interferencijski uzorci tih vrijednosti jedva su vidljivi na površini materijala. Da bi se riješio taj problem, potrebno je pronaći ravnotežu između snage lasera i brzine graviranja kako bi se dobio kvalitetan zapis bez oštećenja materijala.

Dobiveni su hologrami snimljeni i obrađeni te je za svaki hologram izračunat postotak propusnosti svjetla kroz interferencijski uzorak, a podatci su zapisani u obliku tablice te uspoređeni s digitalnim (izvornim) vrijednostima. Isto tako, za dobivene vrijednosti izračunata je njihova razlika „delta” da se vidi koliko je odstupanje (Tablica 2).

Tablica 2. Prikaz dobivenih postotaka propusnosti svjetla svih holograma

Oznaka	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
K1_R1	4,34%	6,44%	12,33%	16,60%	26,13%	31,79%	35,47%	39,60%	39,70%	41,70%
$\Delta x$	-0,66%	-3,56%	-2,67%	-3,40%	1,13%	1,79%	0,47%	-0,40%	-5,30%	-8,30%
K1_R2	4,62%	7,77%	11,70%	19,40%	26,65%	33,64%	38,87%	39,42%	41,83%	38,10%
$\Delta x$	-0,38%	-2,23%	-3,30%	-0,60%	1,65%	3,64%	3,87%	-0,58%	-3,17%	-11,90%
K1_R3	3,02%	10,43%	19,03%	26,84%	35,65%	36,15%	37,57%	40,27%	39,80%	51,17%
$\Delta x$	-1,98%	0,43%	4,03%	6,84%	10,65%	6,15%	2,57%	0,27%	-5,20%	1,17%
K2_R1	23,17%	30,48%	32,92%	30,98%	41,14%	50,37%	64,31%	69,71%	81,35%	87,22%
$\Delta x$	18,17%	20,48%	17,92%	10,98%	16,14%	20,37%	29,31%	29,71%	36,35%	37,22%
K2_R2	26,60%	33,78%	36,64%	33,58%	36,12%	41,56%	54,61%	68,70%	79,83%	84,24%
$\Delta x$	21,60%	23,78%	21,64%	13,58%	11,12%	11,56%	19,61%	28,70%	34,83%	34,24%
K2_R3	6,49%	12,89%	23,64%	26,72%	36,11%	33,94%	39,81%	43,86%	41,28%	55,12%
$\Delta x$	1,49%	2,89%	8,64%	6,72%	11,11%	3,94%	4,81%	3,86%	-3,72%	5,12%

Oznaka	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
K1_R1	44,15%	46,35%	57,51%	68,05%	80,24%	89,70%	95,20%	97,52%	99,50%
$\Delta x$	-10,85%	-13,65%	-7,49%	-1,95%	5,24%	9,70%	10,20%	7,52%	4,50%
K1_R2	47,00%	51,01%	61,85%	73,74%	85,65%	91,21%	96,45%	97,41%	99,30%
$\Delta x$	-8,00%	-8,99%	-3,15%	3,74%	10,65%	11,21%	11,45%	7,41%	4,30%
K1_R3	54,45%	64,33%	75,74%	83,35%	92,04%	93,76%	96,16%	97,69%	98,35%
$\Delta x$	-0,55%	4,33%	10,74%	13,35%	17,04%	13,76%	11,16%	7,69%	3,35%
K2_R1	82,92%	85,91%	89,13%	88,44%	91,26%	95,90%	96,08%	96,75%	99,02%
$\Delta x$	27,92%	25,91%	24,13%	18,44%	16,26%	15,90%	11,08%	6,75%	4,02%
K2_R2	82,32%	85,70%	88,30%	82,48%	87,30%	92,78%	93,10%	96,13%	97,63%
$\Delta x$	27,32%	25,70%	23,30%	12,48%	12,30%	12,78%	8,10%	6,13%	2,63%
K2_R3	54,68%	64,81%	77,44%	84,97%	93,06%	95,56%	97,01%	97,94%	98,39%
$\Delta x$	-0,32%	4,81%	12,44%	14,97%	18,06%	15,56%	12,01%	7,94%	3,39%

Iz dobivenih rezultata može se vidjeti da su određene vrijednosti vrlo slične očekivanim vrijednostima. Međutim, dobivena su i odstupanja koja su također bila očekivana. Mnogo je čimbenika koji su mogli utjecati na dobivena odstupanja, od postupka graviranja, primjenom različite promjene snage i brzine graviranja (postavljenih parametra), zatim postupka izračuna holograma te do obrade izračunatih holograma u Adobe Photoshopu.

