

**Математичка гимназија Београд**

**Матурски рад из физике**

**КОМПЈУТЕРСКИ ГЕНЕРИСАНИ ХОЛОГРАМИ**

Ментор:

др Дејан Пантелић

Ученик:

Лука Рибар, IV-ц

Београд, јун 2011.

## САДРЖАЈ

	Страна
1. Увод .....	3
2. Теоријске основе	
2.1. Електромагнетна теорија светлости.....	4
2.2. Интеференција и дифракција .....	5
2.3. Класична холографија .....	6
3. Компјутерски генерисана холографија	
3.1. Основе .....	10
3.2. Фуријеова оптика .....	12
3.3. Бинарни компјутерски генерисани холограми.....	13
4. Закључак .....	16
Литература.....	17

## **1. УВОД**

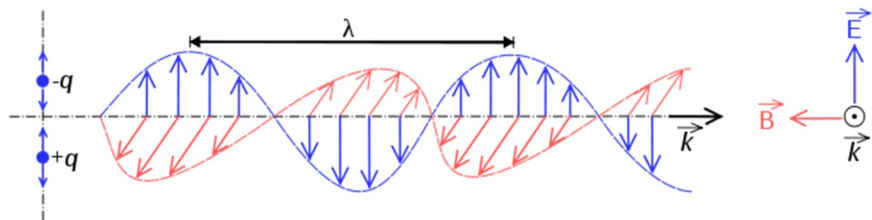
Холограми представљају интерферентне слике добијене од два светлосна таласа, које омогућавају реконструкцију једног од дата два светлосна таласа користећи други. Користећи се једначинама изведених из области електродинамике које описују појаву дифракције, могуће је израчунати такву интерферентну слику, тј. конструисати холограмску слику. Компјутерски генерисана холографија се односи на коришћење компјутерске технологије при конструисању холограма, углавном при извођењу рачуна за добијање компликоване холограмске слике. Компјутерски генерисани холограми (у литератури често називани скраћено CGH, од енг. *Computer Generated Holography*) су у потпуности дигиталне природе, па их је самим тим лако могуће умножити и обрадити као слике, ради симулирања ефекта правих оптичких уређаја, који се користе код класичне холографије. Исто тако, објекти који се записују холограмом на овај начин не морају да постоје физички, јер је математички приказ ових објеката једино што је потребно за конструисање холограма. Теоријска основа која стоји иза компјутерски генерисане холографије је доживела велики и убрзани развој услед напретка у пољу компјутерске технологије. Као резултат тога, постоји мноштво утврђених једначина и алгоритама коришћених за добијање компјутерски генерисаних холограма, при чему су неки основни принципи приказани у овом раду.

## 2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

### 2.1 Електромагнетна теорија светлости

Под појмом светлости или видљиве светлости, подразумевамо део електромагнетног зрачења који је видљив људским оком. Видљиву светлост карактеришу таласне дужине које се налазе у опсегу од око 380 nm до око 780 nm, самим тим и фреквенције у опсегу од око 405 THz до око 790 THz. Поред тога, у физици се под појмом светлости такође подразумевају и области инфра-црвеног (веће таласне дужине) и ултра-љубичастог (мање таласне дужине) зрачења, невидљиве људским оком.

Светлост, која се емитује и апсорбује у малим квантима енергије названим фотонима, поседује

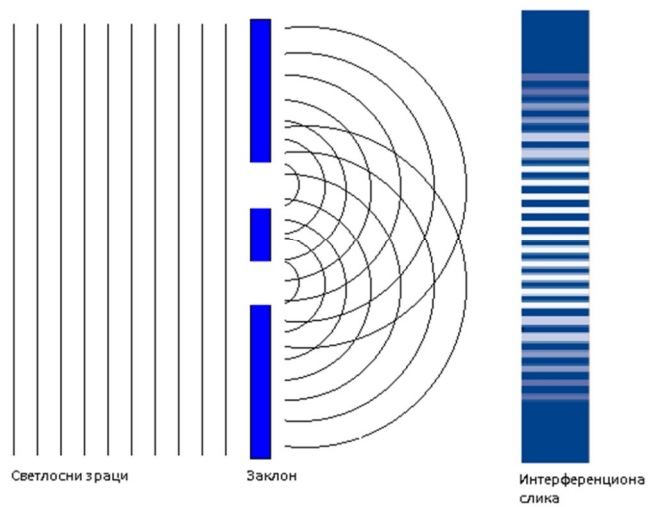


истовремено и честична и таласна својства. **Слика 1: Приказ равнo, линеарно поларизованог електромагнетног таласа**

