

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО ОПТИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ И ТЕХНОЛОГИИ

„ Акад. Й. Малиновски ”

**Многоцветен холографски запис и
холографски оптични елементи**

АВТОРЕФЕРАТ

на

Бранимир Людмилов Иванов

За присъждане на научно-образователната степен

„ ДОКТОР ”

по научна специалност 4.1.

„ ФИЗИЧЕСКИ НАУКИ ”

с код 01.03.22

„ ФИЗИКА НА ВЪЛНОВИТЕ ПРОЦЕСИ ”

Научни ръководители

проф. д.ф.н. Елена Стойкова

проф. д.ф.н. Венцеслав Съйнов

София

2012



АВТОРЕФЕРАТ

на

Бранимир Людмилов Иванов

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО ОПТИЧЕСКИ МАТЕРИАЛИ И ТЕХНОЛОГИИ

„ Акад. Й. Малиновски ”

**Многоцветен холографски запис и
холографски оптични елементи**

АВТОРЕФЕРАТ

на

Бранимир Людмилов Иванов

За присъждане на научно-образователната степен

„ ДОКТОР ”

по научна специалност 4.1.

„ ФИЗИЧЕСКИ НАУКИ ”

с код 01.03.22

„ ФИЗИКА НА ВЪЛНОВИТЕ ПРОЦЕСИ ”

Научни ръководители

проф. д.ф.н. Елена Стойкова

проф. д.ф.н. Венцеслав Съйнов

София

2012



Дисертационният труд е написан на 135 печатни страници и съдържа 73 фигури, и 8 таблици. В текста на дисертацията са цитирани 131 литературни източника.

Дисертационният труд е обсъден на редовно разширено заседание на колоквиума на ИОМТ-БАН на 14.12.2012 г., на което е взето решение за откриване на процедура за защита на дисертационния труд.

Защитата на дисертационния труд ще се проведе на02.2013 г. от часа в залата на ИОМТ-БАН. Научното жури заседава в състав:

1. проф. д.ф.н. проф. д.т.н. Марин Ненчев – ИЕ-БАН, ТУ-София
2. проф. д.ф.н. Венцеслав Съинов – ИОМТ-БАН
3. проф. д.ф.н. Иван Николов – ФзФ-СУ
4. доц. д-р Иван Ламбрев – ФзФ-СУ
5. доц. д-р Цветанка Бабева – ИОМТ-БАН

Материалите по защитата са на разположение на интересувалите се в библиотеката на ИОМТ-БАН с адрес: България, София, ул. „Акад. Георги Бончев”, блок 109.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарността е израз на уважение към хората, които са спомогнали за развитието на дадена идея и превръщането ѝ в реалност. Има много хора, на които съм благодарен, които обичам и уважавам, които са ме подкрепяли (и продължават да го правят) през годините .

На първо място бих искал да благодаря на моите ръководители на дисертационния ми труд проф. д.ф.н. Елена Стойкова и проф. д.ф.н. Венцеслав Съйнов .

Изрично искам да изкажа благодарности на директора на ИОМТ-БАН проф. д.х.н. Никола Малиновски и на председателя на научния съвет на ИОМТ-БАН проф.д-р Снежана Китова .

Благодарности към личен състав на ИОМТ-БАН Илияна Коемджиева за оказаното административно съдействие в критични моменти .

Искам специално да благодаря на моите колеги доц. д-р Димана Назърова, доц. д-р Лиан Неделчев, асист. Мариана Шопова, асист. Таня Любенова и асист. Наталия Берберова .

Специални сърдечни благодарности на съпругата ми, на майка ми, баща ми, брат ми, сестра ми и всички членове на семейството ми, а също и на Елена Стойкова, за постоянната и безрезервна подкрепа .

1. Въведение

Актуалност и цели на дисертационния труд

Денис Габор [1], носител на Нобелова награда по физика за 1971, открива холографския метод през 1948 в опитите си да подобри разделителната способност на електронните микроскопи. Последвалото разработване на кохерентни светлинни източници, десет години по-късно, разкрива уникалния потенциал на холографската техника в много области като триизмерното (3D) визуализиране на обекти [2], оптичната метрология [3], медицината и биологията [4], търговията, развлекателната индустрия и т. н.

Холографията може да се опише като процес от две стъпки, позволяващи запис и възстановяване на вълновото поле, дифрактирало от 3D обекти. Записът представлява кодиране на полето от обекта като холограма, даваща 2D разпределение на интензитета на интерференцията на това поле с взаимно кохерентна опорна вълна [5, 6, 7]. Разработените подходи на базата на холографския принцип дават тласък на развитието на важни направления в интерферометрията, дифракционната оптика, записа на оптична информация, паралелната обработка на информация [2, 8, 9, 10].

Бързият напредък в цифровите мегапикселови оптични сензори (CCD или CMOS сензори) и компютрите през последните двадесет години води до възникването на цифровата холография като мощно средство в оптичната метрология с директен достъп до комплексната амплитуда на дифрактиралото поле и отпадане на необходимостта за химична обработка на холограмата [11]. През последните години, изследователският интерес се ориентира към разработването на 3D и 4D холографски дисплеи, на базата на компютърно генерирани или цифрово записани холограми [12]. Поради огромното количество от данни за числена обработка, оптично възстановените компютърно генерирани холограми са с малки размери и незадоволителни цветови характеристики.

Основно средство за качествено 3D визуализиране продължава да бъде изобразителната холография с аналогов запис, при който информацията се кодира върху светлочувствителен материал. Популярен подход за 3D визуализиране е холографският цветен печат на стереограми с пълен паралакс и висока разделителна способност като техника за запис на големи 3D обекти и сцени, които се възстановяват при осветяване с бяла светлина [13, 14]. Цветната аналогова холография [15, 16, 17] като дял от изобразителната холография е без съмнение най-добрата техника за 3D визуализиране, тъй като възстановените от цветните холограми образи практически не се различават от оригиналните обекти [18, 19]. Предпочитан светлочувствителен материал за холографски печат и цветна холография са сребърно-халогенидните (CX) емулсии. Разработването на високо чувствителна ($0.1 \text{ mJ} \times \text{cm}^{-2}$) панхроматична CX емулсия като комерсиален продукт би намерило много сфери на приложение като изработване на защитни холограми, опазване и популяризиране на културното наследство, модерно изкуство, холографски печат, образование, рекламно дело, триизмерни дисплеи.

Отделно направление в холографията е изработването на холографски оптични елементи [20] с предварително зададени спектрални характеристики, които позволяват създаването на преносими стабилни измервателни системи в оптичната метрология. Разнообразието от приложения изисква работа с разнообразни светлочувствителни материали. Желаните параметри са избрана дължина на вълната при възстановяване и

много слабо разсейване в материала, поради което за тяхното разработване най-често се използва бихромиран желатин.

През последните години на базата на дългогодишни изследвания за разработване и усъвършенстване на монохромна дребнозърнеста и свръхдребнозърнеста СХ емулсия в ИОМТ-БАН (преди 2010 ЦЛОЗОИ-БАН) бе разработена панхроматична свръхдребнозърнеста СХ емулсия НР-Р, която прави възможен цветен запис на холограми.

Настоящата дисертация има за цел изучаването на холографските параметри на тази емулсия и осъществяване и характеризирание на холографски запис върху тази емулсия. По-конкретно, поставените в дисертацията задачи могат да се формулират както следва:

1. Да се изследват експозиционните характеристики на панхроматичната емулсия НР-Р при различни режими на запис, за записи с една и повече дължини на вълните.
2. Да се изследват дифракционните ефективности при единичен и едновременен запис за конструиране на сандвична холограма.
3. Да се разработи система за цветен холографски запис, позволяваща последователен или едновременен запис с повече от един лазерни източник.
4. Да се изследват цветовите корекции на холографския запис посредством химична обработка при последователен или едновременен запис с повече от една дължина на вълната.
5. Да се изследват цветовите корекции при възстановяване на холографското изображение чрез избор на подходящ източник на осветяване.
6. Да се разработят холографски оптични елементи за използване в оптичната метрология в близката инфрачервена спектрална област.

Глава 2: Холографски запис върху свръхдребнозърнеста сребърно-халогенидна емулсия

Сребърните халогениди са все още най-подходящите светлочувствителни материали за записване на цветни (RGB) отражателни холограми. Това основно се дължи на съвкупността от добри параметри на тези материали като високата им чувствителност, която позволява използването на диодни и диодно напompвани твърдотелни лазери от последно поколение с ниско потребление на енергия, високата дифракционна ефективност, голямото отношение сигнал-шум и стабилност на параметрите след изготвяне на емулсията.

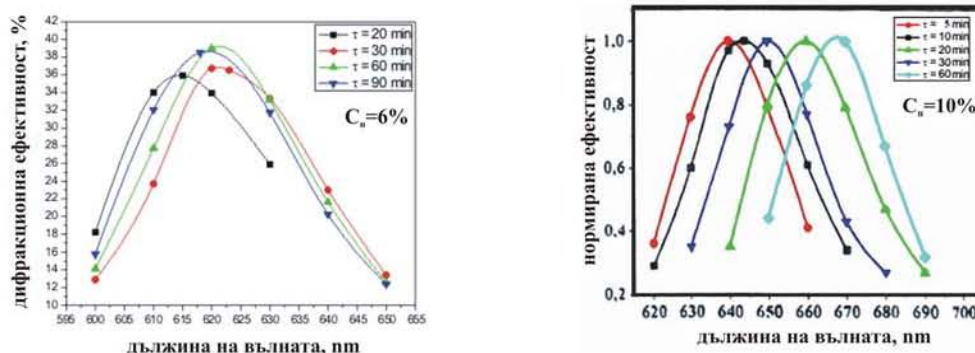
2.1 Синтез и химична обработка на панхроматичната емулсия НР-Р

Приготвянето на българските свръхдребнозърнести монохромна и панхроматична сребърно халогенидни (СХ) емулсии НР-480, НР-650 и НР-Р се основава на метод, който е добре познат от времето на Липман, и се нарича „double-jet” метод или метод с „двойна струя”. Забележителното при него е, че не се използва „замразяване и размразяване”. Средният размер на СХ зърна в панхроматичната емулсия НР-Р е 10 nm и тя е с подобрена хомогенност. Размер на зърната под 10 nm осигурява високи разделителна способност и отношение сигнал-шум (повече от 100:1), което е особено важно за късите дължини на вълните в синята спектрална област. Технологично погледнато, производството на подобни материали е доста сложна задача поради

термодинамичната нестабилност на зърната и на процеса на фотосенсибилизиране. Термодинамичната нестабилност на зърната води до тяхното нарастване и влошаване на холографските характеристики като чувствителност, дифракционна ефективност и отношение сигнал-шум. Стабилността на емулсията във времето силно корелира с нейната монодисперсност. Друг фактор, който съществено влияе върху времето на живот на СХ холографски материали, е стабилността във времето на използваните фотосенсибилизатори за запис в червената и зелената спектрални области. За запис в синята спектрална област (дължини на вълните под 450 nm) се разчита на естествената чувствителност на СХ материалите. Дебелината на емулсионния слой върху подложката е около 8 μm .

Химичната обработка на записаните плаки е двуетапна с цел създаване на холограми само с фазова модулация, характеризиращи се с висока дифракционна ефективност. Първият етап включва амплитудно проявяване със SM-6 проявител със следния състав: аскорбинова киселина – 18 g, натриев хидроксид - 12 g, фенидон - 6 g, натриев дихидрогенфосфат - 28,4 g, вода - 1,0 литър. Резултантната модулация на интерференчните ивици в този случай дава силно поглъщане на сребърните зърна. За да се превърне амплитудния запис във фазов, вторият етап на обработката включва избелване на обработените холограми със „Slavich” PBU-амидолов избелител със следния състав: калиев персулфат – 10.0 g, лимонена киселина – 50.0 g, меден бромид – 1.0 g, калиев бромид – 20.0 g, амидол – 1.0 g, вода - до 1.0 литър.

За да се компенсира свиването на слоевете след химическата обработка, както и да се гарантира възпроизвеждането на Бреговска отразителна холограма на дължината на вълната на записа, се прилага подходящо раздуване преди изсушаване на записаните холограми в баня от воден разтвор на колаген хидролизат с определена концентрация (Сн) за време $t = 5\text{--}60\text{ min}$ при температура от 20 °C (същата температура като за проявяване, избелване и изплакване на плаките). За да се установи времевата зависимост на процеса на раздуване е направен експеримент, при който е осъществен запис върху емулсия НР-Р на дължината на вълната 632.8 nm на огледален обект. След проявяване и изсушаване на холограмата, холографската плака се разрязва на пет еднакви части, които се подлагат на различно по време раздуване с една и съща концентрация на раздуващия агент. Резултатите за различни концентрации на раздуващия агент са показани на **Фиг.2.1**, представяща спектралната зависимост на нормираната дифракционна ефективност с параметър времето на раздуване. Увеличаването на времето на раздуване води до преместване на дифракционния максимум към по-големи дължини на вълните. Отместването за 1 час е не повече от 35 nm. По-продължителен престой на холограмата в раздуващата вана не се препоръчва.



Фиг.2.1 Дифракционна ефективност на холограма след раздуване във воден разтвор на колаген хидролизат (Сн), за престой от различни времена в раздуващия разтвор

2.2 Експозиционни характеристики на панхроматичната емулсия HP-P

Задачата, която си поставихме в настоящата дисертация, бе получаването на експозиционните характеристики на разработената панхроматична емулсия HP-P. Тези характеристики бяха проучени чрез запис на отражателни холограми, осъществен с два успоредни лазерни снопа на различни дължини на вълните - 442 nm (He-Cd лазер), 532 nm (диодно напompван твърдотелен лазер) и 632.8 nm (He-Ne лазер) в непрекъснат режим на генерация на лазерите (CW). За целта малки проби от HP-P плаки с размер 2×7 cm бяха осветени с колимиран сноп, преминаващ през сив оптичен клин с плавно променящо се по дължината на клина поглъщане. Относителното поглъщане на клина по дължината му е измерено като отношение на преминалата към падащата мощност на светлинното лъчение с помощта на „ThorLabs 1500” измерител на мощност. Схемата за холографски запис с променлива експозиция през оптичен клин е дадена на **Фиг. 2.2**. Осветяващият сноп обикновено пада нормално върху оптичния клин. Предметният сноп интерферира с опорния, който се отразява от плоско паралелно огледало, поставено успоредно на оптичния клин и наклонено под ъгъл от 18° по отношение на нормалата на падащия светлинен сноп. Равнината на огледалото е под същия ъгъл $\alpha = 18^\circ$ спрямо холографската плака, докато ръбът на огледалото е успореден на ръба на сивия клин **Фиг. 2.2**.

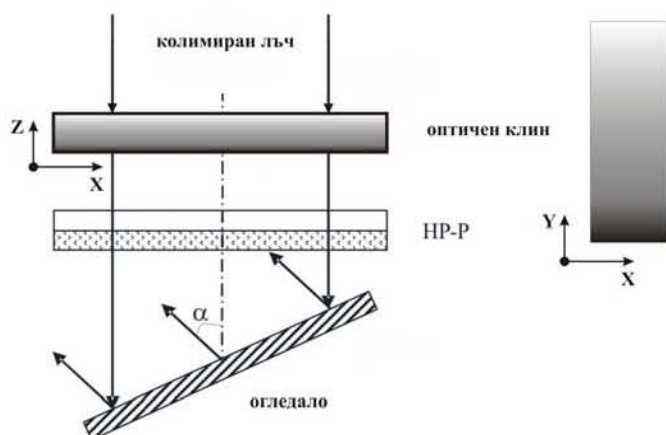
В дисертацията определянето на дифракционната ефективност е направено чрез директно измерване на лъчистия поток на дифрактиралата светлина на дължината на вълната на записа, както и чрез измерване на спектъра на пропускане на холограмите с помощта на спектрофотометър.