Analizom tablice uočeno je da su klinovi koji su imali manju brzinu graviranja (1000 mm/s), točnije klinovi K1\_R1, K1\_R2 i K1\_R3, rezultirali gotovo sličnim vrijednostima koje su očekivane. Znači da su povećanjem brzine graviranja nastala znatno veća odstupanja od očekivanih vrijednosti, iako je zbog manjih brzina bilo oštećenja materijala. Za razliku od promjene snage, u postupku graviranja također je bilo odstupanja, ali znatno manjih.

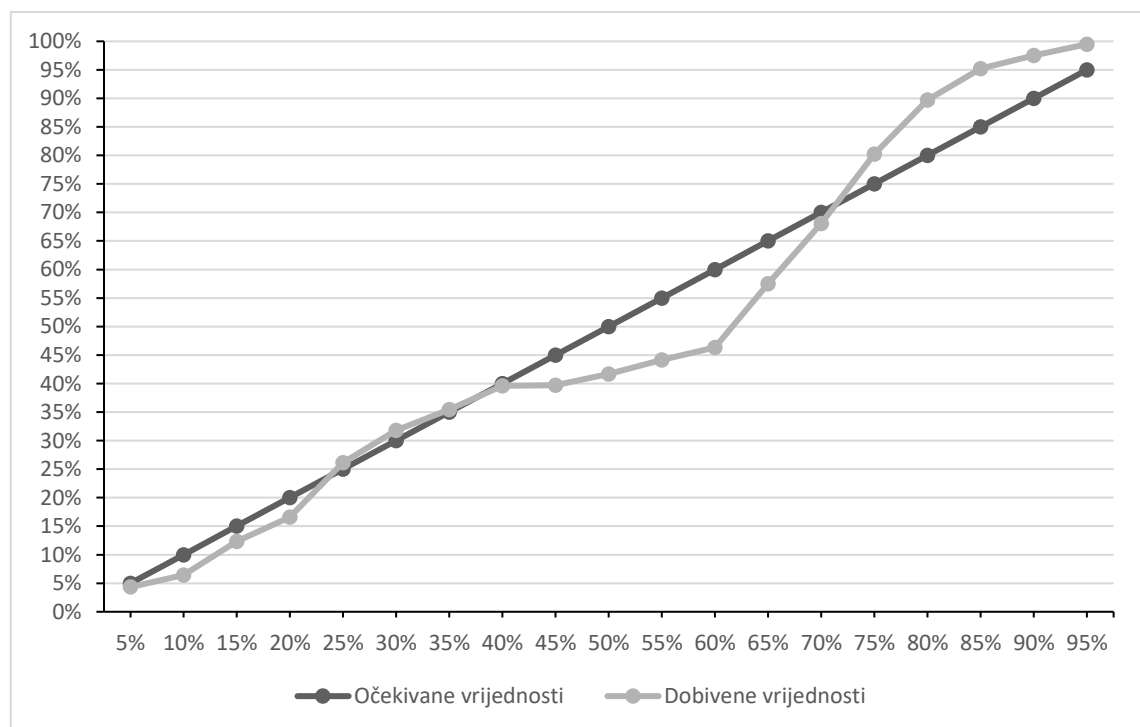
Zbog bolje analize, za svaki klin izrađen je grafički prikaz dobivenih rezultata, koji su uspoređeni s idealnom linijom koja predstavlja očekivane vrijednosti. U grafičkom prikazu na x-osi prikazane su očekivane vrijednosti, a na y-osi dobivene vrijednosti.