Таласна природа распрострањања електромагнетног поља, а самим тим и светлости, директно произилази из Максвелове теорије електромагнетизма, дефинисане у његовом делу "Динамичка теорија електромагнетног поља" (у оригиналу *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*), које је објављено 1865. У својој теорији електромагнетизма Максвел је поставио четири једначине помоћу којих се приказују и израчунавају карактеристике електромагнетних поља, које су се показале од фундаменталне важности за целокупну област електромагнетизма. Максвел је на овај начин извео таласну једначину електромагнетних таласа, тиме откривши таласну природу електричног и магнетног поља, и њихову симетрију. Према Максвеловим једначинама, променљиво електрично поље утиче на магнетно поље да се мења током времена, при чему важи и супротно. Низ променљивих електричних и магнетних поља, међусобно спрегнутих, који се шире кроз простор тако што индукују једно друго, чине електромагнетни талас. Вектори магнетног и електричног поља су међусобно нормални и нормални на правац ширења таласа, па је због тога електромагнетни талас, по својим својствима, трансверзални талас (на слици 1 је приказан изглед простирања електромагнетног таласа, где се електрично поље налази у вертикалној равни, а магнетно у хоризонталној равни). Самим тим, светлост испољава неке типично таласне особине и појаве, као што су поларизација, интерференција и дифракција, при чему су ове појаве од велике важности за област изучавања холографије, па су детаљније описане у даљем тексту.

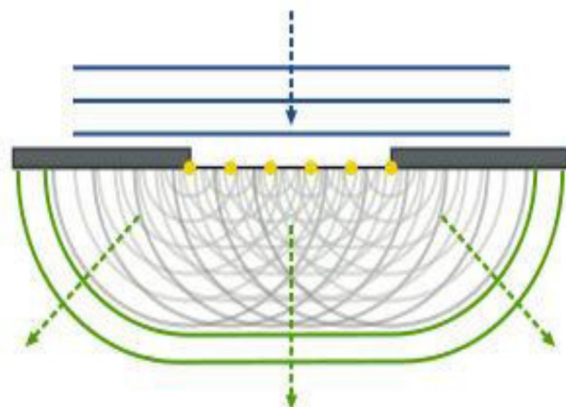
## 2.2 Интерференција и дифракција

Интерференција представља слагање два или више таласа при чему се као резултат тог слагања, они могу појачати или ослабити у зависности од њихове фазне разлике, фреквенције и амплитуде. Да би дошло до интерференције таласа морају бити испуњени одређени услови. Неопходно је да таласи који се слажу буду кохерентни, тј. да буду исте фреквенције, имају исте правце осциловања и константну фазну разлику. Уколико је фазна разлика таласа једнака целом умношку  $2\pi$ , долази до појачања, а уколико је фазна разлика једнака непарном умношку  $\pi$ , долази до слабљења. При интерференцији настаје тзв. интерференциона слика која се током времена не мења. Интерференција светлости се манифестује настајањем светлих и тамних зона, при чему светле зоне одговарају местима максималног појачања таласа, а тамне максималног слабљења (Слика 2).



Слика 2: Приказ интерференције таласа кроз два отвора

Дифракција је појава одступања светлосних таласа од праволинијског простирања при проласку кроз отворе или поред препрека које су сличних физичких димензија као и таласне дужине светлости. Угао под којим се светлост савија у односу на њен првобитан правац је инверзно пропорционалан величини препреке. Према Хајгенс-Френеловом принципу простирања таласа, свака тачка на таласном фронту се може посматрати као независни тачкасти извор новог таласа. На слици 3, приказана је дифракција светлости на једном отвору. Свака тачка у прорезу постаје нови извор светлости, па ће резултујући светлосни талас представљати интерференцију секундарних



Слика 3: Приказ дифракције на једном отвору

таласа који потичу од отвора.

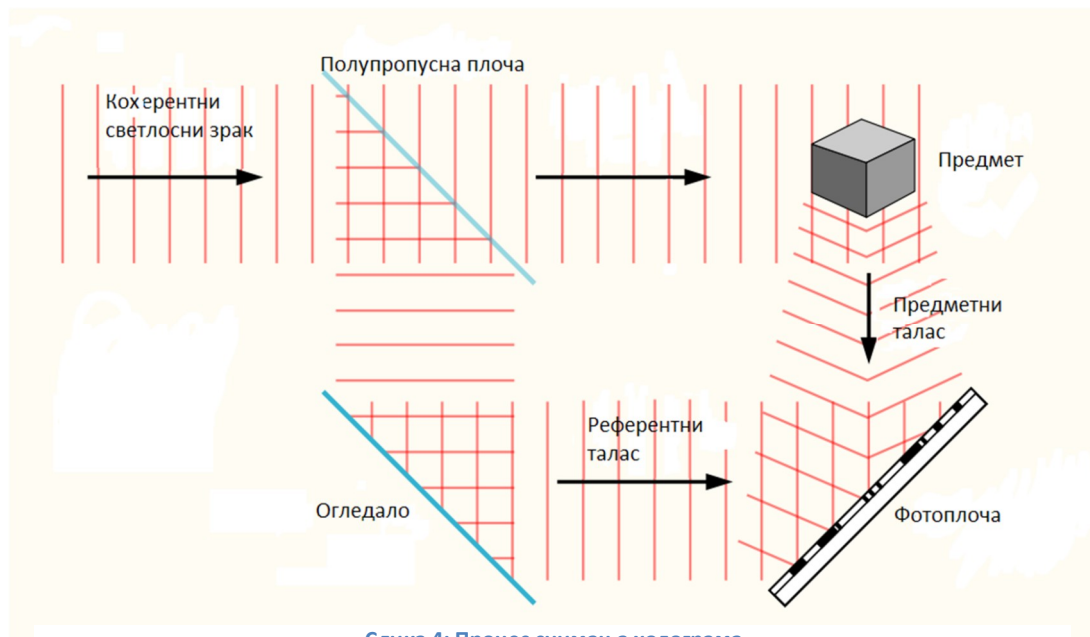
У оптици су од великог значаја дифракционе решетке, оптичке компоненте периодичне структуре које раздвајају и дифрактују светлост на неколико зракова који се крећу у различитим правцима. Правци ових зракова зависе од размака отвора на решетки као и таласне дужине светлости, самим тим омогућавајући и појаву дисперзије. Најчешћи пример дифракционе решетке јесте стаклена планпаралелна плоча са танким прорезима на једнаким интервалима. Када се светлост пропусти кроз дифракциону решетку, долази до појаве дифракције на сваком малом отвору, па коначна слика која се добија представља интерференцију бројних светлосних снопова који потичу од свих прореза на решетки.