Директното измерване на лъчистия поток включва следните стъпки:

- запис на тестова холограма, чийто холографски обект представлява образ на плавно променящ се сив оптичен клин, комбиниран със „100 %” отразяващо огледало;
- раздуване на тестовата холограма до дължината на вълната на запис;
- директно измерване с измерител на мощност на интензитетите на падащото върху холограмата лазерно лъчение и дифрактиралото в „-1” дифракционен порядък лъчение.

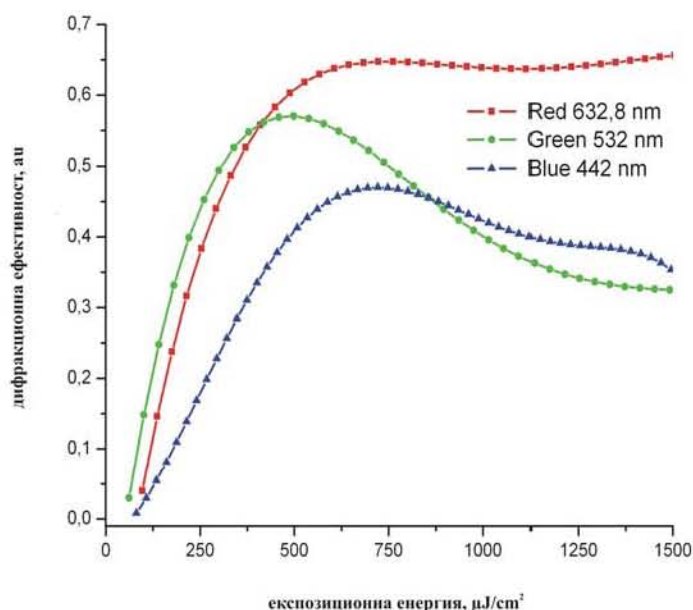
Измерването на спектъра на пропускане включва:

- запис на тестова холограма, чийто холографски обект представлява образ на „100 %” отразяващо огледало;
- раздуване на тестовата холограма до дължината на вълната на запис (в някои от измерванията тази стъпка се пропуска);
- директно измерване със спектрофотометър на спектралното разпределение на интензитетите на падащото върху холограмата светлинно лъчение, пропуснатото през холограмата светлинно лъчение и отразеното от холограмата светлинно лъчение.



Фиг. 2.2 Схема за холографски запис с променлива експозиция през оптичен клин, където: „колимиран лъч” – колимиран лазерен сноп, осветяващ оптичната схема за запис, „оптичен клин” – плавно променящ се в едно линейно направление сив оптичен клин, HP-P – холографска плака, „огледало” – „100 %” отразяващо огледало, α – ъгъл на наклон на огледалото спрямо равнината на холографската плака

Резултатите от директното измерване на лъчистия поток са показани на **Фиг. 2.3**. Експозиционни характеристики на проби с размер 7x2 cm за трите използвани при записа дължини на вълните са измерени на дължините на вълните на записите им. Линейната част на експозиционната характеристика определя динамичния диапазон, който е 0.05-0.6 mJ/cm² за запис в синята (442 nm), 0.05-0.5 mJ/cm² за запис в зелената (532 nm) и 0.05-0.75 mJ/cm² за запис в червената (632,8 nm) спектрални области. Добре се виждат експозиционният обхват на HP-P и точките на експозиционно насищане. Ние виждаме, че можем да очакваме стойности за дифракционната ефективност над 40 % в синята, 50 % в зелената и 60 % в червената спектрални области за възпроизвеждане на образа с използваните за запис дължини на вълните. Динамичният диапазон на модулация на показателя на пречупване за всички избелени CX материали е ограничен и обикновено е по-малък от 0.08 за плаки BBVPan [10, 11] и по-малък от 0,05 за плаки HP-P. В случай на мултиплексиране на RGB холографски запис върху единична плака дифракционната ефективност на отделните холограми намалява с коефициент, зависещ от броя на записите именящ стойността си в зависимост от дължината на вълната на запис.



Фиг. 2.3 Експозиционни характеристики в синята, зелената и червената спектрални области, измерени за дължината на вълната на записа

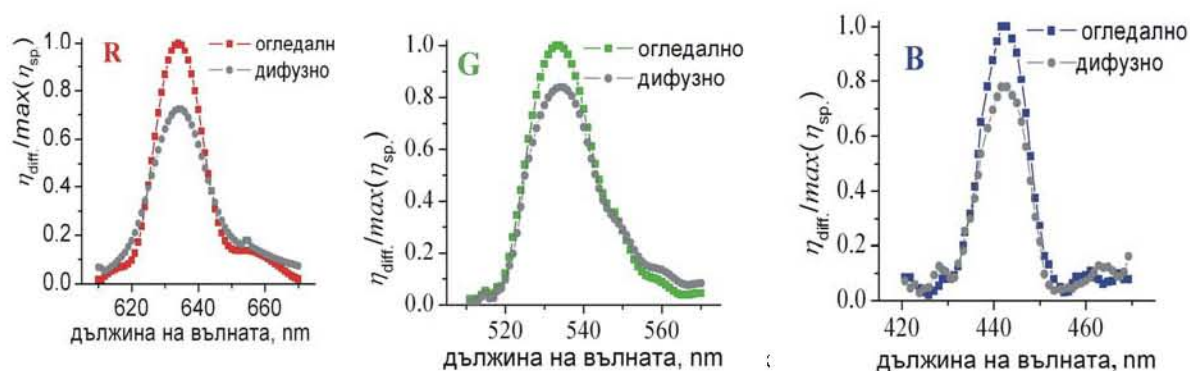
Като втора стъпка от задачата за експозиционните характеристики определихме спектралната зависимост на дифракционната ефективност при запис на огледален и дифузно отразяващ обект. Спектрите за тестови холограми на дифузно отразяващ

обект е съпоставени с тези за огледален обект на **Фиг. 2.4**, като спектрите са нормирани към максималната стойност на дифракционната ефективност при огледално отражение. Намаляването на ефективността при запис на дифузно разсейващи предмети е не повече от 20 % за всички от използваните дължини на вълните. Ширината на полу-височината на кривите, регистрирани при дифузно отражение, е на практика същата както при огледално отражение, което се дължи на високото ниво на отношението сигнал към шум при запис (над 100:1). Полученият резултат е особено важен за запис в синята област на спектъра.

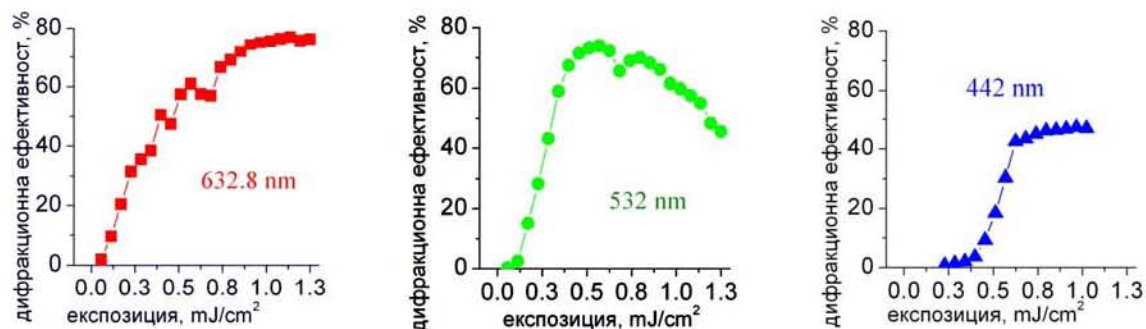
С помощта на оптичния клин бяха получени кривите на спектралната зависимост на дифракционната ефективност за нарастваща експозиция при единичен запис на дадена дължина на вълната и при последователен запис в синята и зелената спектрални области. Експозиционните характеристики за единичния запис на три дължини на вълните са дадени на **Фиг. 2.5**, като показаните стойности са намерени чрез интерполация на пресметнатите от експеримента дифракционни ефективности с цел получаване на линейна скала по енергии.

За тази серия от холографски плаки максималните стойности на дифракционните ефективности при единичен запис достигат почти 80 % при експозиция от 1 mJ/cm^2 за 632.8 nm , 75 % при 0.6 mJ/cm^2 за 532 nm и около 50 % при 0.75 mJ/cm^2 за 442 nm . Получените експозиционни характеристики за две тестови плаки, при които е разменен редът на записите в синята и зелената спектрални области, са показани на **Фиг. 2.6**. Дифракционната ефективност намалява с около 25 % в сравнение със стойностите при единичен запис, като експозиционните характеристики на практика не зависят от реда на записите. Беше направен и експеримент, при който записът с 442 nm бе заменен със запис с 473 nm , като резултатът не е така добър, както в случая с 442 nm .

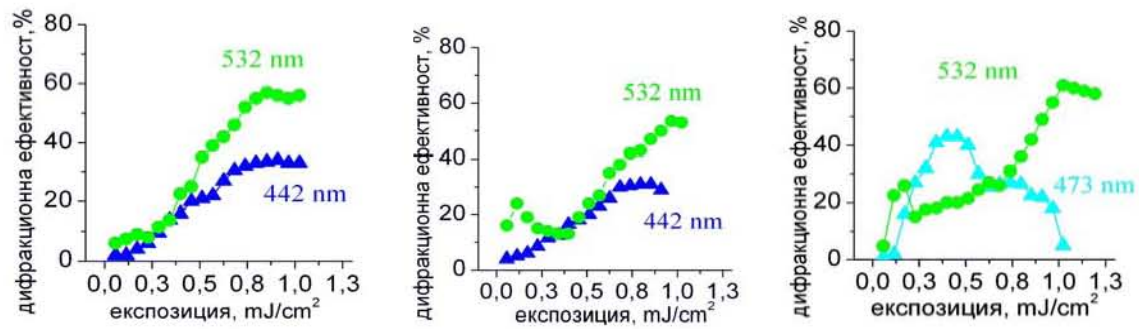
За да оценим дифракционната ефективност при смесване на цветовете, направихме последователни записи с три дължини на вълните - 442 nm , 532 nm и 632.8 nm , като геометрията на записа е подобна на тази от **Фиг. 2.7** с успоредни лазерни снопове. Ъгълът между двата интерфериращи снопа е 144° . Необходимите експозиции в синята (B), зелената (G) и червената (R) спектрални области са направени в три припокриващи се кръгли лазерни петна с диаметър 50 mm **Фиг. 2.7**. Разпределението на интензитета в рамките на всяко лазерно петно съответства на пресечено Гаусово разпределение. Така интензитетът по периферията е два пъти по-нисък отколкото в центъра. Експозициите в центъра на кръговете са 0.8 mJ/cm^2 (442 nm), 0.5 mJ/cm^2 (532 nm) и 0.5 mJ/cm^2 (632.8 nm). Спектрите на пропускане на различни места от плаката са измерени със спектрометър „Ocean Optics HR-4000” в точките, показани на **Фиг. 2.7**. Спектралните криви на дифракционната ефективност само за единичен запис, т.е. кривите за измерванията в точките A, B, C, D, E, F и G са показани на **Фиг. 2.8**, а тези за смесените записи в точките I, J, H - на **Фиг. 2.9**. Показаните резултати отговарят на проявена плака без раздуване.



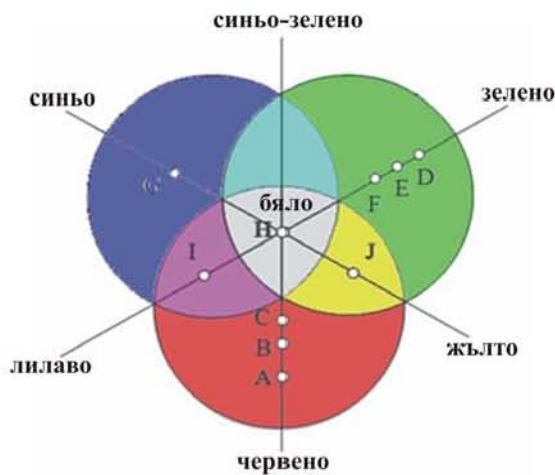
Фиг. 2.4 Отражателни холограми, на дифузен и огледален обекти заснети в успореден сноп на лъчите при еднокспозиционни записи в червената, зелената и синята спектрални области



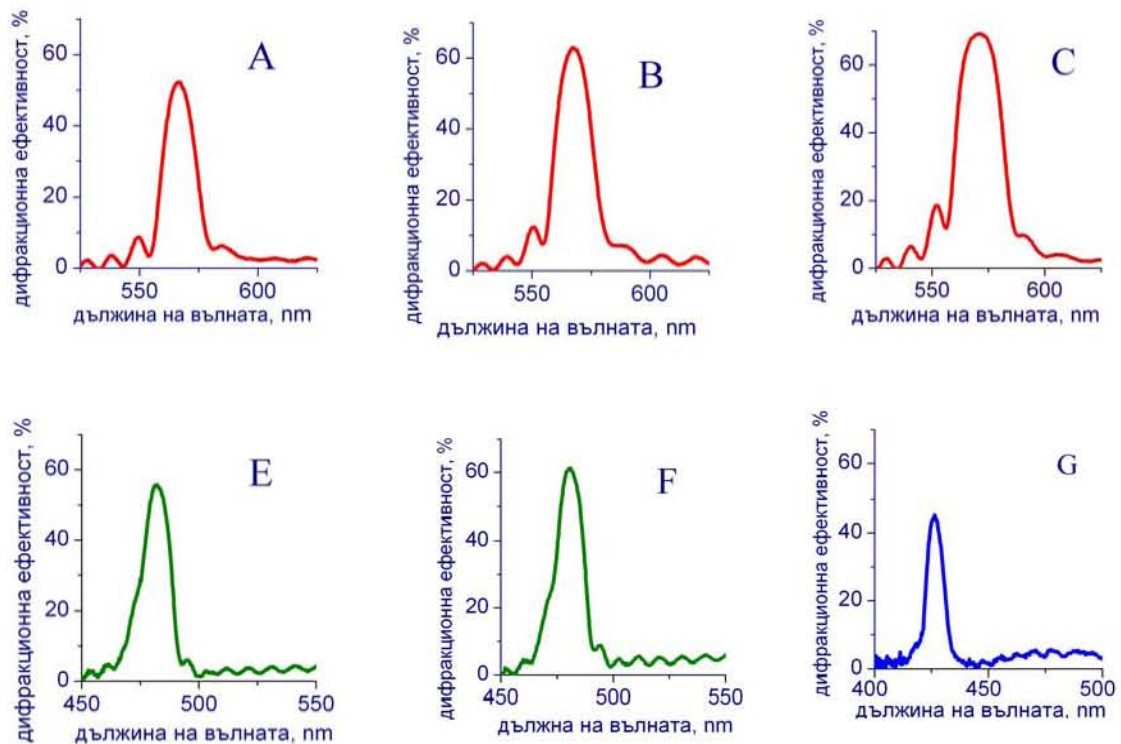
Фиг. 2.5 Експозиционни характеристики на панхроматичната сребърнохалогенидна емулсия HR-P при запис в червената, зелената и синята спектрални области