Na grafu (Slika 34) su prikazane dobivene vrijednosti za klin K1\_R1 iz kojeg se vidi da su za početne postotke binarizacije manja negativna odstupanja u odnosu prema

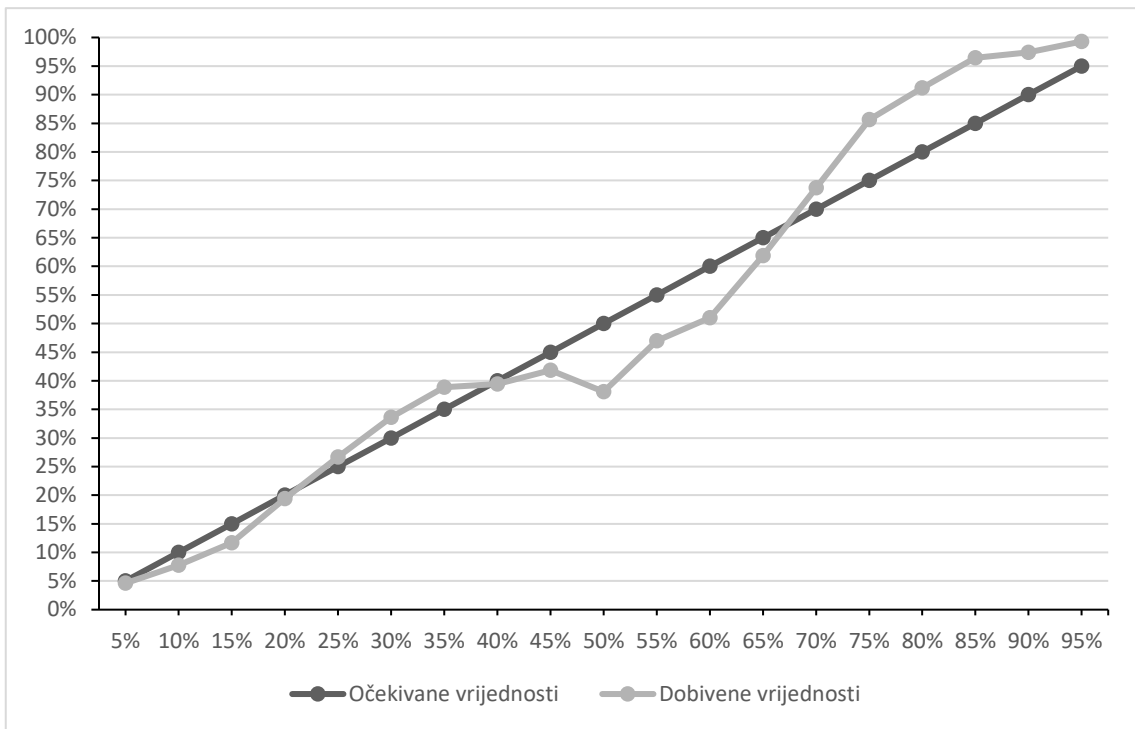
očekivanim vrijednostima. Za postotke binarizacije u rasponu od 25 % do 40 % dobivene su vrlo slične vrijednosti očekivanima, nakon kojih je bilo veće negativno odstupanje, sve do 70 % binarizacije. Na grafu se vidi da su nakon 70 % binarizacije postignute vrijednosti iznad očekivanih.

U sljedećem grafičkom prikazu (Slika 35) prikazane su vrijednosti koje su gotovo jednake očekivanima, uz neka manja odstupanja. Nakon 45 % binarizacije privremeno pada linija dobivenih vrijednosti nakon čega slijedi ponovni rast. Kao na prethodnom grafičkom prikazu dobivene vrijednosti nakon 70 % binarizacije ponovno su iznad očekivanih.