### **2.3 Класична холографија**

Холографија се може објаснити као метода добијања тродимензионалног лика на фото-осетљивом материјалу коришћењем интерференције и дифракције светлости. Реч холограм потиче од грчке речи *holos*, што значи цео, у смислу потпуне информације о светлосном таласу која се чува на холограму. Прве холограме је успешно снимиио Денис Габор 1947, достигнуће за које је 1971. награђен Нобеловом наградом.

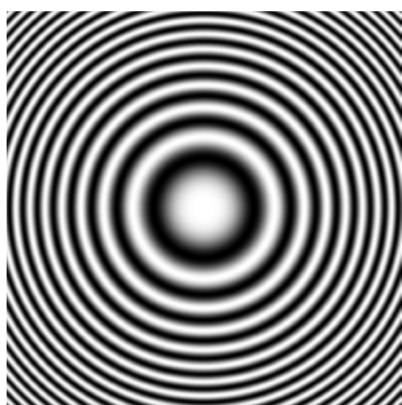
У процесу фотографије на фотоемулзији се бележи однос интензитета светлосних таласа рефлектованих са појединих делова сниманог објекта чиме се добија дводимензионални лик. За разлику од фотографије, у холографском процесу се на фотоемулзији записује и фазни однос тих таласа. Тај однос зависи од рељефа површине објекта што омогућава добијање просторног, тродимензионалног лика. Процес холографије се састоји из две етапе: снимања холограма и реконструкције холограма.

На слици 4 приказан је процес снимања холограма неког предмета коначних димензија. Кохерентни ласерски сноп се полупропусном плочом дели на два таласа од којих један пада директно на фотоплочу, а други се рефлектује од предмета и затим пада на фотоплочу. Рефлектовани талас настаје суперпозицијом великог броја сферних таласа који се рефлектују са различитих тачака предмета, а таласни фронт рефлектованог таласа зависи од облика рефлектујуће површине. С обзиром да садржи информацију о осветљеном предмету, овај талас се назива предметни, док се други талас назива референтни. На фотоплочу долази до интерференције референтног и предметног таласа, и та интерферентна слика се назива холограм.

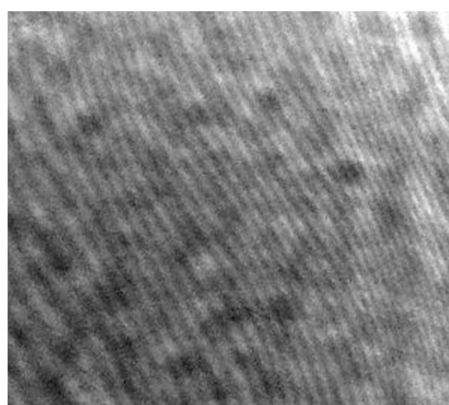


Слика 4: Процес снимања холограма

Приликом интерференције два кохерентна таласа на фотоплочи, при чему је један раван а други сферни, настаје тзв. зонска плоча која се састоји од система концентричних прстенова или делова прстенова различитих полупречника и дебљина (Слика 5). Дебљине прстенова и размаци између суседних прстенова су реда величине таласне дужине светлости, па на зонској плочи може доћи до дифракције. Холограм је састављен од много зонских плоча које се делимично преклапају и секу под различитим угловима, при чему је свака зонска плоча резултат интерференције референтног таласа и сферног таласа који потиче од једне тачке предмета (Слика 6). Самим тим, коначна холограмска слика се понаша као дифракциона решетка, што омогућава коначну реконструкцију слике.