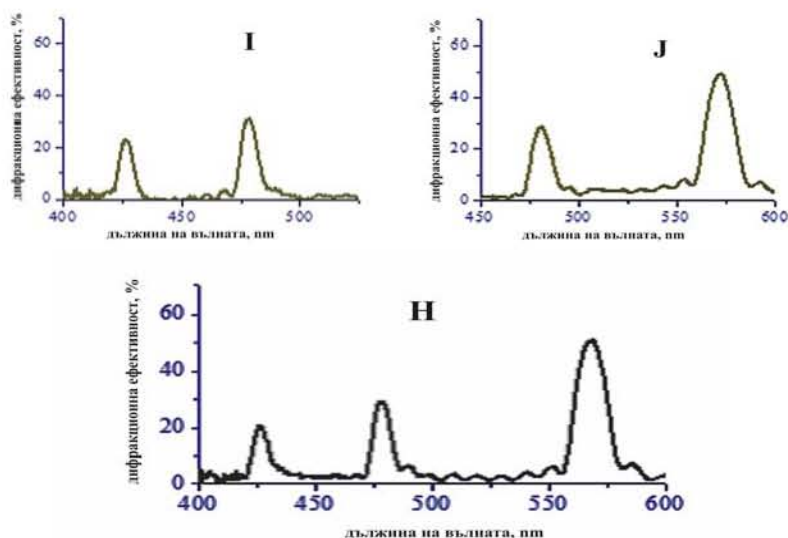
Фиг. 2.6 Експозиционни характеристики на панхроматичната емулсия НР-Р за двоен запис на отражателни в синята и зелената спектрални области



Фиг. 2.7 Геометрия на осветяване при холографски запис с 442 nm, 532 nm и 632,8 nm. Диаметърът на всяко лазерно петно е 50 mm. Индикационните точки от А до J показват местата на измерване на светлинния интензитет с преносим спектрометър „Osea Optics“ HR-4000



Фиг. 2.8 Спектрална зависимост на дифракционната ефективност, за цветна обемна отражателна холограма, измерена в точките А, В, С, Е, F, и G от Фиг. 2.7



Фиг. 2.9 Спектрална зависимост на дифракционната ефективност, измерена в точките I, J и H, показани на Фиг. 2.7

2.3 Холографски оптични елементи за интерферометрични приложения

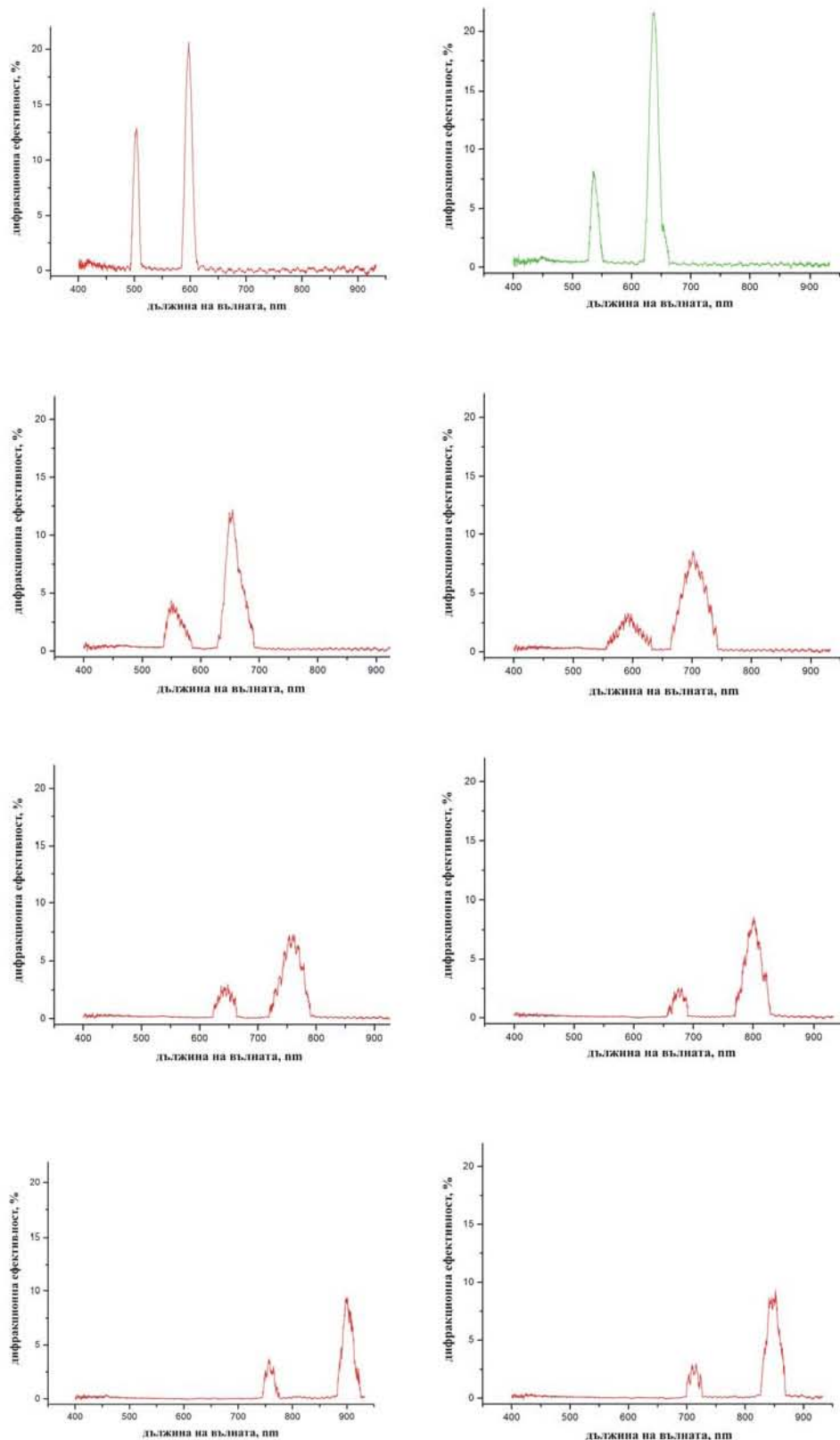
2.3.1 Двуканален ХОЕ

В дисертацията е разработен двуканален ХОЕ, който при интегриране в Майкелсонов интерферометър замества едно от рамената му и генерира две опорни равнини. Опорните равнини се възстановяват едновременно при осветяване с лазери на 650 nm и 750 nm. За целите на експеримента бяха изработени серия от ХОЕ във вид на отражателни обемни холограми с еднокспозиционен и двукспозиционен запис на следните обекти:

- 1) „100 %” отразяващо огледало;
- 2) огледална метална повърхност (отражателна способност под 80 % и слаба поляризация при отражение);
- 3) дифузно отразяваща метална пластина (напълно деполяризиране на отразената светлина).

Холограмите са записвани върху HP-P плаки. Експериментите бяха проведени с дължини на вълните 532 nm и 632.8 nm, за да се запази първоначалното по задание отстояние от 100 nm между работните дължини на вълните за ХОЕ.

Спектърът на пропускане на еднокспозиционен ХОЕ, е измерен със спектрофотометър „Ocean Optics” RH-4000. Записът на елемента е направен с лазер, генериращ на 632.8 nm, като дифракционният пик е отместен в близката ИЧ област чрез химична обработка след проявяване на холограмата. Дифракционната ефективност на елемента остава висока дори при отместване на дифракционния пик с около 100 nm. При двукспозиционния запис експозициите са последователни, като няма съществена разлика коя дължина на вълната е първа при записа. Двете експозиции са подбрани така, че двата пика в спектъра на дифракционната ефективност при възстановяване да бъдат със съизмерими интензитети. Това се постига при завишаване с около 20 % на експозицията на първия запис спрямо експозицията на втория запис. За да се постигнат работните дължини на вълните на ХОЕ каквито са по задание, е направена допълнителна химична обработка на проявените холограми. Резултатите от тази обработка за двуканалния ХОЕ са показани на **Фиг. 2.10**, която представя отместването на пиковите в спектъра на дифракционната ефективност в зависимост от водното съдържание в емулсионния слой. От резултатите могат да се направят следните изводи:



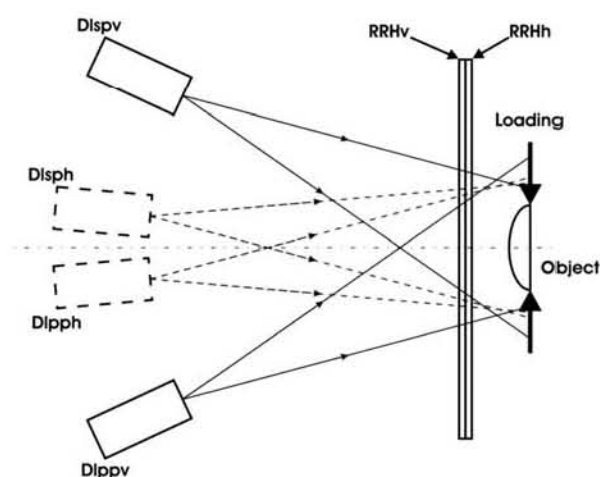
Фиг. 2.10 Промяна в спектралното позициониране на максималната дифракционна ефективност за двукспозиционен запис с дължини на вълните при запис 632.8 nm и 532 nm

- 1) осъществен е запис на двуканален ХОЕ във видимата спектрална област при зададено отстояние на дължините на вълните на дифракционните пикове;
- 2) работните дължини на вълните се преместват плавно със запазване на отстоянието между дължините на вълните;
- 3) при преместването дифракционните пикове се разширяват и максимумите им намаляват.

Независимо от намаляването на дифракционните ефективности за двете работни дължини на вълните на ХОЕ, той запазва свойството си да възстановява двата холографски образа, отместени спектрално един от друг на 100 nm. ХОЕ може да се използва успешно в близката ИЧ област. Експериментите показват, че е възможно успешно преместване на работните дължини на вълните в диапазон от 300 нанометра.

2.3.2 Четириканален инфрачервен ХОЕ за целите на метрологията

В дисертацията се представя нов вид ХОЕ за прецизно измерване на пълното поле на преместванията в и извън равнината на натоварен обект с цифрово-електронна фазовостъпкова спекъл интерферометрия. Това измерване изисква двойно симетрично осветяване на обекта, както във вертикалната, така и в хоризонталната равнини. По-конкретно, предложеният ХОЕ позволява едновременно построяване на четири виртуални опорни равнини, които са паралелни на повърхността на ХОЕ при извънсево осветяване с две двойки лазерни диоди, излъчващи на две различни дължини на вълните. По този начин, ние преобразуваме двуканален интерферометър в многоканален интерферометър с четири отделни канала. Предложеният ХОЕ е конструиран като сандвична структура от две отражателни холограми, чиито записи съдържат образа на дифузно разсейващ метален обект, осветен под ъгъл 30° спрямо нормалата. Всяка от холограмите се състои от два отражателни холографски записа, направени последователно за един и същ холографски обект. Записването се извършва във видимата част на спектъра и след допълнителна химична обработка, спектралният максимум на разработените холограми е пренесен в близката ИЧ областта, с цел да се постигне правилно възстановяване на образа при осветяване със 790 nm и с 830 nm.



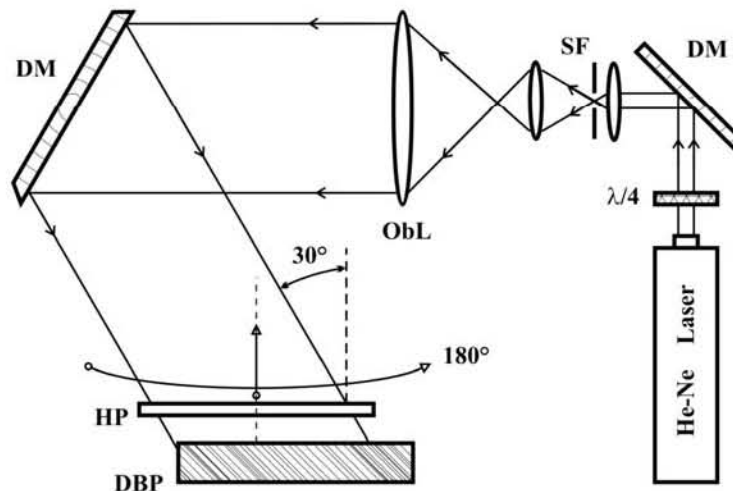
Фиг. 2.11 Оптична схема за възстановяване на четири холографски синтезирани интерферометъра, където: *Dlspv* - диоден лазер във вертикалната равнина, *S* поляризиран; *Dlsph* - диоден лазер в хоризонталната равнина, *S* поляризиран; *Dlpph* - диоден лазер в хоризонталната равнина, *P* поляризиран; *Dlppv* - диоден лазер във вертикална равнина, *P* поляризиран; *RRHv* - сменяема отражателна холограма за вертикалната равнина; *RRHh* - сменяема отражателна холограма за хоризонталната равнина; „Loading” - натоварване на изследвания образец; *Object* - обект на изследване

Оптичната схема на възстановяване на ХОЕ е показана на **Фиг. 2.11**. Холографският оптичен елемент трябва напълно да отговаря на определени задължителни изисквания като оптимална дифракционна ефективност за работните дължини на вълните (790 nm

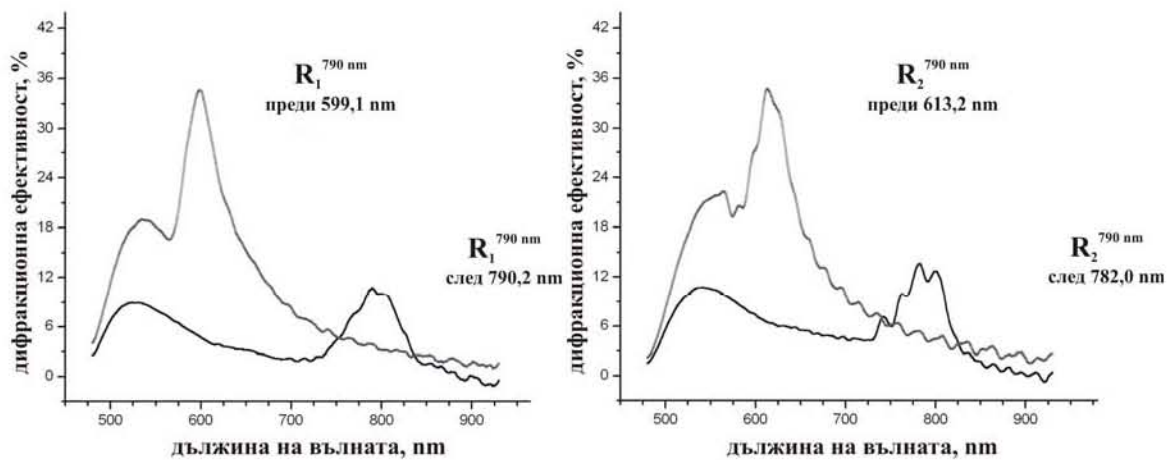
и 830 nm), минимално поглъщане в близката ИЧ областта и възможност за едновременно възстановяване с две двойки дължини на вълните. Предварително е установено, че в зависимост от отражателните характеристики на обекта, дифракционната ефективност на отражателната холограма трябва да бъде между 10 % и 30 %, за да се постигне оптимален контраст на интерференчните ивици. Това може да бъде постигнато при правилен избор на експозицията в линейната част на експозиционната характеристика на записващия материал. Холограмите са записани на СХ плаки HP-650, произведени в ИОМТ-БАН, които са с дебелина на светлочувствителния слой около 8 μm . Средният размер на зърното в емулсията е по-малък от 10 nm. Записаните холограми от Денисюков вид са Бреговски холограми, характеризиращи се с един единствен дифракционен порядък и високо отношение сигнал-шум ($\text{SNR} > 100:1$).