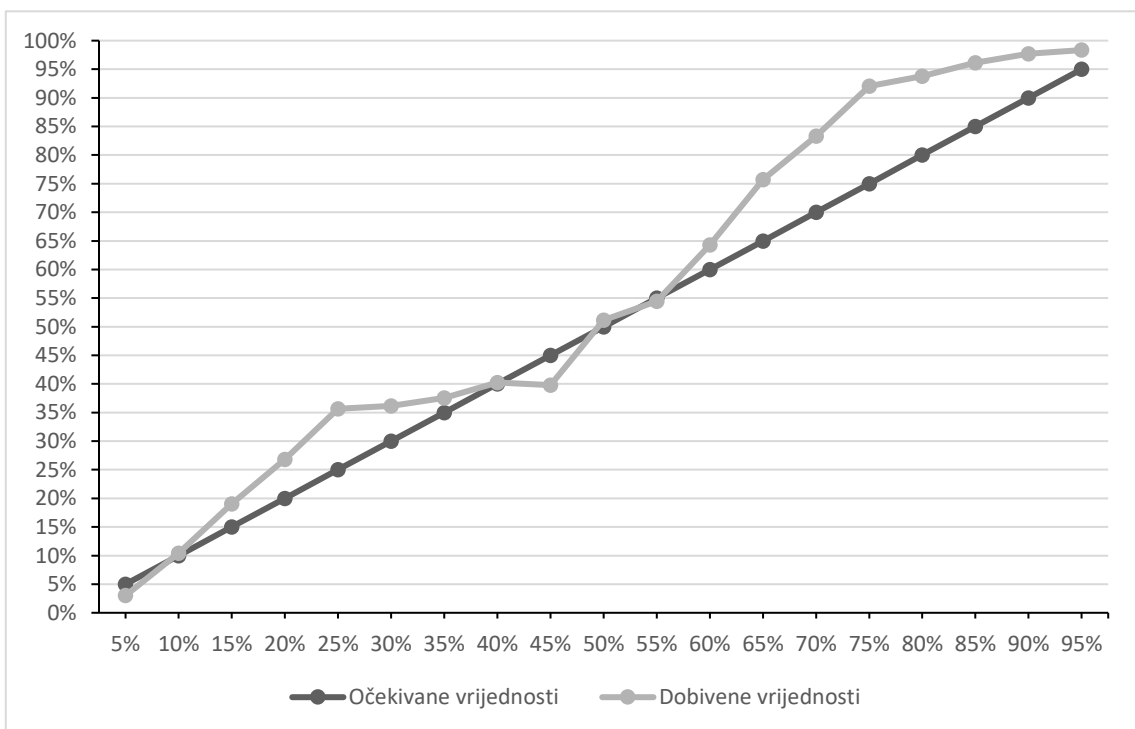
Za grafički prikaz klina K1\_R3 (Slika 36) vidi se početni rast vrijednosti iznad očekivanih, da bi se dogodio trenutačni pad na 45 % binarizacije. Vidi se postupno izjednačavanje vrijednosti sve do 55 % binarizacije, kada je zatim zabilježen velik rast iznad očekivanih vrijednosti.



Slika 34. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K1\_R1



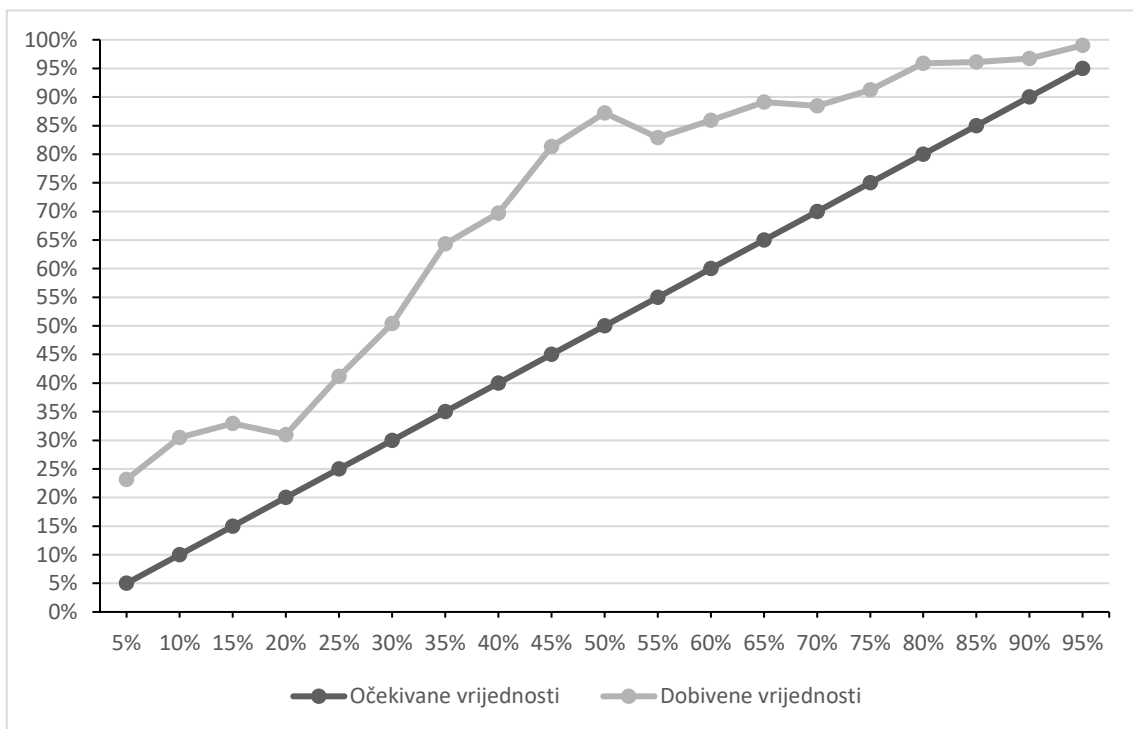
Slika 35. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K1\_R2