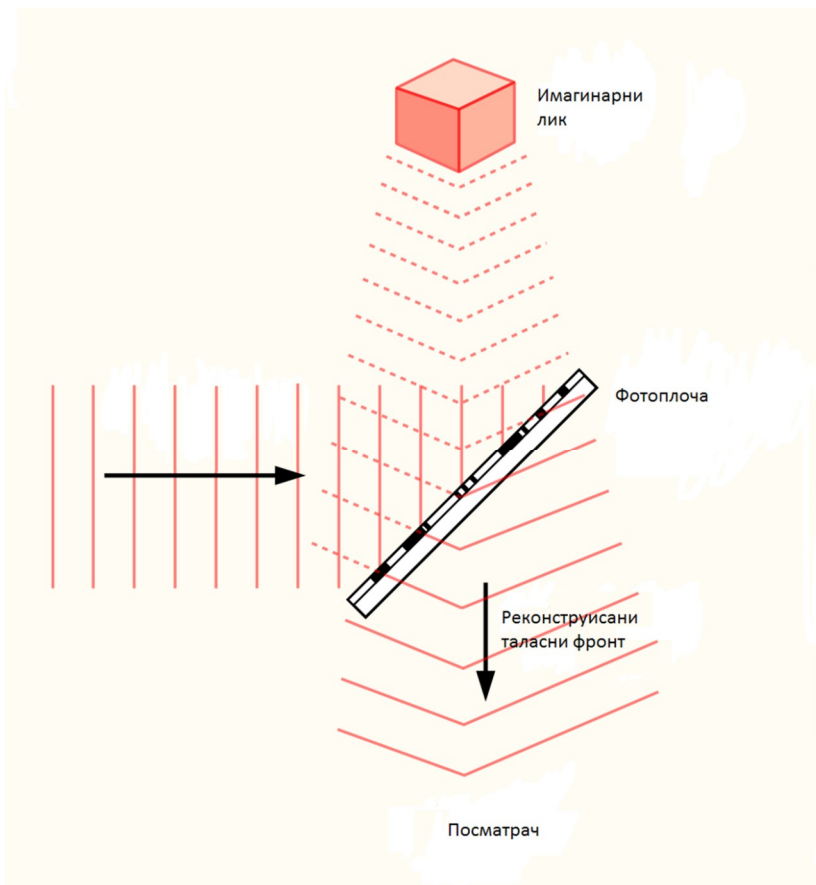


Слика 5: Синусоидна зонска плоча



Слика 6: Фотографија холограма

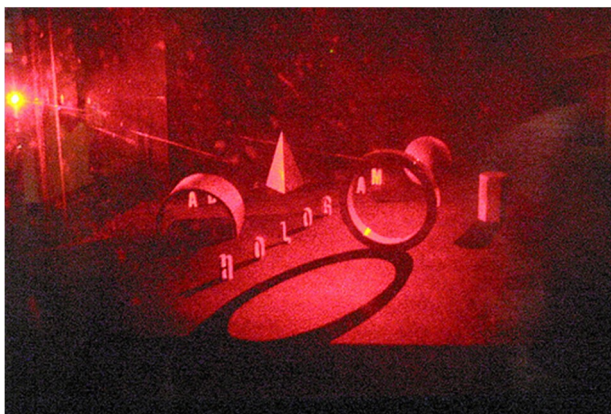
Друга фаза код процеса холографије, реконструкција холограма, је приказана на слици 7. Тада се на холограм усмери само раван талас, тако да пада под истим углом као што је падао референтни талас код процеса снимања. Дифракцијом тог таласа на холограмској слици добија се лик сваке тачке претходно снимљеног предмета на истом месту на којем се та тачка налазила при снимању.



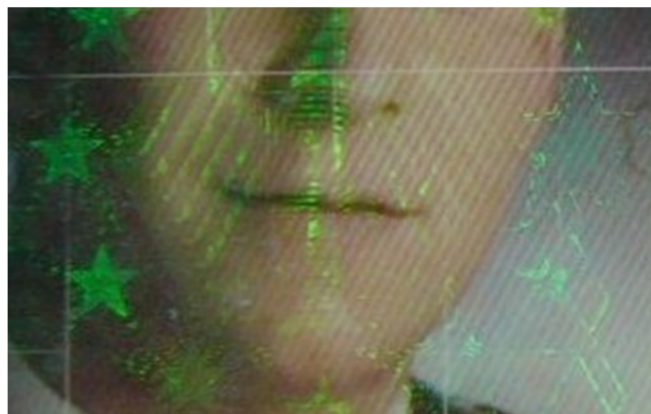
Слика 7: Процес реконструкције холограма



Током развоја холографије пронађене су многе примене од којих су неке набројане у даљем тексту. Вероватно најчешћа примена холографије јесте у циљу забаве, због њихове способности да прикажу слике које поседују дубину (Слика 8), али холографија се може искористити и у разне друге сврхе. Тренутно се доста улаже у потенцијално чување података у облику холограма. Предност оваквог приступа јесте у томе што би се за разлику од тренутно популарних видова чувања података, код холограма користила целокупна запремина снимљеног материјала, не само површина. Холограми се такође широко користе као сигурносне заштите као делови кредитних картица и новчаница, због тешкоће репродуковања холограма без оригиналног узорка (Слика 9). Холограмска интерферометрија омогућава упоређивање изузетно малих структура помоћу светлости дифрактоване са узорка. Овај начин мерења карактерише велика прецизност, при чему је могуће мерити величине мање од таласне дужине светлости.