Установката за холографския запис на ХОЕ е показана на **Фиг. 2.12**. По време на записа, емулсионният слой на една от двоекспозиционните холограми се поставя към обекта. Той е ориентиран обратно на другата холограма. Двете експозиции са направени последователно посредством кръгово поляризирана светлина от He-Ne ($\lambda=632.8$ nm) лазер. Правилният избор на експозициите в линейната част на експозиционната характеристика на записващия материал е от съществено значение за получаването на почти равни дифракционни ефективности за двата холографски записа. Това се постига при експозиция от 0.5 mJ/cm^2 за всеки от последователните записи. Холограмите са проявени с фиксиращ проявител, осигуряващ среден размер на получените сребърни зърна около 20-30 nm като по този начин се гарантира висока дифракционна ефективност и стабилност на отражателните холограми. Фиксиращо-проявяващият процес понякога води до спектрално изместване на максимума на дифракционната ефективност към по-късите дължини на вълните. За да се компенсира свиването и да се осигури възпроизвеждането дори при дължина на вълната по-голяма от дължината на вълната на холографския запис, както е в нашия случай, раздуването на изследваните холограми трябва да бъде направено във водна баня с (5 %) воден разтвор на повърхностно-активно вещество. Използван е воден разтвор на „CB1017” или (5-10 %) воден разтвор на колаген хидролизиран желатин. Спектралното отместване на максимума по дължина на вълната, след процедурата по раздуване е представено на **Фиг. 2.13** и **Фиг. 2.14**. Виждаме, че е удовлетворено задължителното изискване за почти еднакви стойности на дифракционната ефективност на двата холографски записа. Ширината на спектралните характеристики на диодните лазери позволява наличие на малки отклонения в спектралните позиции на дифракционните максимуми. Спектралните криви на дифракционната ефективност след „раздуване” на двоекспозиционните сандвични холограми за възпроизвеждане на образа на 790 nm и на 830 nm, са изобразени на **Фиг. 2.15**.

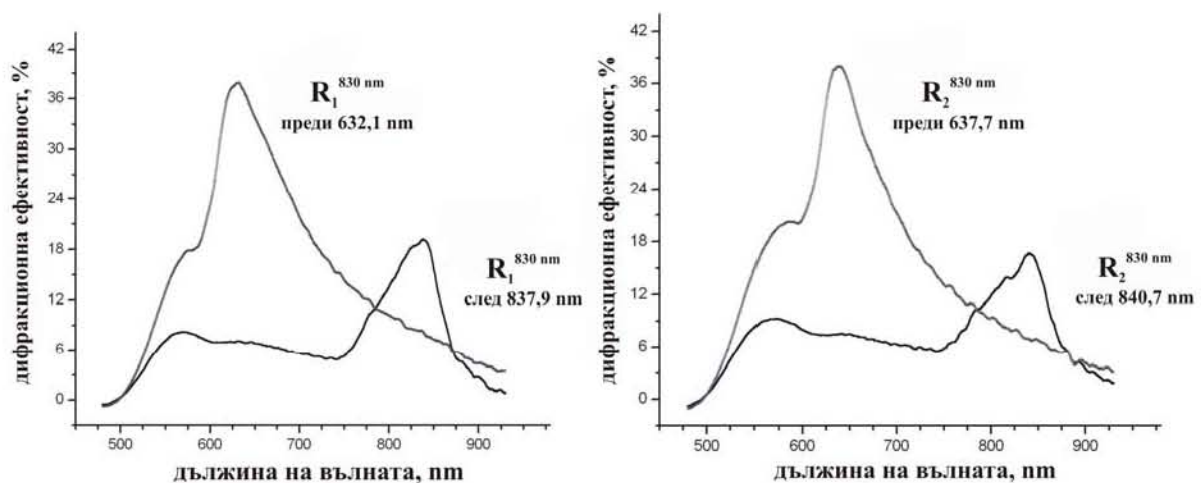
Експериментално получените резултати доказват, че разработените ХОЕ осигуряват четири операционни канала, което прави възможна за изпълнение цифровата фазово-стъпкова спекъл ивична интерферометрия с диодни лазери, излъчващи в близката ИЧ спектралната област, за измервания на пълното поле на преместването. Системата базираща се на разработения елемент е много компактна и пригодена за работа в реално време. Като задължителни за реализиране са температурна стабилизация с ($\pm 0,01$ °C) и обратна връзка по ток на диодните лазери. На **Фиг. 2.16** е представена в общ вид система за цифровата фазово-стъпкова спекъл ивична интерферометрия, където четириканалният ИЧ ХОЕ е успешно интегриран.



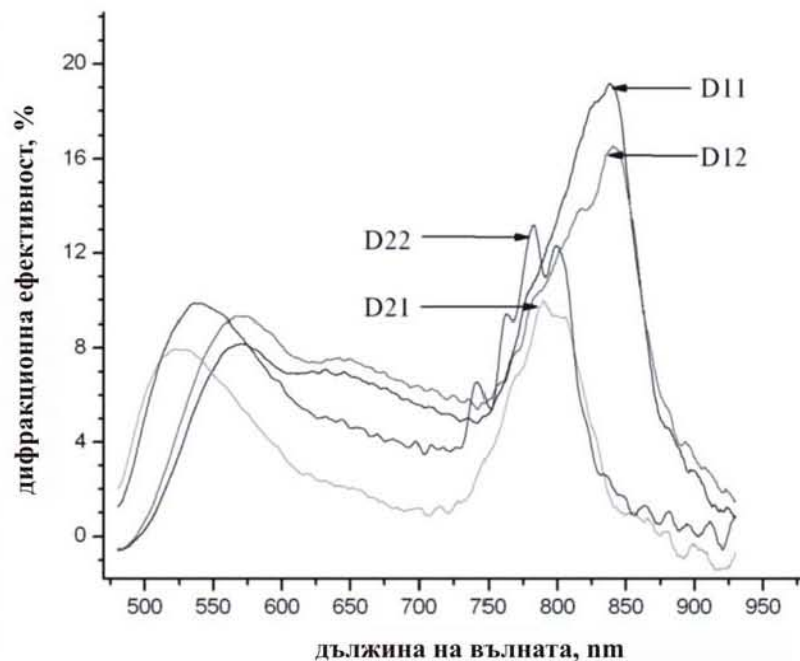
Фиг. 2.12 Оптична постановка за запис на двеуекспозиционни отразителни холограми, където DM е отразяващо огледало; SF - пространствен филтър; ObL – леща на обектива; HP – холографска плака; DBP - дифузно отразяваща плака; 30° - ъгъл на холографски запис; 180° - ъгъл на въртене на HP за втори запис



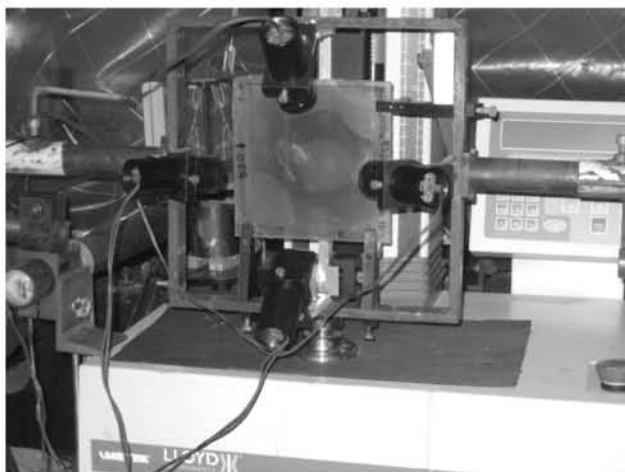
Фиг. 2.13 Спектрални характеристики на дифракционната ефективност преди и след "раздуване" на двеуекспозиционни (R1 и R2 наименовани) холограми за възстановяване на образа при 790 nm



Фиг. 2.14 Спектрални характеристики на дифракционната ефективност преди и след "раздуване" на двеуекспозиционни (R1 и R2 наименовани) холограми за възстановяване на образа при 830 nm



Фиг. 2.15 Спектрални характеристики на дифракционната ефективност след "раздуване" на двуекспозиционните сандвични холограми (наименовани D11 и D12) за възстановяване на изображението при 830 nm и на двуекспозиционните сандвични холограми (наименовани D21 и D22) за възстановяване на изображението при 790 nm



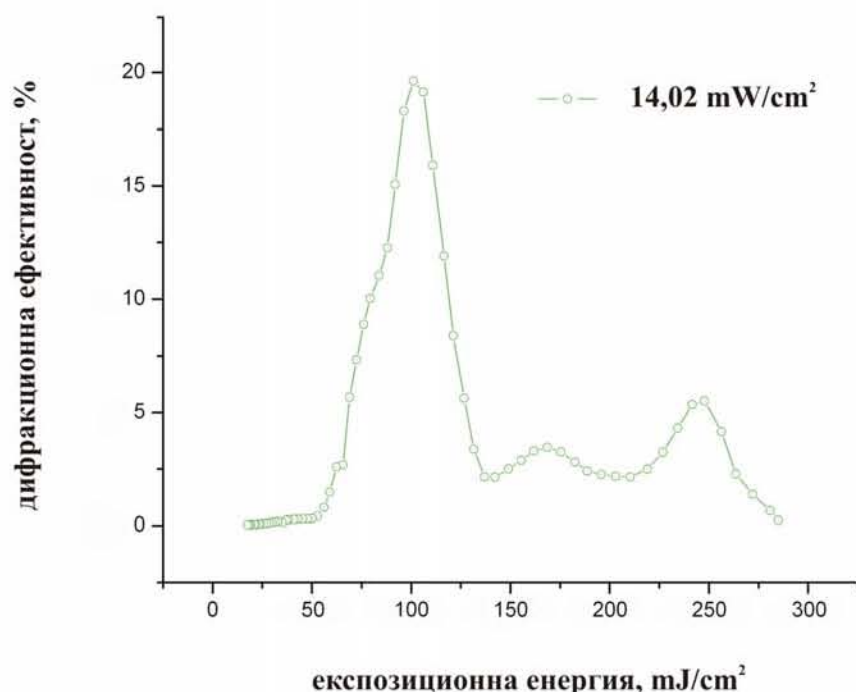
Фиг. 2.16 Интерферометрична система за измерване на пълното поле на преместването. Четири-канален интерферометър с диодни лазери и ХОЕ



Фиг. 2.18 Селективно холографско огледало записано на БХЖ плака. Характерно свойство за ХОЕ огледалото е много тясната работна спектрална ивица, което същевременно осигурява минимални загуби в пропуснатия спектър

2.3.3 Селективно тесноивично холографско огледало

За целите на флуоресцентната интерференчна микроскопия бе изработено селективно тесноивично холографско огледало, което разделя възбуждащото лъчение с по-висока енергия от флуоресцентния сигнал. ХОЕ пропуска само флуоресцентния полезен сигнал и блокира достъпа на напompващото лъчение към камерата, използвана за визуализация на обекта на наблюдение. Високата селективност на ХОЕ по дължина на вълната осигурява минимална загуба на информация, постъпваща към камерата от обекта на наблюдение. За да изпътним това изискване използвахме холографски плаки с бихромиран желатин (БХЖ) за изработката на този ХОЕ. С помощта на оптичен клин с плавно променящо се пропускане е получена експозиционната характеристика на БХЖ емулсията при запис на дължина на вълната 532 nm с диодно напompван твърдотелен лазер (DPSS) „Verdi 2W”.



Фиг. 2.17 Експозиционна характеристика за БХЖ холограма, регистрирана в зелената част на спектъра (532 nm) при повърхностна плътност на лъчистия поток на лазерното лъчение по време на записа $14.02 \text{ mW}/\text{cm}^2$

Експозиционната крива, дадена на **Фиг. 2.17**, показва, че изменението на дифракционната ефективност в зависимост от енергията при записа се характеризира с тесен пик. Това означава, че изборът на оптималната енергия на запис е критичен при БХЖ холограмата. Малки отклонения от оптималната енергия могат да доведат до драстична промяна на дифракционната ефективност. От експозиционната характеристика е определена оптимална стойност за експозицията, която е $102 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Повърхностната плътност на лъчистия поток при записа е $14.02 \text{ mW}/\text{cm}^2$. При изработката на елемента е направен холографски запис по схемата за отражателна холограма на Денисюк на „100 %” отразяващо огледало, разположено перпендикулярно по отношение на падащия сноп. Фотографията на **Фиг. 2.18** показва действието на изработения ХОЕ. Както добре се вижда, полученото селективно огледало отразява над 90 % (без пропускане) в тясна ивица от зелената част на спектъра и пропуска останалата част от видимия спектър.

Глава 3: Цветен холографски запис

Въпреки прогреса в развитието на цветната холография от 60-те години на миналия век до наши дни, налице са редица важни проблеми, които следва да бъдат решени. Основните въпроси в цветната холография са:

- 1) колко и какви дължини на вълните на лазерните източници да се използват;
- 2) върху какъв материал да се запише холограмата;
- 3) как да се възстанови вълновият фронт, закодиран в холограмата, за да се получи възстановено изображение близко до истинския обект, или с други думи какви светлинни източници да се използват за осветяване на холограмата.

Ние използваме термина „цветна холография“ за запис, който има за цел получаване на истинските цветове на обекта при възстановяване на изображението от холограмата.

3.1 Система за многоцветен холографски запис

3.1.1 Особенности на цветния холографски запис

Още Лейт и Упатниекс предлагат да се използват три RGB дължини на вълните на лазерните източници, следвайки теорията на цветното зрение, според която всеки цвят може да се представи като линейна суперпозиция на три основни цвята. Прието е цветовото възприемане на един обект, осветен с даден светлинен източник, за среден наблюдател да се описва с основните цветове.

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) E(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) E(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

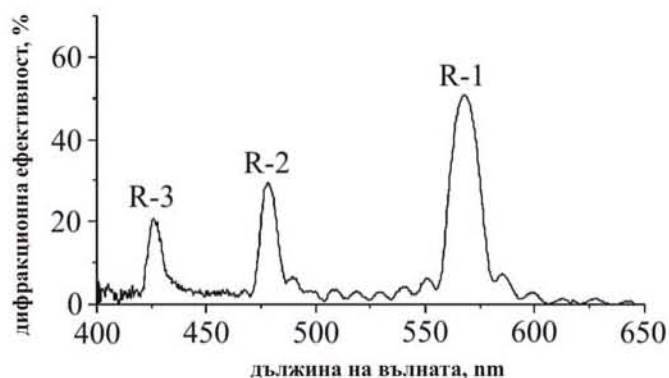
където: $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ са функциите на цветово възприятие за среден наблюдател, $E(\lambda)$ е спектърът на излъчване на осветяващия източник и $S(\lambda)$ е спектралната крива на отражателната способност на обекта. Осветяващият източник е от първостепенна важност в цветната холография. Бялата светлина, създадена чрез комбиниране на излъчването на три монохроматични лазера, се различава от бялата светлина при дневно осветление, която е с ширококолентов спектър. В случая на холограма, записана с няколко лазерни източника стойностите на X, Y, Z се дават от [17]:

$$X^h = \sum_{i=1}^N S(\lambda_i) E(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i), \quad Y^h = \sum_{i=1}^N S(\lambda_i) E(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i), \quad Z^h = \sum_{i=1}^N S(\lambda_i) E(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \quad (3.2)$$

като индексът „ h “ е поредният номер на дължината на вълната, а N е броят на всички използвани дължини на вълните. Както се отбелязва в [17] налице е фундаментална разлика между X, Y, Z и X^h, Y^h, Z^h , тъй като за пресмятането на X, Y, Z се използват кривите $E(\lambda)$ и $S(\lambda)$, а за пресмятането на X^h, Y^h, Z^h се взимат само дискретни техни стойности, т.е. чрез монохроматичните източници се въвежда семплиране на спектъра на обекта. Очевидно е, че във важния за практиката случай на запис с няколко дължини на вълните, се получава недостатъчно семплиране на $E(\lambda)$ и $S(\lambda)$, в резултат на което се стига до визуално цветно възприятие, различаващо се от истинския обект. Според [17,21] дължините на вълните трябва да са повече от три, за да бъде приемлива грешката при цветовото възстановяване. Симулацията, направена в [17] на базата на уравненията (3.1) и (3.2), показва, че оптималният брой на дължини на вълните е 4 или 5, като над 7 дължини на вълните не се получава забележимо подобрение.