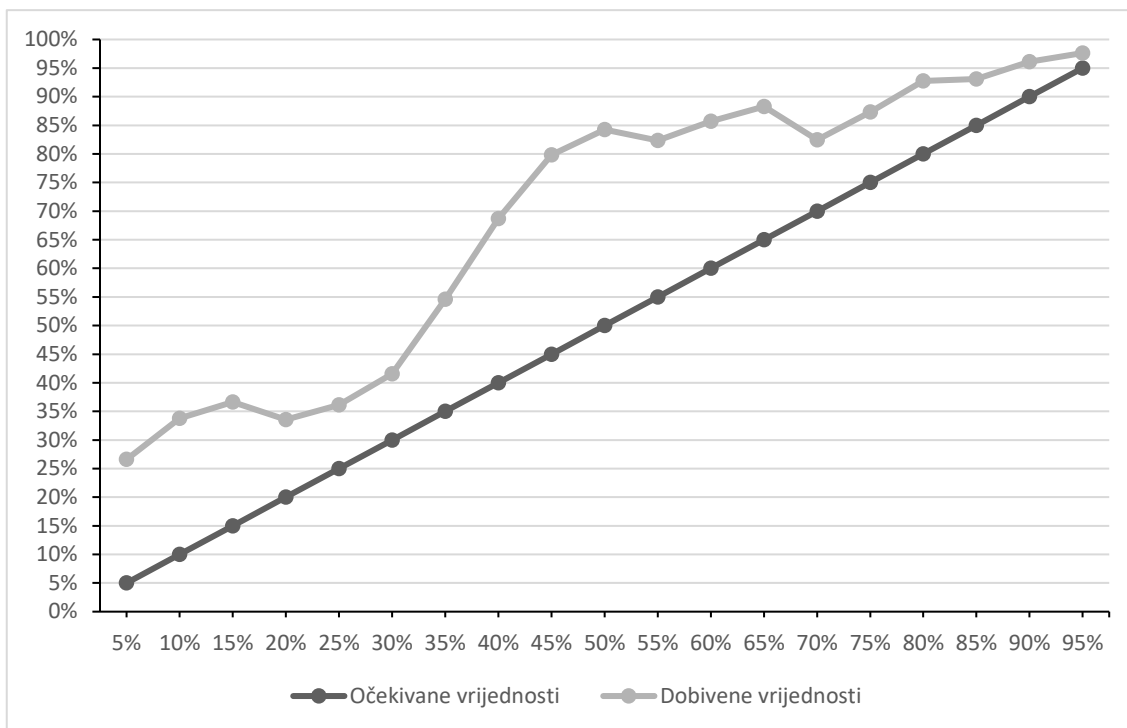
Slika 36. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K1\_R3

Prilikom analize klinova K2\_R1 i K2\_R2, na temelju tabličnih podataka bilo je očekivano da su dobivene vrijednosti s velikim odstupanjima. Isto tako, iz grafičkog prikaza (Slika 37 i 38) jasno se vidi dobiveno odstupanje koje je iznad očekivanih vrijednosti. Oba grafička prikaza pokazuju sličan model vrijednosti, pri čemu je vidljiv početni blagi porast, nakon čega slijedi pad vrijednosti na 20 % binarizacije. Slijedi ponovni rast vrijednosti do 50 % binarizacije, a zatim je vidljivo postupno padanje dobivenih vrijednosti.