Слика 8: Холограмска слика



Слика 9: Сигурносни холограм на личној карти

### **3. КОМПЈУТЕРСКИ ГЕНЕРИСАНА ХОЛОГРАФИЈА**

#### **3.1 Основе**

Уобичајене методе за добијање холограма захтевају високо специјализоване поставке и опрему. Материјал који се користи за снимање интерферентне слике мора бити осетљив на мале промене у интензитету светлости и мора да задржи ове информације након одговарајуће обраде, чији је резултат коначни холограм. Једноставан материјал који би могао да се користи у ове сврхе јесте фотографски филм од сребро-халогенида, који се затим обрађује након снимања. Ради бољих и прецизнијих резултата, потребно је да се користе посебне холографске плоче. Оптичка поставка за добијање холограма мора бити одговарајуће изолована од околне светлости и покрета, јер и најмањи поремећај може довести до уништења интерферентне слике. Због тога, снимање мора да се врши у потпуно мрачној соби, осим у случају када је материјал на који се снима холограм осетљив само на одређени спектар светлости. Неопходно је такође да поставка буде у потпуности стабилна и да се уређајем рукује са максималном пажњом да би се спречиле све могуће грешке при снимању. Због свега тога, компјутерски генерисана холографија може да има велики значај, јер се репликовањем целокупног процеса помоћу компјутера могу избећи многи проблеми са којима се научници суочавају код класичног начина снимања холограма.

Користећи се таласном теоријом светлости, код процеса добијања компјутерски генерисане холографије референтни и предметни талас се у потпуности представљају математички. Помоћу тако израчунатих таласних фронта, могуће је урадити суперпозицију ових таласа у свакој тачки простора да би се добила интерферентна слика неопходна за израду холограма. Компјутерски генерисана холографија не захтева присуство предмета за добијање холограма све док је могуће рефлектовану и дифрактовану светлост приказати математички. Такође, саме оптичке особине предмета везане за рефлексију и ширење светлости не представљају проблем при оваквој изради холограмске слике, пошто је могуће израчунати идеални предметни талас уколико је његова структура правилно описана.

Теоријски гледано, све потенцијалне примене холографије, попут чувања података и добијања слика у три димензије, се такође односе и на холограме добијене помоћу компјутера. Нажалост, оваква идеална ситуација јесте ограничена процесорском снагом која је доступна садашњим компјутерима. Генерисање компјутерски генерисаних холограма је изузетно процесорски захтевно за све осим за најпростије тродимензионалне објекте, упркос бројним апроксимацијама које се користе. Чак и

уколико је могуће израчунати одговарајућу холограмску слику, коначно добијени физички холограми и даље зависе од материјала на који се интерферентна слика записује. Због тога су квалитет холограмског медија и проблеми до којих може доћи при коришћењу различитих материјала битни и за процес добијања компјутерски генерисаних холограма.

Уз одговарајуће апроксимације, компјутерски генерисана холографија је у стању да без претераних тешкоћа прецизно понови резултате класичне холографије за предмете у једној равни. Израчунати холограми постоје као дигитални подаци којима је лако променити величину да би се реконструисали стварни холограми без икаквог губљења квалитета слике. Овакве дигиталне податке је такође могуће обрадити на разне начине у циљу симулирања ефекта различитих оптичких уређаја, попут сочива и филтера. Коначно, пошто је позната потпуна информација о предметно и референтном таласу, могуће је одредити информацију и о фази и о интензитету коначне интерферентне слике. Ово је у супротности са класичном холографијом где је могуће записати само интензитет или фазу коначне интерферентне слике. Знање о фази, које је доступно код компјутерски генерисане холографије, у теорији омогућава да се расподела и фазе и интензитета запише у холограм.

Зависно од методе која се користи за добијање компјутерски генерисаних холограма, овакав начин добијања холограмске слике може имати велики број потенцијалних примена. Просторно филтрирање је посебна примена Фуријеове оптике у циљу мењања структуре светлости. Користећи компјутерски генерисани холограм светлосног зрака или слике, могуће је одредити нежељена одступања или дејства поређењем са другим узорцима сличних структура, а затим је могуће та нежељена својства уклонити да би се добила жељена карактеристика светлости. Компјутерски генерисани холограми такође могу имати широку употребу као сигурносни холограми при идентификацији, јер је компликоване слике лако претворити у компјутерски генерисане холограме, који ће се касније уписати на мале области. Осветљавањем овако добијених слика одговарајућим ласерским снопом добија се слика која је потпуно непрепознатљива у односу на слику која је првобитно уписана, па је самим тим изузетно тешко дешифровати овакве холограме. Развој компјутерски генерисане холографије је од свог настанка био уско везан за развој компјутерске технологије, па је због убрзаног развоја ове области изванредан напредак у могућностима компјутерски генерисане холографије у будућности.