Създаването на цветна холограма може да се осъществи по различни начини. Панхроматичният CX материал HP-P разгледан в дисертацията позволява

мултиплициране на записа, но дифракционната ефективност на холограмата при последователни записи върху един и същи носител намалява, както се вижда от **Фиг. 3.1**.



Фиг. 3.1 Спектрална зависимост на дифракционната ефективност при три последователни записи R-1, R-2 и R-3, направени върху един и същ оптичен холографски носител

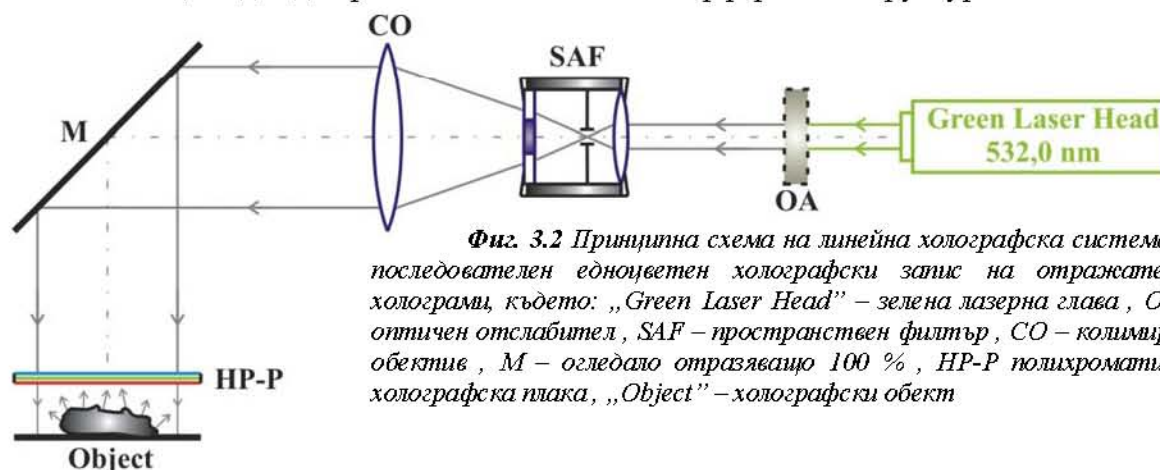
За увеличаване на общата дифракционна ефективност на цветните отразителни холограми може да бъдат използвани различни методи:

- цветовете, изграждащи общото холографско изображение, са записани като единични записи на отделни плаки;
- върху един информационен носител има два **последователни** записа; в пакета, изграждащ холограмата, се използва съчетание от носители с един и с два записа;
- върху една плака има два **едновременни** записа; в пакета, изграждащ холограмата, се използват плаки с един и с два последователни или едновременни записа;
- върху една плака има три **последователни** записа; в пакета, изграждащ холограмата, се използват плаки с един, два и три записа;
- върху една плака има три **паралелни** записа (едновременни); в пакета, изграждащ холограмата, може да се използват съчетания от всички предходни видове комбинации на записи върху холографските плаки.

Настоящата дисертация разглежда само по-съществените от експериментална гледна точка методи, които са се утвърдили за създаване на цветно холографско изображение.

3.1.2 Система за единичен или последователни записи с една дължина на вълната

В системата, представена на **Фиг. 3.2**, могат да бъдат записвани последователно във времето холографски експозиции на една дължина на вълната. Изборът на спектралната област, в която трябва да генерира лазерът, се определя основно от светлочувствителните характеристики на холографската плака. Схемата работи както с монохромни, така и с панхроматични плаки. Промени в периода на записаните холографски решетки върху една плака се осъществяват чрез предварителна или последваща физико-химична обработка на плаката. Промени в околната среда по време на записа също водят до промени в записаната интерференчна структура.

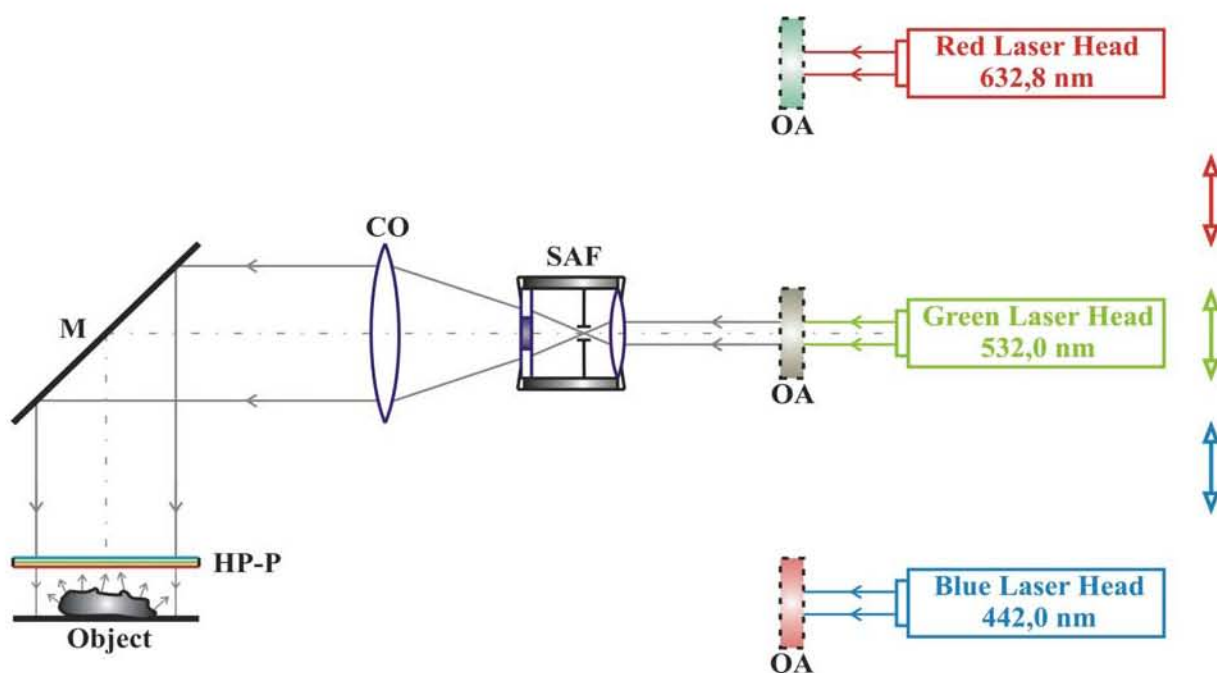


Фиг. 3.2 Принципна схема на линейна холографска система за последователен едноцветен холографски запис на отразителни холограми, където: „Green Laser Head” – зелена лазерна глава, OA – оптичен отслабител, SAF – пространствен филтър, CO – колимиращ обектив, M – огледало отразяващо 100 %, HP-P полихроматична холографска плака, „Object” – холографски обект

Записаните по този начин холограми могат да имат цветове, но те не отговарят на действителните цветове на обекта на запис (псевдоцветни холограми).

3.1.3 Система за последователен запис на три дължини на вълните

На **Фиг. 3.3** е показана система за запис на цветна холограма с три дължини на вълните, като записите се извършват последователно. Броят на лазерите може да бъде повече от три. За създаването на цветна холограма е необходимо позиционирането на плаката при всеки запис задължително да бъде на същото място, както при предходната експозиция. Минимални размествания в положението на плаката спрямо обекта и/или спрямо оптичния сноп водят до промени в записаната дифракционна структура. Това може да бъде пагубно за качеството на записа. Недостатъкът на тази схема се явява необходимостта от смяна на лазера след всяка експозиция. Честата пренастройка на оптичната схема при подмяна на светлинния източник в схемата причинява неудобства и понякога води до влошаване качеството на записа.



Фиг. 3.3 Принципна схема на линейна холографска система за последователен многоцветен холографски запис на отразителни холограми. За оптимално припокриване на видимия спектър са избрани лазери с дължини на вълните съответно: 632.8 nm червен, 532 nm зелен, 442 nm син. „Red/Green/Blue Laser Head” – червена/зелена/синя лазерна глава, OA – оптичен отслабител за червено зелено и синьо лазерно лъчение, SAF – пространствен филтър, CO – колимиращ обектив, M – огледало отразяващо „100 %”, HP-P полихроматична холографска плака, „Object” – холографски обект

3.1.4 Система за едновременен запис на три дължини на вълните

Система за едновременен холографски запис с три дължини на вълните е представена на **Фиг. 3.4**. Регистрираната отразителна холограма генерира цветно изображение дори при еднослойна структура с единичен запис. Предимствата на системата са:

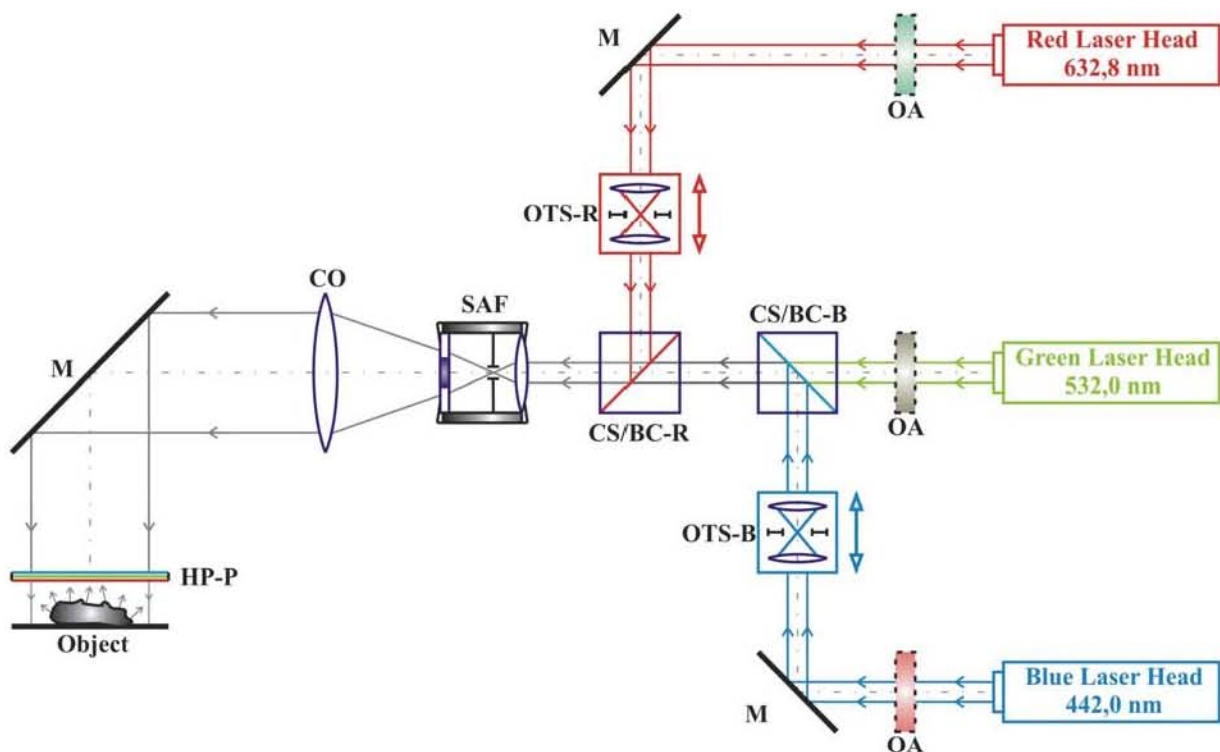
- намалено общо време за експозиция;

- висока стабилност при запис (три пъти намалява вероятността за техническа грешка, както и влиянието на механичните вибрации върху холограмата по време на записа);
- по-реалистично цвето предаване на оригиналните цветове от обекта към холографското копие;
- икономия на светлочувствителен материал за запис;
- намалено светлинно натоварване върху записвания обект.

Последното условие е особено важно за редица уникални музейни експонати, които изискват специален режим на съхранение, включващ намалено светлинно натоварване, защита от УВ лъчи и специални термостатирани, и влагоизолирани помещения.

Недостатъци на системата са:

- силно усложнена настройка на оптичния блок на системата;
- изискване за висока точност при цветовото смесване;
- използване на скъпо струващи и уникални оптични елементи;
- голяма сложност при пренастройка и висока чувствителност към разстройка;
- за работа със системата се изисква висококвалифициран персонал;
- скъпо струваща апаратура (лазери, виброизолирани стендове, термостати).



Фиг. 3.4 Принцилна схема на система за едновременно многоцветен холографски запис на отразителни холограми. Системата е предназначена да работи във видимата спектрална област с дължини на вълните: 632.8 nm, 532 nm и 442 nm, където: „Red/Green/Blue Laser Head” – червена/зелена/синя лазерна глава, OA – оптичен отслабител за червено зелено и синьо лазерно лъчение, OTS-R/OTS-B – оптична трансляционна система за червена/синя светлина, CS/BC-R – оптичен разклонител/светлинен обединител за червена светлина, CS/BC-B – оптичен разклонител/светлинен обединител за синя светлина, SAF – пространствен филтър, CO – колимиращ обектив, M – огледало, отразяващо 100 %, HP-P полихроматична холографска плака, „Object” – холографски обект

3.1.5 Експериментална установка

Експериментална холографска установка за едновременно запис на три дължини на вълните е представена на **Фиг. 3.5**. Елементите в оптичната схема от **Фиг. 3.5** са:

Object – цветен обект, подготвен за холографиране.

HP-P – холографска плоча за цветен запис.

M – плоско паралелно огледало с отражение „100 %”.

CO – колимиращ обектив - за корекции на ъгловата апертура на работния холографски оптичен сноп.

SF – пространствен филтър, вграден в микро-система за оптична обработка на лазерното лъчение.

CS/BC – многофункционален и многоканален светлинен смесител.

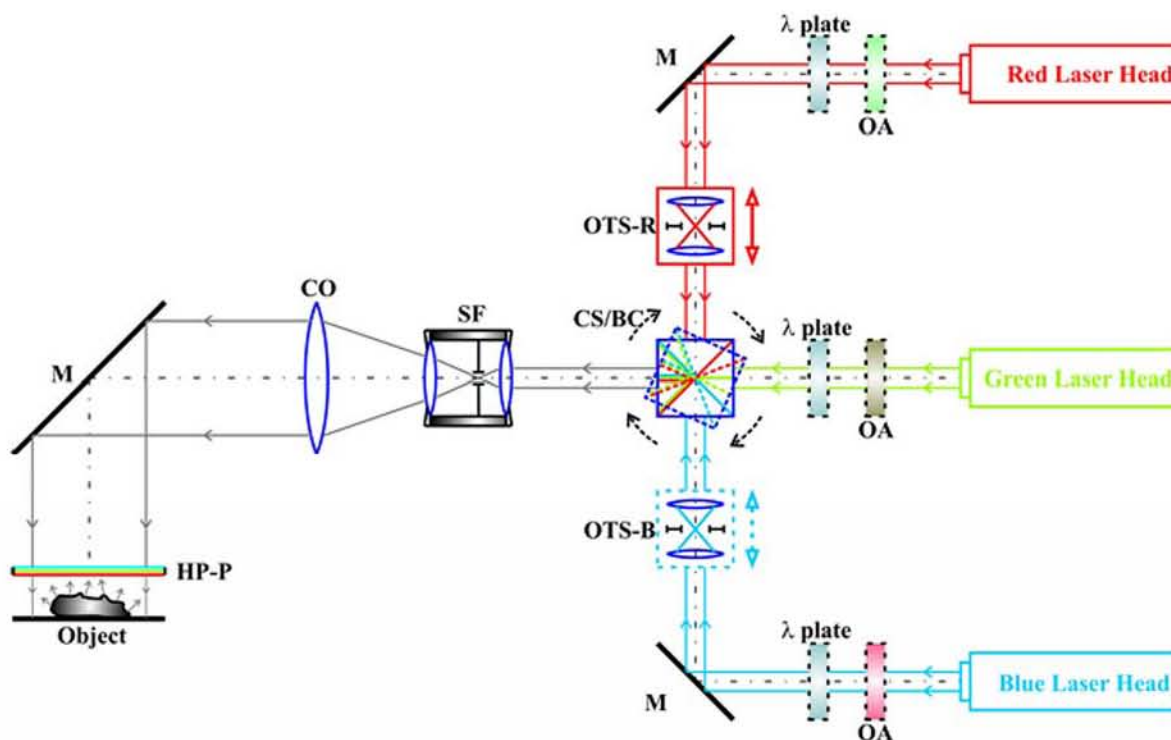
OTS-R и **OTS-B** – оптични съгласуващи системи съответно за червен -**R** и син -**B** оптични спектрални диапазони.