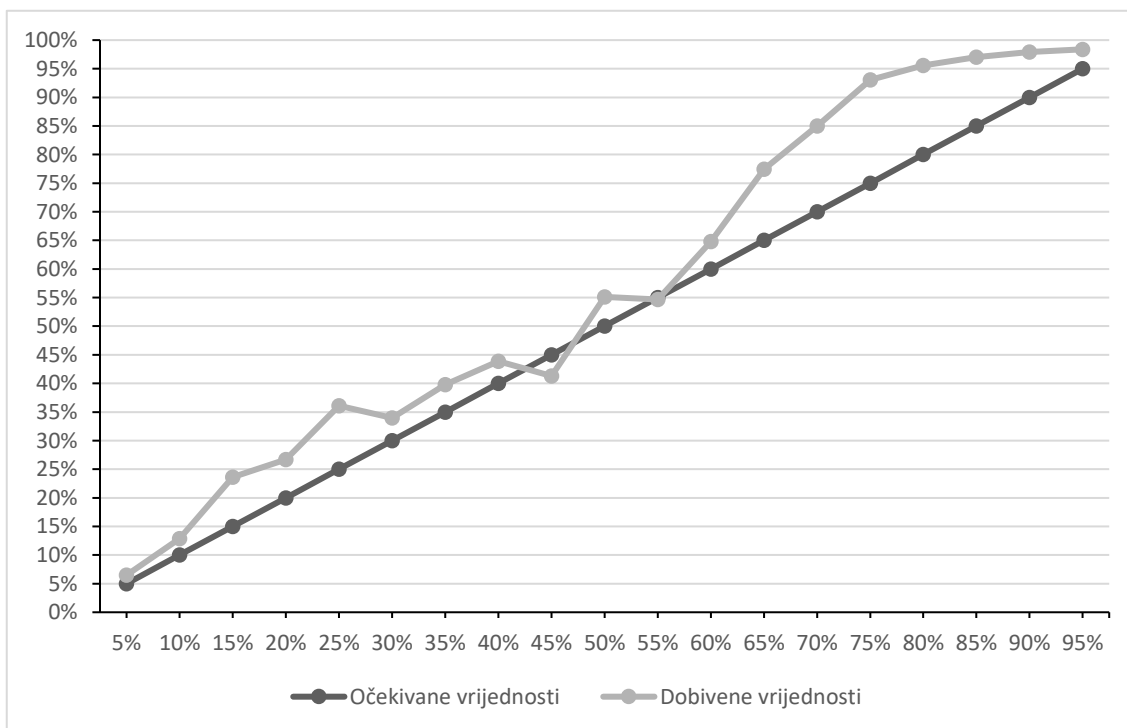
Na posljednjem grafičkom prikazu (Slika 39) vidljiva je velika varijacija vrijednosti. Kroz početne vrijednosti vidljiv je izmjenjujući porast i pad, nakon kojeg se vidi kratkotrajan pad i zatim rast, da bi nakon 55 % binarizacije slijedio znatan porast iznad očekivanih vrijednosti.



Slika 37. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K2\_R1



Slika 38. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K2\_R2



Slika 39. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K2\_R3

Iz tabličnih podataka i grafičkih prikaza dobiveni su jasni podatci. Analizom svih navedenih podataka odabrane su najbolje vrijednosti koje su zatim korištene za izradu finalnoga zaštitnog elementa. Za izradu konačnog dokumenta odabrani su parametri koji su upotrijebljeni za izradu prvog klina K1\_R1. Za izradu klina korišteni su parametri: snaga 3 %, brzina 1000 mm/s i frekvencija 40 kHz. Uz to, iz podataka dobivenih za navedeni klin odabran je raspon binarizacije interferencijskog uzorka koji je bio najbliži očekivanim vrijednostima. Odabran je raspon od 35 % do 75 % binarizacije. Iz grafa je vidljivo da su dobivene vrijednosti klina K1\_R1 slične očekivanim vrijednostima, iako postoje blaga odstupanja.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom je radu napravljeno temeljito istraživanje izrade transmisijskih računalno generiranih holograma s pomoću laserskog graviranja na polikarbonat. Na temelju dobivenih rezultata potvrđeno je da su ciljevi ovog rada uspješno ostvareni, a hipoteze potvrđene. Za potrebe rada izrađen je set testnih uzoraka koji se razlikuju po korištenim parametrima laserskoga graviranja. Svaki uzorak sastoji se od 19 holograma, a međusobno se razlikuju po postotku binarizacije interferencijskog uzorka.