Током процеса развоја компјутерски генерисаних холограма, истовремено су се развијале различите методе рачунања интерферентне слике. Један од значајнијих пробоја у техници развијања компјутерски генерисаних холограма се десио радом Брауна и Ломана током друге половине шездесетих година 20. века, који су први представили начин за добијање холограмске слике без присуства реалног предмета. Њихово истраживање је

имало акценат на налажењу начина за представљање израчунатог таласног фронта на физичком холограму, као и последице коришћених апроксимација. Због велике важности њиховог приступа, овде ће детаљније бити приказане основе њиховог рада из 1967, чији се принципи користе и у већини каснијих радова из области компјутерски генерисане холографије.

### **3.2 Фуријеова оптика**

За рад Брауна и Ломана, као и уопште за област изучавања компјутерски генерисаних холограма, показала се од великог значаја Фуријеова оптика. Име је добила по француском математичару и физичару Јозефу Фуријеу, тј. конкретно по чувеној Фуријеовој трансформацији. Фуријеова оптика представља проучавање класичне оптике помоћу Фуријеових трансформација. Наиме, у таласној оптици је од изузетне важности тзв. Кирхофов интеграл, који се користи за одређивање простирања светлости у разним условима средине. Директно проилазећи из ове теорије, појаву дифракције је могуће прилично прецизно описати уз Кирхофову формулу за дифракцију, која упркос томе што користи разне апроксимације, адекватно описује многе проблеме у оптици услед чињенице да је таласна дужина светлости много мања од димензија препрека са којима се сусреће. Аналитичка решења нису могућа у већини случаја, али су Френелова, односно Фраунхоферова једначина за дифракцију, које су одговарајуће апроксимације Кирхофове формуле за блиско и далеко поље респективно, врло често коришћене у разним оптичким системима. Ова математичка упрошћења и прорачуни могу веома прецизно да опишу дешавања при проласку светлости кроз различите прорезе, сочива и огледала која су закривљена на разне начине, као и делимичну и потпуну рефлексију. Испоставља се да Фраунхоферова формула за далеко поље представља управо дводимензионалну Фуријеову трансформацију над сниманим објектом када је он представљен у равни, што омогућава упрошћен рачун при раду са холографским системима.

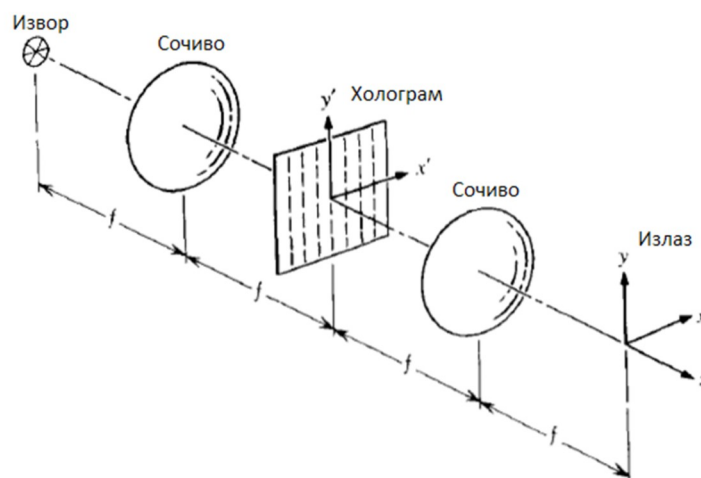
### 3.3 Бинарни компјутерски генерисани холограми

Процес добијања холограмске слике помоћу компјутера се генерално може поделити на четири основна дела. Прво је потребно израчунати простирање светлосног таласа, израженог у комплексном облику, од објекта до холограмске равни. Због ограничености процесорске моћи компјутера, могуће је израчунати комплексну амплитуду само на ограниченом броју тачака, што се ипак испоставља као задовољавајуће решење.

Други део овог процеса, који се такође заснива на употреби компјутера, јесте представљање добијене комплексне амплитуде на холограмској равни као реалне, позитивне функције према којој би се даље развио физички холограм коришћењем одговарајуће технике за штампање. Пример такве технике јесте симулирање интерферентних лукова и прстенова добијених интерференцијом референтног и предметног таласа код класичне холографије.

Последња фаза у процесу добијања компјутерски генерисаних холограма је штампање холограмске слике која је неопходна да буде одговарајуће величине да би омогућила појаву дифракције, потребну за реконструкцију слике. Због тога је коначну холограмску слику потребно, у оквиру последње фазе овог процеса, смањити на неопходну величину.