λ plate - λ пластина за оптична обработка (видът на пластината $\lambda/2$, $\lambda/4$ и ориентацията на активната ѝ зона зависят от конкретния експеримент).

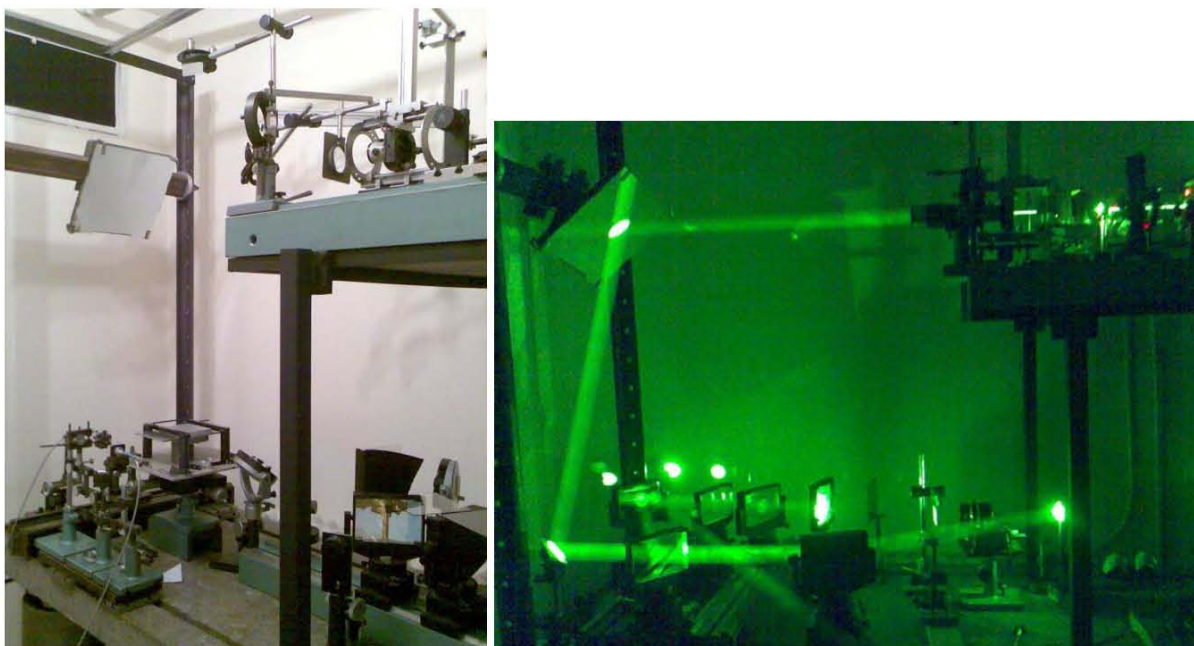
OA – оптичен атенуатор.

Laser Head – **Red**- червена, **Green**- зелена и **Blue**- сина лазерни глави.

Експерименталната реализация на системата е показана на **Фиг.3.6**. Системата притежава значителна гъвкавост по отношение на настройка и пренастройка, като позволява последователни и едновременни холографски записи върху една и съща плоча.

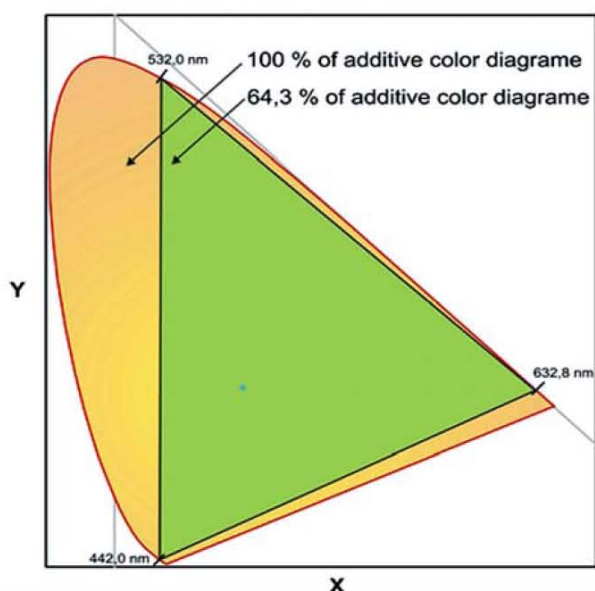


Фиг. 3.5 Оптична схема на експериментална холографска система за едновременно холографски запис на три дължини на вълните. Системата работи във видимата спектрална област с лазерни дължини на вълните: 632,8 nm, 532 nm и 442 nm, където: „Red/Green/Blue Laser Head” – червена/зелена/синя лазерна глава, OA – оптичен отслабител за червено-зелено и синьо лазерно лъчение, „ λ plate” – $1/2 \lambda$ и/или $1/4 \lambda$ пластини, OTS-R/OTS-B – оптична трансляционна система за червена/синя светлина, CS/BC – оптичен разклонител/светлинен обединител, SF – пространствен филтър, CO – колимиращ обектив, M – огледало, отразяващо „100 %”, HP-P – холографска плоча, „Object” – холографски обект

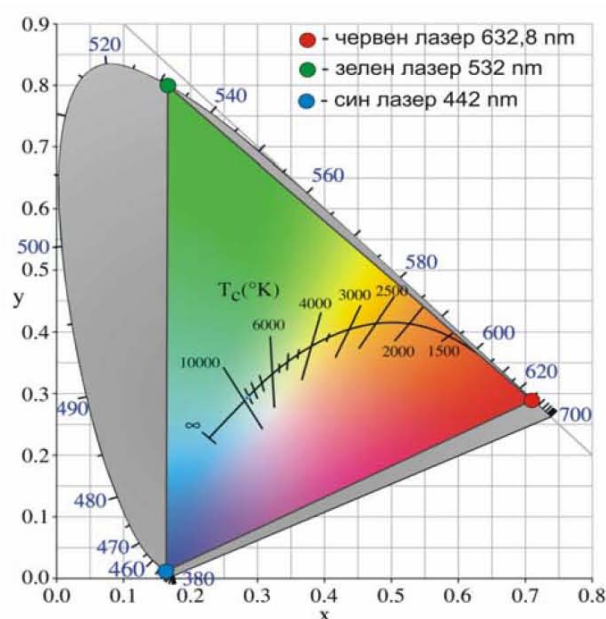


Фиг. 3.6 Общ изглед на система за многоцветен холографски запис: (отляво) позициониране на холографската плака; (отдясно) запис в зелената спектрална област

Максималният брой на възможни едновременни записи е три, което води до покритие от 64.3 % на RGB цветовата гама, при използване на лазери, генериращи на 632.8 nm (червен), 532 nm (зелен) и 442 nm (син) **Фиг. 3.7**. При използване на тази комбинация от лазери за холографски запис, възможните цветове за холографско възпроизвеждане от оригиналния обект по време на записа са ограничени във виртуалния цветен триъгълник, заключен върху цветната диаграма между точките от дължините на вълните на работните лазери на **Фиг. 3.8**.



Фиг. 3.7 Относително покритие на цветовата диаграма (зеления триъгълник) при използване за запис на лазери, генериращи на 632.8 nm, 532 nm и 442 nm



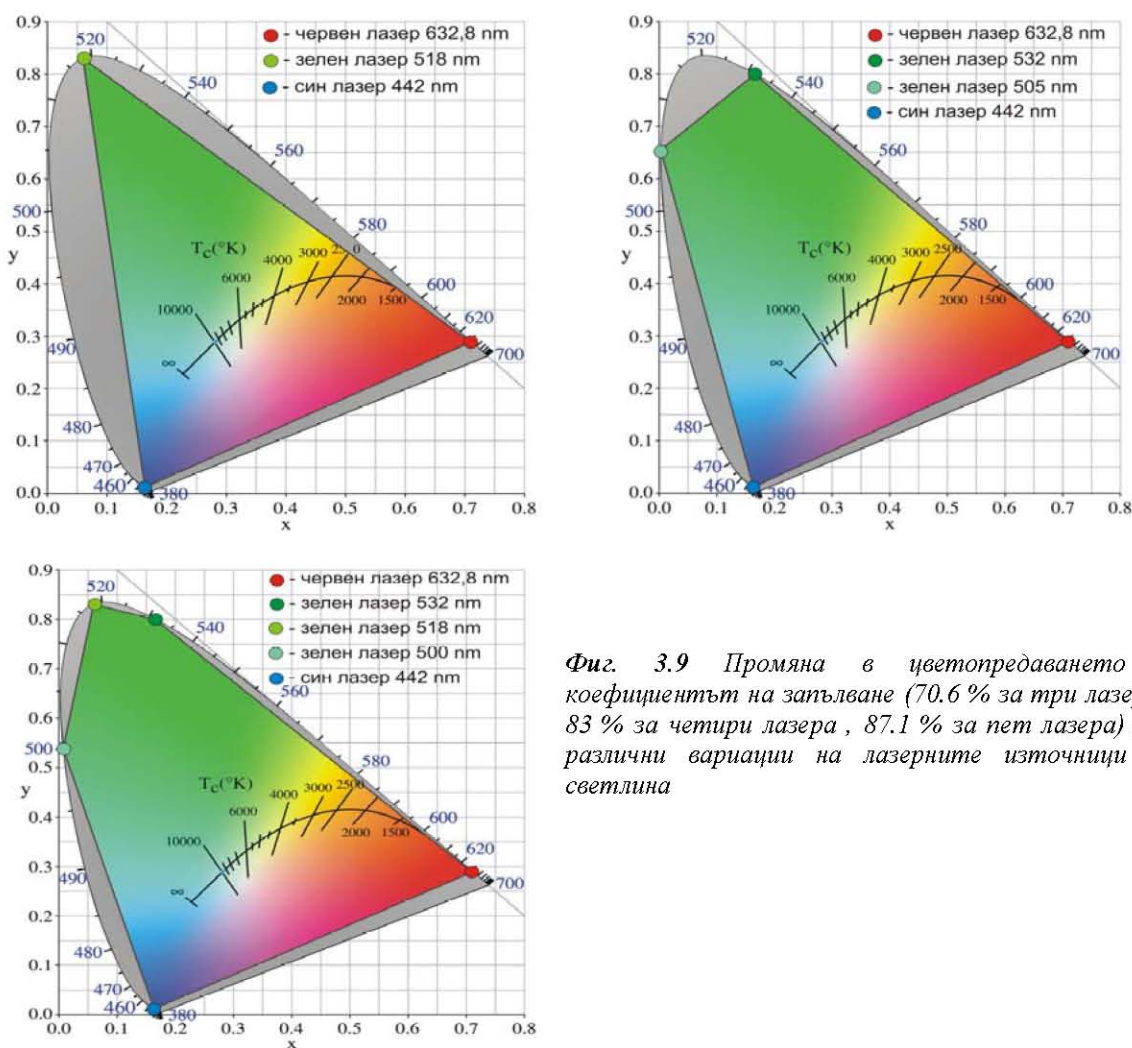
Фиг. 3.8 Възможна цветова гама при възстановяване при работа с лазери, генериращи на 632.8 nm, 532 nm и 442 nm

Използването на схеми за запис с промяна в схемата на светлинните източници би подобрило диаграмата на цветопрдаването:

- оптимизирана схема за цветен запис с три лазера, като лазера на 532 nm се замени с лазер на 518 nm;
- оптимизирана схема, включваща използването на четири лазера с работни дължини на вълните: 442 nm, 505 nm, 532 nm и 632,8 nm;
- използването в схемата за запис на повече от четири лазера.

От една страна увеличаването на броя на лазерите за запис на една цветна холограма води до по-точно цветопрдаване на действителните цветове от обекта. Същевременно много на брой лазери значително биха оскъпили холографската система за цветен запис. На **Фиг. 3.9** са демонстрирани промяната в цветопрдаването и коефициентът на запълване при различни вариации на лазерните източници на светлина.

Малкото подобрене в диапазона на цветопрдаването няма да доведе до съществено подобрене на реалните цветове, получени при холографирането. При подбор на светлинни източници, подходящи за разширяване на цветовия обхват, е необходимо да се вземат под внимание оригиналните цветови параметри на обекта за холографиране. В същото време лазерите, излъчващи в зеления диапазон различно от 532 nm, имат значително по-висока цена от лазер с дължина на вълната 532 nm. Този факт налага допълнително финансово условие при подбора на светлинни източници. При тези обстоятелства всеки опит за абсолютно 100 % възпроизвеждане на цветовата диаграма чрез дискретен набор от дължини на вълните, осигурявани от различни лазерни източници, е безсмислен и твърде скъп.



Фиг. 3.9 Промяна в цветопрдаването и коефициентът на запълване (70.6 % за три лазера , 83 % за четири лазера , 87.1 % за пет лазера) при различни вариации на лазерните източници на светлина

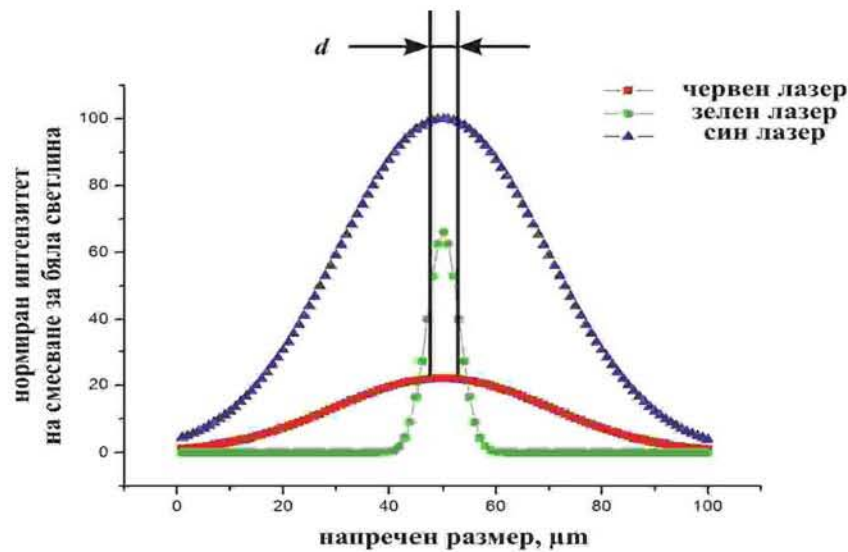
Едновременен запис на три дължини на вълните се осъществява благодарение на фазово съгласуване между използваните в холографската схема лазери (ако лазерите не са взаимно кохерентни няма да интерферират). Ролята на време-пространствен съгласуващ елемент между лазерите в схемата е поета от пространствения филтър SF.