Pri izradi testnih uzoraka mijenjani su parametri snage i brzine laserskoga graviranja. Analizirajući dobivene podatke uzoraka određene su optimalne pretpostavke zapisa koje uključuju snagu lasera od 3 % i brzinu graviranja od 1000 mm/s. Uz to, određen je postotak binarizacije holograma koji se razlikuje po tome koliko svjetlosti prolazi kroz interferencijski uzorak, u rasponu od 35 % do 75 % s povećanjem od 5 %.

Određivanje optimalnih pretpostavki zapisa bile su presudne za izradu finalnoga zaštitnog elementa. Navedenim vrijednostima postignut je kvalitetan zapis na polikarbonatnu podlogu. U konačnici izrađen je primjer dokumenta koji sadržava dva transmisijska računalno generirana holograma. Zaštitni elementi konačnog proizvoda zbog svojeg načina proizvodnje omogućuju veliku sigurnost protiv krivotvorenja.

U ovom je radu izvedeno i prikazano graviranje holograma na površini materijala. Budući da je ostvareno uspješno graviranje holograma na površini materijala, idući korak bit će pokušaj graviranja holograma unutar materijala. Tim postupkom laserska energija bila bi fokusirana unutar materijala, do određene dubine, gdje bi nastalo zagrijavanje i dogodile bi se promjene unutar materijala. Za buduća istraživanja planira se i istražiti koji su materijali, uz polikarbonat, pogodni za zapis računalno generiranih holograma, te poboljšati kvalitetu zapisa holograma.



## 6. LITERATURA

- [1] Poon, T. C. i Liu, J. P. (2014). *Introduction to Modern Digital Holography: with MATLAB*, Cambridge England, United Kingdom: Cambridge University Press
- [2] Ackermann, G. K. i Eichler, J. (2007). *Holography: A Practical Approach*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [3] Schnars, U. i Jueptner, W. (2005). *Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin
- [4] Vacca, J. (2001). *Holograms & Holography: Design, Techniques, & Commercial Applications*, CHARLES RIVER MEDIA, INC., Hingham, Massachusetts
- [5] Grafički fakultet (n.d.). *Holografija: Radna verzija integral, Skripta*, Grafički fakultet, Zagreb
- [6] Knock, W. E. (1981). *Laser and Holography: An Introduction to Coherent Optics*, Dover Publications, Inc., New York
- [7] Benton, S. A. i Bove Jr., V. M. (2008). *Holographic Imaging*, Wiley-Interscience, New York
- [8] Toal, V. (2012). *Introduction to Holography*, CRC Press, Boca Raton
- [9] Blanche, P.-A. (2014). *Field Guide to Holography*, SPIE Press, Bellingham, Washington USA
- [10] Adams, C. S. i Hughes, I. G. (2018). *Optics f2f: From Fourier to Fresnel*, Oxford University Press, Oxford, UK
- [11] Bass, M. (2010). *Handbook of Optics: Volume I – Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments (3rd ed.)*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York
- [12] Gupta, S. D., Ghosh, N. i Banerjee, A. (2016). *Wave Optics: Basic Concepts and Contemporary Trends*, CRC Press, Boca Raton

- [13] Kreis, T. (2005). *Handbook of Holographic Interferometry; Optical and Digital Methods*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [14] Easton, R. (2005). *Basic Principles of Imaging Science II*, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY
- [15] Cviljušac, V., Divjak, A. i Modrić, D. (2018). *Computer Generated Holograms of 3D Points Cloud*, Technical Gazette, svez. 25, br. 4, pp. 1020-1027
- [16] Cviljušac, V., Brkić, A. L., Sviličić, B. i Čačić, M. (2022). *Computer-generated hologram manipulation and fast production with a focus on security application*, Applied Optics, svez. 61, br. 5, pp. 43-49
- [17] Kipphan, H. (2001). *Handbook of Print Media: Technologies and Production Methods*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin
- [18] Kempni, K. (n.d.). *Fotografija*, Bibliografija Tehničke enciklopedije (1963-97), Leksikografski zavod Miroslav Krleža, sv. 5, str. 532-583.
- [19] Brkić, A. L., Cviljušac, V., Skenderović, H. i Rakić, M. (2023). *Unifying fast computer-generated hologram calculation and prepress for new and existing production techniques*, Applied Optics, svez. 62, br. 10, pp. 119-124
- [20] Hubeatir, K. A., Al-Kafaji, M. M. i Imran, H. J. (2018). *Effect of Different Laser Types on Material Engraving Process*, Journal of Material Sciences, svez. 6, br. 4, pp. 210-217
- [21] Cviljušac, V. (2020). *Razvoj sustava rekonstrukcije tiskanih računalno generiranih holograma*, Doktorski rad, Grafički fakultet, Zagreb
- [22] <https://en.jptoec.com/category/mopa-fiber-lasers/> (23.07.2023.)