На слици 10 је приказана оквирна поставка апаратуре која је потребна за добијање Фуријеових холограма. Назив Фуријеов холограм је прилично често коришћен у радовима везаним за снимање холограма, и односи се на коришћење Фуријеове трансформације приликом рачунања простирања светлосних таласа, што је описано у поглављу 3.2. У поставци приказаној на слици 10 и чији је опис дат овде, коришћена је Фраунхоферова апроксимација за далеко поље, па су због тога уведена одговарајућа сочива која иначе нису неопходна за добијање холограмске слике. Њихова улога јесте да омогуће стварање слике на одговарајућем растојању, на којем је могуће користити претходно описане аналитичке апроксимације.

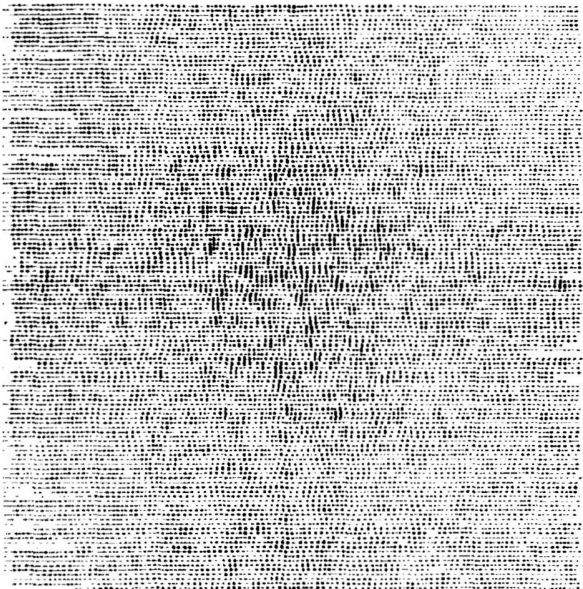


Слика 10: Изглед апаратуре за добијање Фуријеових холограма

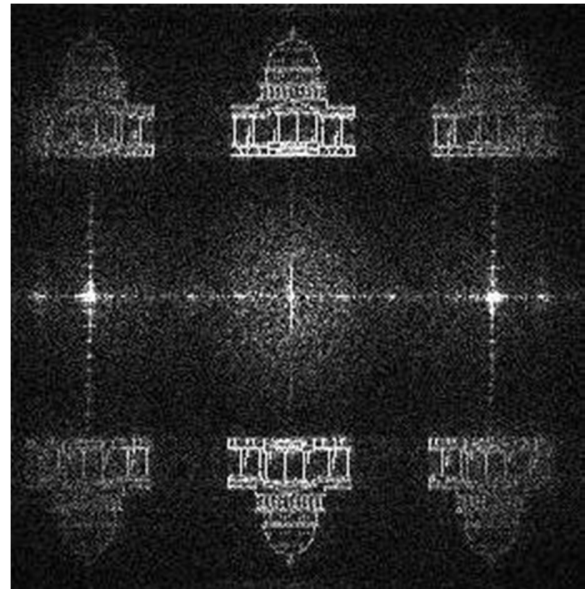
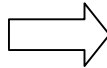
Један од најбитнијих делова истраживања које су радили Браун и Ломан јесте било проналажење ефикасног начина да се интерферентна слика пренесе на штампани холограм. У њиховом раду, холограми су формирани тако што је најпре пронађена дводимензионална Фуријеова трансформација слике, а затим су вредности трансформације приказане у масци која се састојала од провидних отвора на непровидном заклону. Пошто је самим тим пренос маске имао вредности нула и један, овако добијени холограми су названи бинарним. Целокупна површ је подељена на мноштво делова једнаких величина у облику матрице. У свакој ћелији ове матрице је било неопходно да се запише информација и о фази и амплитуди Фуријеове трансформације у тој тачки, па су уведена три начина представљања података који би задовољили овај захтев. У прва два, свака ћелија је садржала један отвор, чија је висина или ширина зависила од амплитуде трансформације у средини дате ћелије, а у трећем се свака ћелија састојала од два отвора чија је укупна ширина зависила од амплитуде трансформације. У сва три начина приказивања података, бочна позиција отвора у ћелији је била пропорционална фази трансформације у средини ћелије. Овакав начин представљања холограмске слике, на енглеском назван *detour phase*, се показао од изузетног значаја за даљи развој компјутерски генерисане холографије.

Коришћењем Фуријеових холограма добијених на овај начин није могуће реконструисати тродимензионалне објекте. Самим тим, приликом коришћења ове методе користе се дводимензионалне слике, дате у бинарном облику, тј. слике састављене само од црне и беле боје, без различитих нијанси између. Постоје одређене предности коришћења бинарних слика у односу на коришћење слика са континуалним спектром, што је детаљније описано у самом раду Брауна и Ломана. Као прво, познато је да је бинарне слике могуће врло лако и прецизно умањити и репродуковати, због чега је овај начин штампања веома чест и користи се у многим часописима и новинама. Квалитет бинарног холограма није осетљив на нелинеарне фотографске ефекте, па је самим тим мање контроле потребно при експозицији и развијању током процеса смањивања. Друга предност овакве врсте холограма над сивим холограмом јесте у томе што усмерава више светлости ка реконструисаној слици. Ова предност бинарних холограма је веома значајна у многим практичним ситуацијама.