За да се осъществи фазовото съгласуване на три светлинни вълни с различна дължина на вълната е необходимо използването на SF, който да удовлетворява условието за дифракция едновременно и за трите вълни. В настоящата схема SF е подбран за най-добра филтрация на зелената (G - 532 nm) светлинна компонента. По този начин синята и червената светлинни компоненти се намират на почти еднакво отстояние от зелената компонента във вълновото пространство. Еднаквата отдалеченост допуска използването на две еднакви оптични трансляционни системи, като оптичните вход-изход са обърнати за синята компонента спрямо тези на червената. Червената трансляционна система OTS-R е намаляваща, а оптичното изображение на синята трансляционна система OTS-B е с увеличение в образното пространство. Използването на $\frac{1}{4}\lambda$ и/или $\frac{1}{2}\lambda$ пластини, обозначени в схемата като „ λ plate” непосредствено след изхода на всеки лазерен източник на светлина, осигурява на холографската установка голяма гъвкавост по отношение на оптичната настройка и по-добър контраст на холографската картина едновременно за всички записващи дължини на вълните. Атенюаторите OA служат за прецизно регулиране на цветовото смесване.

Основен оптичен възел, предназначен да осигури оптична съосност и пространствено позициониране на вече обработените поляризационно светлинни източници, е светлинният смесител CS/BC. След изхода от смесителя трите цветни светлинни снопа трябва да лежат върху една и съща оптична ос. Това изискване е от особена важност за по-нататъшните оптични обработки на светлинните снопове в холографската установка.

SF е пространствен филтър за едновременна оптична обработка на всички оптични компоненти. Всъщност филтърът представлява сложна оптична система, включваща в състава си микрообектив, пространствен филтър и микроколиматор. При преминаване на оптичното лъчение през SF на изхода от филтъра се пропускат около 33 % от TEM₀₀ за всички спектрални компоненти. Пропуснатото лъчение представлява централната част от всички предварително Гаусово съгласувани компоненти - виж *Фиг. 3.10* . След SF изходящият светлинен сноп е със следните параметри :

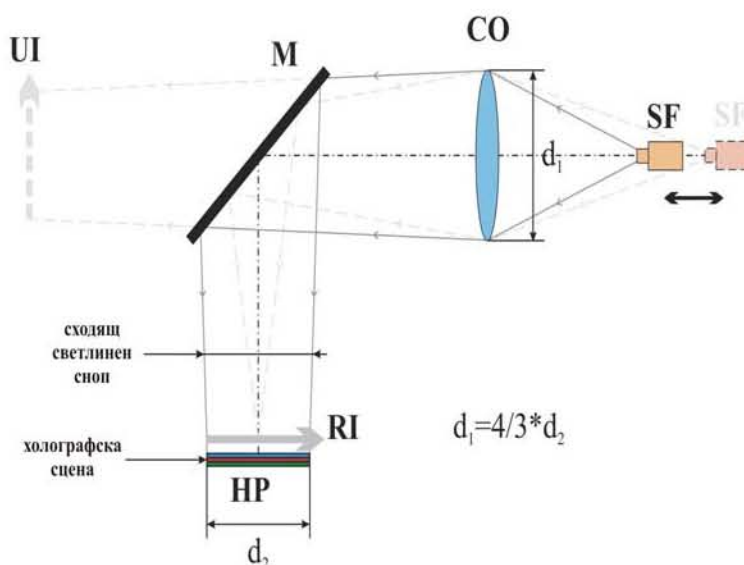
- кръгло сечение на светлинния сноп,
- равномерен светлинен интензитет по цялото сечение на снопа (максимално отклонение не повече от 5 %),
- пълно припокриване на всички цветови компоненти по цялото сечение на светлинния сноп (максимално отклонение при припокриване не по-голямо от 0.001 %, което е съществено важно за кохерентността между цветовите компоненти). Интензитетите на отделните цветови компоненти зависят от необходимото и различно за всяка холограма цветово смесване. Максималното отклонение се определя от припокриването на паразитно отразените снопове на разстояние около 10 m от SF.



Фиг. 3.10 Пропускане и схема на филтриране за пространствения филтър при съотношение на смесване на цветовете в пропорции: $R=0.22$, $G=0.66$, $B=1.00$ и размер на диафрагмата на пространствения филтър $d = 7 \mu\text{m}$.

Модовата структура на бял светлинен сноп, съставен от TEM00 на предварително Гаусово съгласувани R, G, и B вълнови компоненти, е представена на **Фиг. 3.10** . Като централна компонента на съгласуването е избрана зелената (G) компонента. Синята и червената оптични компоненти са на приблизително еднакво вълново отстояние от виртуалния зелен вълнов център в цуга. За вълновия цуг на бялата светлина червената компонента е с повишена разходимост, а синята е с повишена сходимост.

Колимиращият обектив CO в холографската установка има за цел при необходимост да премасщабира вече смесения и филтриран многоцветен сноп. При работа на CO в комбинация с колиматорната група от SF се осигурява по-голяма гъвкавост на холографската установка по отношение на промяна на размерите на оптичния сноп, а също така и пълен контрол по отношение на сходимост и разходимост на оптичното лъчение. За да може да бъде осигурено условието за сходимост при голямо сечение на снопа, е необходимо оптичното лъчение да преминава през CO, чиито размери са поне с една трета по-големи от размера на желаното за холографски цели оптично петно **Фиг. 3.11** .

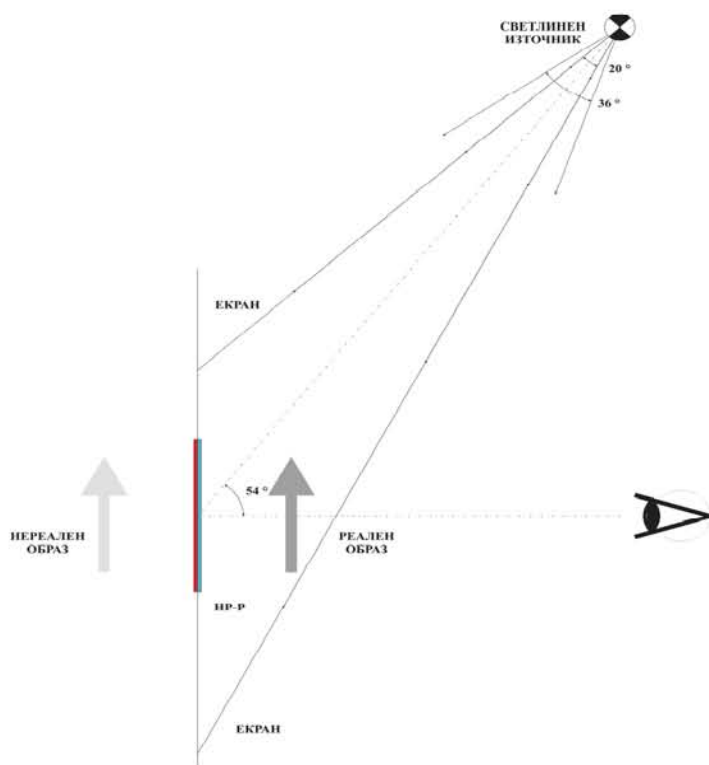
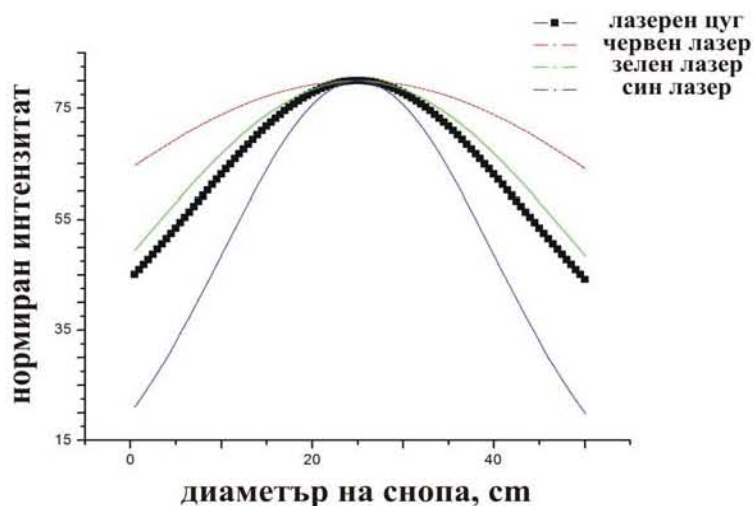


Фиг. 3.11 Промяна на размерите на светлинния сноп при запис на холограми. SF и SF' – промяна в геометричната позиция на пространствения филтър при избор на геометрия (разходяща, колимирана, сходяща) за осветяване на холографската сцена. CO – колимиращ обектив. M – „100 %“ отразяващо огледало. UI, RI – оптичните проекции на виртуалния и реалния образи на източника на лазерно лъчение. HP – холографска плоча d_1 – максимален технологичен диаметър на оптичното лъчение. d_2 – диаметър на оптичното лъчение за осветяване на холографската сцена

Системата за колимиране на бялата светлина, влизаща в състава на SF, е настроена оптимално за зелената компонента на цуга. Транслационните съгласуващи системи OTS внасят необходимите оптични корекции в червената и синята компоненти на цуга, така че същите тези компоненти впоследствие да бъдат оптично обработвани в SF, както се обработва зелената компонента. След оптичната обработка на белия цуг вълновите му компоненти придобиват следното пространствено-амплитудно разпределение - **Фиг. 3.12**.

Плоскопаралелните огледала М, използвани в установката, са с максимално „100 %” отражателно покритие за целия работен холографски оптичен диапазон. В схемата огледалата позволяват лесна промяна на посоката на оптичните снопове, като правят възможно да се избере подходящ ъгъл за осветяване на холограмата и обекта, и допринасят силно за пространствената независимост на установката. Освен обекта, с произволна пространствена ориентация са и холографските източници на светлина. Така лесно може да се контролира и променя съществено важния „*ъгъл на осветяване на холограмата*”, показан на **Фиг. 3.13**.

Фиг. 3.12 Пространствено-амплитудно разпределение на вълнов цуг, състоящ се от три едночестотни компоненти, съответно с дължини на вълните 632.8 nm, 532 nm и 442 nm



Фиг. 3.13 Оптималният ъгъл на осветяване на холограмата е 36°, като така се цели избягване на Френеловото отражение при осветяване на холограмата, когато се възстановява изображението на записания обект

3.2 Експериментални изследвания на цветен холографски запис - сандвична структура

Като цяло, общата експозиция E_T за записи върху една плака може да се опише като:

$$E_T = \sum_{i=1}^K [(E_{\max}^{C_i} - E_{\min}^{C_i}) \times (\alpha_i)] + E_{\min}^{C_1} \quad (3.3)$$

където K е броят на записите в светлочувствителния материал, $E_{\min}^{C_i}$ и $E_{\max}^{C_i}$ са минималната и максималната експозиции в линейната част на експозиционната характеристика при монохромен запис за съответната дължина на вълната, която е посочена с помощта на цветовия индекс C_i . Коефициентът на цветно запълване $0 < \alpha_i \leq 1$ се въвежда, за да осигури оптимално използване на динамичния диапазон на светлочувствителния материал, за да се избегне насищане. Подходящият избор на коефициента на цветно запълване е от голямо значение за адитивното цветово смесване при възстановяване. Вторият член в (3.3) дава необходимото енергетично отместване, което се получава по време на първата експозиция.

Успешното RGB възстановяване зависи от енергийния баланс на избраните експозиции в динамичния диапазон за записващия материал за различните дължини на вълните. Възстановяването от записа в червената област става през плаката със синьо-зеления запис. Пълната дифракционна ефективност, η_Σ , в случая на сандвична холограма се определя от:

$$\eta_\Sigma = \frac{I_{dB}}{I_{0B}} + \frac{I_{dG}}{I_{0G}} + \tau^4 \frac{I_{dR}}{I_{0R}} = \eta_B + \eta_G + \tau^4 \eta_R \quad (3.4)$$

където: I_{dB}, I_{dG}, I_{dR} и I_{0B}, I_{0G}, I_{0R} са интензитетите на дифрагиралата и възстановяващата светлинни вълни в синята, зелената и червената спектрални области. Съответно, τ е амплитудното пропускане на синьо-зелената холограма в червената спектрална област. Ако за простота приемем, че:

$$I_{0B} = I_{0G} = I_{0R} = I_0 \quad (3.5)$$

общата дифракционна ефективност става:

$$\eta_\Sigma = \frac{I_{dB} + I_{dG} + \tau^4 I_{dR}}{I_0} \quad (3.6)$$

Дифракционната ефективност на избелените НР-Р холограми намалява приблизително с коефициент $\frac{1}{2}K^2$ при много-експозиционен запис. Следователно, дифракционните ефективности на индивидуалните холографски решетки в сандвичната холограма, записани в синята, зелената и червената спектрални области в зависимост от броя на експозициите се дават от дифракционните ефективности на индивидуалните холографски решетки в сандвичната структура. Използването на две плаки позволява да се постигне по-висока дифракционна ефективност в сравнение с многоекспозиционен запис върху една плака:

$$\eta_B = \frac{\eta_{B\max}}{2}, \eta_G = \frac{\eta_{G\max}}{2}, \eta_R = \eta_{R\max} \quad (3.7)$$

където η_{Bmax} , η_{Gmax} , η_{Rmax} са максималните стойности на дифракционната ефективност при единичен запис в синята, зелената и червената спектрални области. Окончателно за пълната дифракционна ефективност се получава:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{\eta_{Bmax} + \eta_{Gmax}}{2} + \tau^4 \eta_{Rmax} \quad (3.8)$$

Ако допуснем, че $\eta_{Bmax} = \eta_{Gmax} = \eta_{Rmax} = \eta_{max}$ и $\tau = 1$, ефективността на така конструираната сандвична холограма е $\eta_{\Sigma} = \eta_{max}$, докато в случая на три записа върху единична плака ($K = 3$) дифракционната ефективност е равна на $\eta_{\Sigma} = \frac{2}{9} \eta_{max}$, т. е. имаме 4.5 пъти по-добър отклик при сандвичната структура. Подобряването на качеството на възстановявания образ в случая на отражателна холограма, изградена от две холограми, се вижда много добре от **Фиг. 3.14**. Фигурата представя възстановяването на тестов обект, изграден от части с различен цвят, текстура и отражателна способност. Най-убедително доказателство за по-доброто отношение сигнал-шум в случая на сандвичната холограма е качеството на възстановяване на скалата с градации на сивото, включена в тестовия обект.



Фиг. 3.14 Възстановено изображение на тестов обект от еднослойна (отляво горе) и двуслойна (отдясно горе) отражателни холограми, записани върху свръхдребнозърнест светлочувствителен материал. Цветен холографски еталонен обект (долу център)

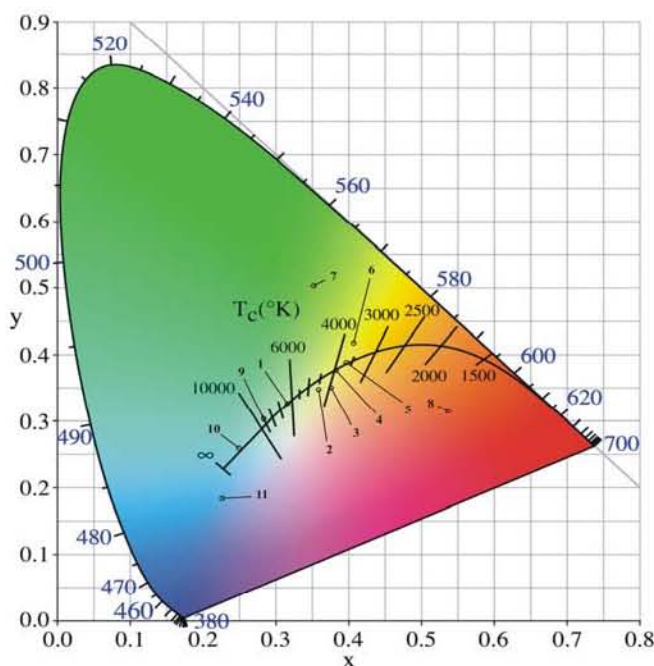
В съответствие с цветната диаграма на **Фиг. 3.15**, реалистично възстановяване на белия цвят за използваните дължини на вълните се постига при следното съотношение между интензитетите на възстановените вълни:

$$I_{dB} : I_{dG} : \tau_{dR}^4 I_{dR} = 1 : 0.68 : 0.95 \quad (3.9)$$

Взимайки например експериментално получените на **Фиг. 2.5** максимални стойности на дифракционната ефективност $\eta_{Bmax} = 0.48; \eta_{Gmax} = 0.57; \eta_{Rmax} = 0.66$, при $\tau = 0.85$ получаваме от (3.9), че отношението между интензитетите на светлинните вълни при възстановяване на основните цветове следва да бъде:

$$I_{0B} : I_{0G} : I_{0R} = 0.44 : 0.25 : 0.15 \quad (3.10)$$

Очевиден е изводът, че някои други комбинации при записа със съответното отношение на светлинните интензитети биха били по-подходящи за реализиране на ефективно смесване на холограмите в сандвична структура.