## 7. PRILOZI

### 7.1. POPIS SLIKA

Slika 1. *In-line* hologram, postupak (a) snimanja i (b) rekonstrukcije

Slika 2. *Off-axis* hologram, postupak (a) snimanja i (b) rekonstrukcije

Slika 3. Postupak snimanja holograma refleksije bijele svjetlosti

Slika 4. Prikaz valne fronte za ravne i sferne valove

Slika 5. Interferencija referentnog i objektnog vala – postupak snimanja

Slika 6. Interferencija valova

Slika 7. Rekonstrukcija izvorne valne fronte – difrakcija

Slika 8. Snimanje transmisijskog holograma

Slika 9. Snimanje refleksijskog holograma

Slika 10. Postupak izrade 3D modela abrazijskog holograma

Slika 11. Prikaz abrazijskog holograma ovisno o načinu proizvodnje, (a) lasersko graviranje i (b) tisak UV laka

Slika 12. Građa lasera, (a) CO<sub>2</sub> laser i (b) fiber laser

Slika 13. Embosirani hologrami (Izvor: <https://holographic.website/>)

Slika 14. Postupak embosiranja – utiskivanje

Slika 15. MOPA fiber laser i računalo sa softverom za upravljanje laserom

Slika 16. Prikaz korisničkog sučelja Ezcad 2.14.11

Slika 17. Polikarbonat prije graviranja

Slika 18. Leica EZ4 D Stereo mikroskop (Izvor: <https://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/stereo-microscopes/p/leica-ez4-d/>)

Slika 19. Prikaz (a) 3D modela kocke pod kutom od 45°, b) točkastog modela kocke i (c) končanog holograma jedne perspektive od 50 % propusnosti

Slika 20. Prikaz rezolucije i dimenzije holograma od 50 % propusnosti

Slika 21. Prikaz holograma mijenjanih prema postotku binarizacije koji su korišteni za kalibraciju

Slika 22. Prikaz (a) holograma s 50 % propusnosti svjetla i (b) FFT rekonstrukcija

Slika 23. Prikaz testnih uzoraka

Slika 24. Prikaz optičke rekonstrukcije holograma K1\_R1 s 50 %, (a) pomoću lasera i (b) bijele svjetlosti

Slika 25. Prikaz snimljenog klina K1\_R1

Slika 26. Hologrami s 5 % propusnosti svjetla

Slika 27. Prikaz binariziranih holograma klina K1\_R1

Slika 28. Prikaz holograma K1\_R1 s 50 % propusnosti svjetla koji na desnoj polovici ima masku „Threshold”

Slika 29. Prikaz histograma za hologram K1\_R1 s 50 % propusnosti svjetla

Slika 30. Digitalni prikaz konačnog dokumenta

Slika 31. Prikaz maskiranja holograma: (a1), (b1) CGH hologram, (a2), (b2) motivi za maskiranje i (a3), (b3) konačni zaštitni elementi

Slika 32. Primjer konačnog dokumenta

Slika 33. Rekonstrukcija konačnih holograma (kocke i teksta)

Slika 34. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K1\_R1

Slika 35. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K1\_R2

Slika 36. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K1\_R3

Slika 37. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K2\_R1

Slika 38. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K2\_R2

Slika 39. Grafički prikaz očekivane i dobivene linije za klin K2\_R3

## **7.2. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Parametri korištenog lasera

Tablica 2. Prikaz dobivenih postotaka propusnosti svjetla svih holograma

### **7.3. POPIS KRATICA**

CtF	Computer to Film
CGH	Computer Generated Hologram
DOVID	Diffraction Optically Variable Image Devices
RIP	Raster Image Processor
DPI	Dots Per Inch
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier
PRF	Pulse Repetition Frequency