На слици 11 је приказан изглед бинарне холограмске слике узете из рада Брауна и Ломана. У циљу једноставног приказа процеса реконструкције холограма, написан је кратак код у програмском језику Matlab. Над претходно споменутом холограмском сликом, која је представљена у облику матрице, најпре је извршена дводимензионална Фуријеова трансформација, чиме је добијена нова матрица комплексних бројева која заправо представља резултат Фраунхоферове дифракције. На овај начин је добијен таласни фронт у равни реконструкције чији се интензитет записује на фотоплочичи. Самим тим израчунат је модул сваког елемента добијене матрице комплексних бројева и симулирана реконструкција слике је приказана на слици 12.



Слика 11: Бинарна холограмска слика



Слика 12: Слика добијена помоћу бинарног холограма

#### **4. ЗАКЉУЧАК**

Од Габоровог првобитног истраживања из 1947. прошло је доста времена и у међувремену је холографија стекла велику популарност међу научницима, а термин холограм се проширио на разне примене у многим различитим областима. Увођење компјутерске технологије у област оптике и холографије донела је многе погодности, успут откривајући мноштво занимљивих и фасцинантних примена холограма о којима се претходно само наслућивало. Пратећи непредвидиви и често бурни развој компјутерске технологије, научна теорија иза компјутерски генерисаних холограма се такође развијала, савладавајући многа ограничења која су претходно била неизбежна. Самим тим истраживање и развијање холограма је и даље веома актуелна тема, а употреба холограма би, са даљим развојем технологије, потенцијално могла да буде знатно шира у будућности него што је то данас. Због тога је област холографије, и конкретно компјутерски генерисаних холограма, од великог интереса и значаја дан-данас и иако је увек ризично предвиђати будућност, врло је вероватно да ће се заинтересованост научника за ову област наставити и у годинама које следе.



## **ЛИТЕРАТУРА**

B. R. Brown, A. W. Lohmann, *Computer Generated Binary Holograms*, IBM J. Res. Develop, март 1969.

B. J. Jackin, P. K. Palanisamy, *A Completely Open Source Based Computing System For Computer Generation Of Fourier Holograms*, Computer Physics Communications, април 2009.

G. Tricoles, *Computer Generated Holograms: An Historical Review*, Applied Optics Vol. 26, No. 20, октобар 1987.

Н. Чалуковић, В. Рапаић, *Физика 3*, Круг Београд, 2008.

Н. Чалуковић, *Физика 4*, Круг Београд, 2008.

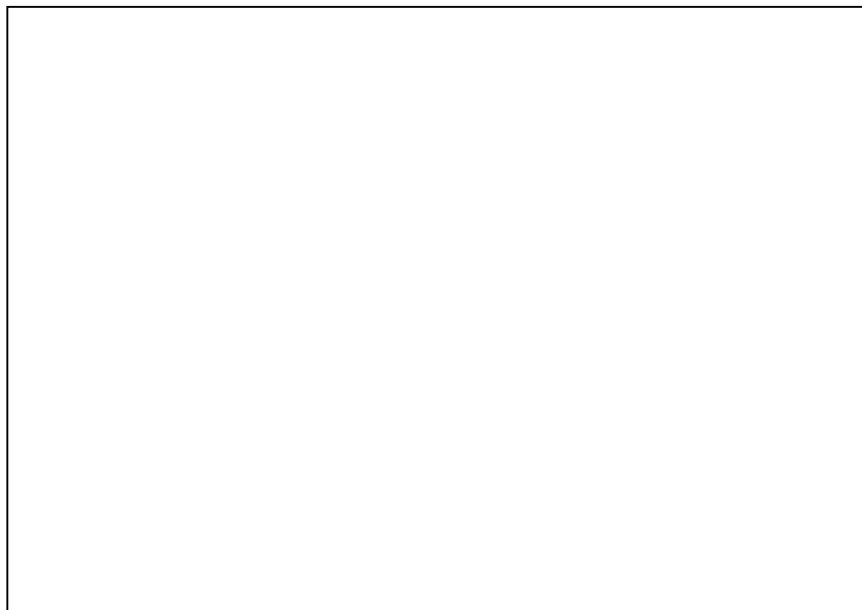
<http://en.wikipedia.org>, (<http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>), мај 2011.

<http://en.wikipedia.org>, ([http://en.wikipedia.org/wiki/Computer\\_generated\\_holography](http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_generated_holography)), мај 2011.

ДАТУМ ПРЕДАЈЕ РАДА : \_\_\_\_\_

Датум одбране рада : \_\_\_\_\_

Коментар :



Оцена : \_\_\_\_\_