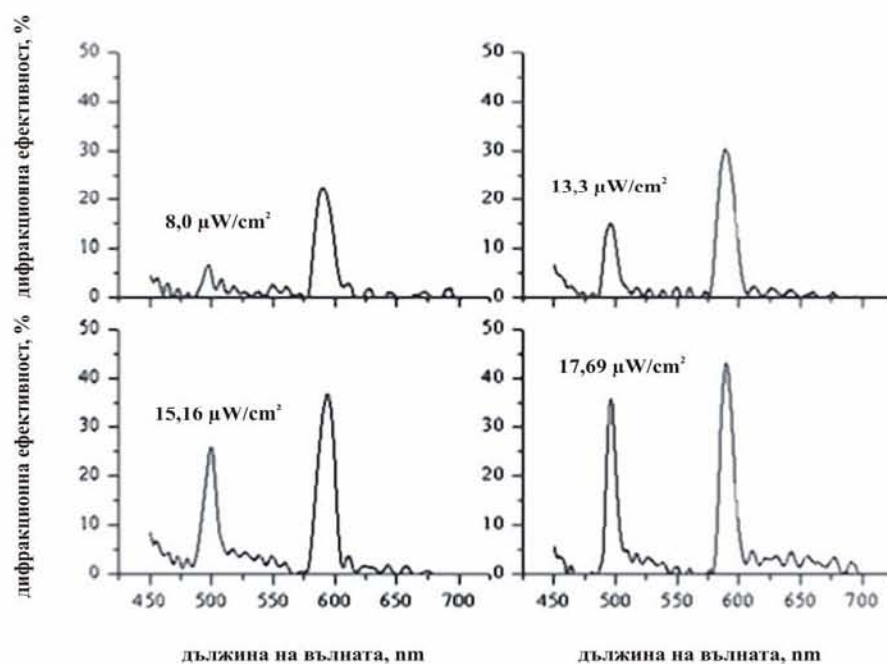


Фиг.3.15. Диаграма на цветните координати и цветната температура на реални обекти: 1 –бяла повърхност; 2 – сняг; 3 – бяла човешка кожа; 4 – сив камък; 5 – пясък; 6 – жълто цвете; 7 – зелена трева; 8 – червено цвете; 9 – синьо небе; 10 – езерно синьо, 11 – синьо цвете .

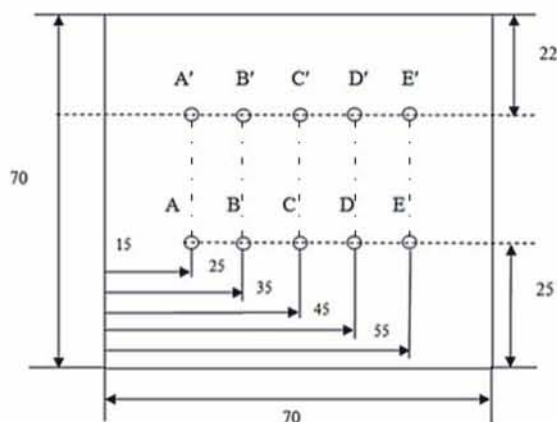
В съответствие с анализа на цветовия баланс, ефективността в червената и синята спектрални области трябва да бъде най-малко два пъти по-висока от ефективността в зелената за възстановяване със стандартен бял

източник на светлина . Това изискване е изпълнено за зеления и червения записи, но ефективността в синята спектрална област трябва да бъде по-висока. Това означава, че ефективен начин за постигане на високо качество при цветен холографски запис е да се приложи сандвич конструкция с червен и зелен записи на задната регистрираща плака и един син запис върху предната плака. За да гарантираме максимална дифракционна ефективност, ние избрахме експозицията на „синята” холограма да е малко по-ниска от експозицията, която се изисква. Едновременният холографски запис в червената (632.8 nm) и зелената (532 nm) спектрални области е направен с колимирани лазерни снопове, върху HP-P плаки с размери 70 mm ×70 mm. Пълната експозиция (сумата от експозициите за R и G) бе 1 mJ/cm² при постоянна повърхностна плътност на лъчистия поток 36 μW/cm² за 632.8 nm и нарастваща плътност за 532 nm – 8 μW/cm²; 13.3 μW/cm²; 15.16 μW/cm² и 17.69 μW/cm². Съответните времена на експониране бяха 22.7 s , 20.3 s , 19.5 s и 18.6 s. Резултатите за дифракционната ефективност са показани на **Фиг. 3.16** . Както се вижда, най-добрата комбинация от параметри за едновременен запис е 36 μW/cm² за 632.8 nm и 17.69 μW/cm² за 532 nm .

Важно изискване на холографския запис с високо качество е равномерното разпределение на дифракционната ефективност по целия запис. За да оценим влиянието на Гаусовия профил на осветяващия лазерен сноп, проведохме тестов експеримент с разходящ сноп, който изцяло покрива холографска плака с размери $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$. Нормираните стойности на дифракционната ефективност за две обработени плаки са дадени в **Таблица 3.1**. Измерването на спектрите на пропускане бе направено по диаграмата, показана схематично на **Фиг. 3.17**. Както добре се вижда, равномерен запис се наблюдава само в централната част на холограмите при осветяване с пресечен Гаусов сноп. За да увеличим размерите на областта с равномерен запис при по-голям обект следва да се използва изравняващ оптичен филтър, който може да се изработи като ХОЕ.



Фиг. 3.16 Спектри на дифракционната ефективност на избелена отражателна холограма без раздуване за едновременен запис на 532 nm и 632.8 nm при експозиция 1 mJ/cm^2 ; повърхностната плътност налъчистия поток за 632.8 nm е 36 μW/cm^2



Фиг. 3.17 Схематична диаграма на спектрофотометрично измерване за характеризиране на хомогенността на холографския запис (кръгчетата показват точката на плаката, в която е направено измерването). Размерите на тестовата плака са $70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$. Разстоянията върху диаграмата са дадени в mm. Резултатите са дадени в **Таблица 3.1**

Таблица 3.1 Дифракционна ефективност в различни точки на холограмата, нормирана към максималната ѝ стойност

Точка	A	B	C	D	E	A'	B'	C'	D'	E'
Максимална дифракционна ефективност – 36 % за 532 nm и 45 % за 632.8 nm										
532 nm	0.66	0.74	0.8	1.00	1.00	0.70	0.79	0.92	0.91	0.66
632.8 nm	0.93	0.94	0.99	0.87	0.85	1.00	0.94	0.92	0.86	0.84
Максимална дифракционна ефективност – 35 % за 532 nm и 44 % за 632.8 nm										
532 nm	0.94	1.00	0.92	0.94	0.99	0.72	0.76	0.98	0.83	0.95
632.8 nm	0.92	1.00	0.96	0.99	0.92	0.99	0.96	0.97	0.89	0.94

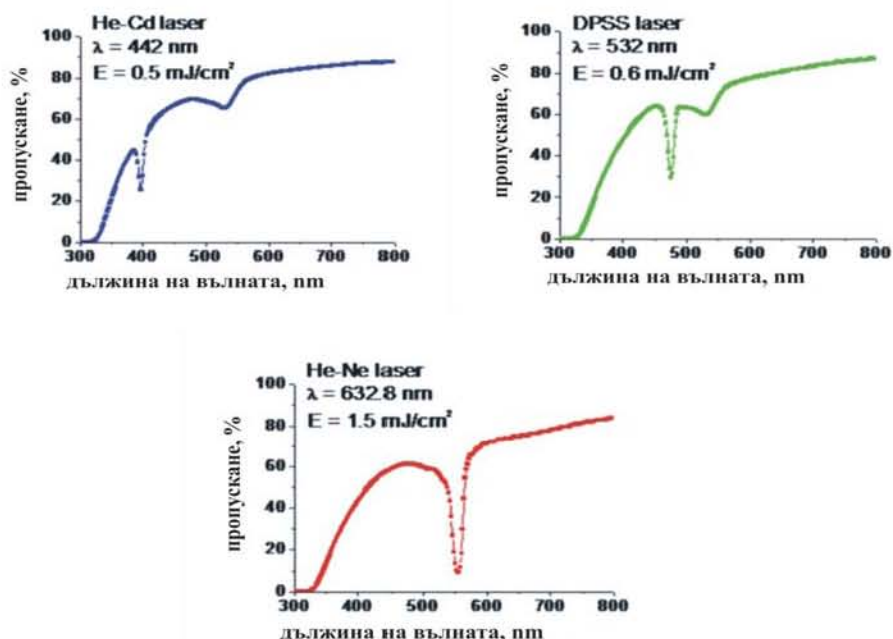


Фиг. 3.18 Цветна холограма - сандвична конструкция на художествен обект

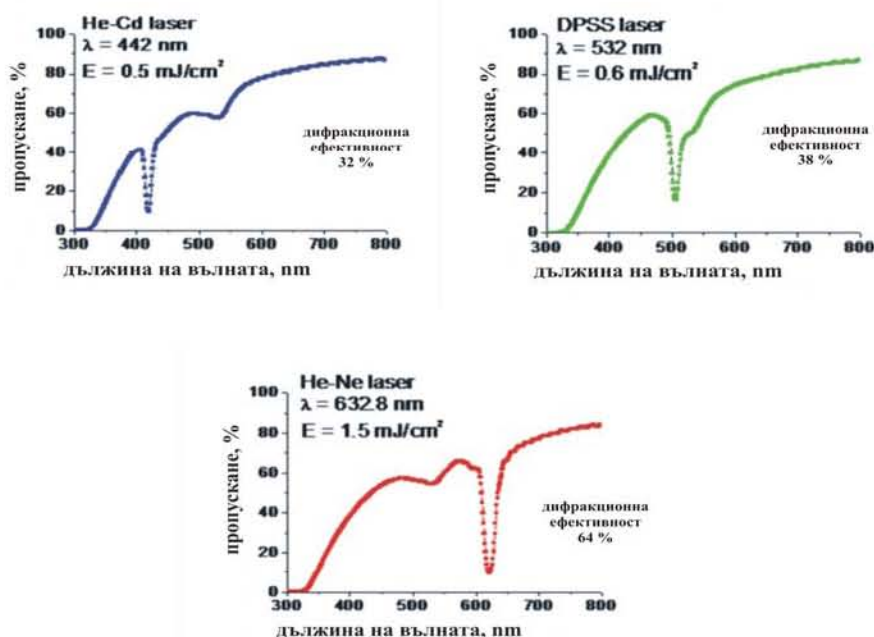
3.3. Цветови корекции на записани холограми

Специфичното химично проявяване на СХ материалите намалява обема на светлочувствителния слой, поради по-малкия обем на проявените сребърни зърна в сравнение с този на първоначалните СХ кристали. В резултат на това, условието за дифракция на Брег е изпълнено за обемни отражателни холограми при по-късите дължини на вълните в сравнение с дължината на вълната на запис. За възстановяване на оригиналния цвят от холограмите за дължината на вълната на запис, трябва да се компенсира свиването чрез подходящо раздуване преди окончателното изсъхване на самите холограми Фиг.3.19 . Тази задача от първостепенно значение е много сложна

поради многобройните фактори, които влияят на процеса, като първоначалното задъбване на слоя, стареенето на материалите, проявяващите процедури и т.н. В дисертацията докладваме резултати за процеса на раздуване на холограми при запис върху една и съща плака с различни дължини на вълните в червената, зелената и синята спектрални области.



a)



б)

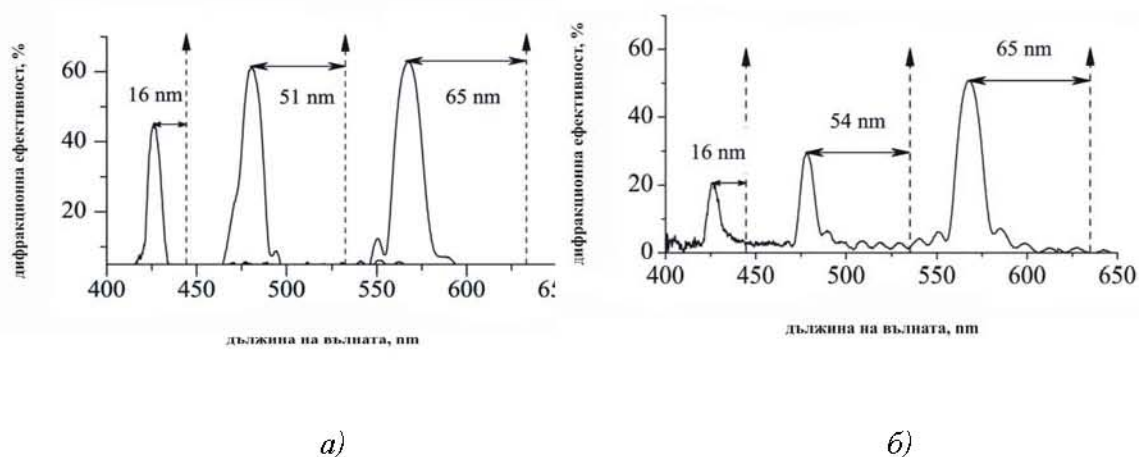
Фиг. 3.19 Спектри на пропускане преди „а)“ и след „б)“ раздуване, за холограми записани със син, зелен и червен лазер съответно при 442 nm, 532 nm и 632,8 nm

За едновременно запис на различни дължини на вълните използвахме оптичната схема на **Фиг.3.5**, позволяваща осъществяването на единични записи за всяка от дължините на вълните или смесени записи в комбинации по двойки лазери, както и с всичките три

лазера заедно. Като правило, при експониране на холограмата светлочувствителният слой трябва да е обърнат към обекта. За да изчислим експозиционната и спектралната зависимости на дифракционната ефективност за получените избелени холограми са измерени пропускащите спектри при възстановяване с нормално падаща насочена бяла светлина. От тях е определена спектралната зависимост на дифракционната ефективност, като са взети предвид Френеловите загуби и поглъщането на емулсията. Проявяването с SM-6 без фиксиране има това предимство, че води до по-малко свиване в сравнение с другите фиксиращи проявители. **Фиг. 3.20a** показва спектралната зависимост на дифракционната ефективност при запис с 442 nm, 532 nm и 632.8 nm. Фигурата представя като една графика спектрите, отговарящи на независими единични записи за трите дължини на вълните върху три холографски плаки.

Виждаме, че наблюдаваното свиване е различно за трите дължини на вълните. **Фиг. 3.20b** представя резултатът, който се получава при последователен запис върху една плака с трите дължини на вълните. Записите са направени в последователност от по-дългите към по-късите дължини на вълните. При последователния запис върху една плака дифракционната ефективност намалява. И в двата случая свиването отмества положението на дифракционния пик с около 16 nm в синята, 51-54 nm в зелената и 65 nm в червената спектрални области към по-късите вълни за възстановяване.

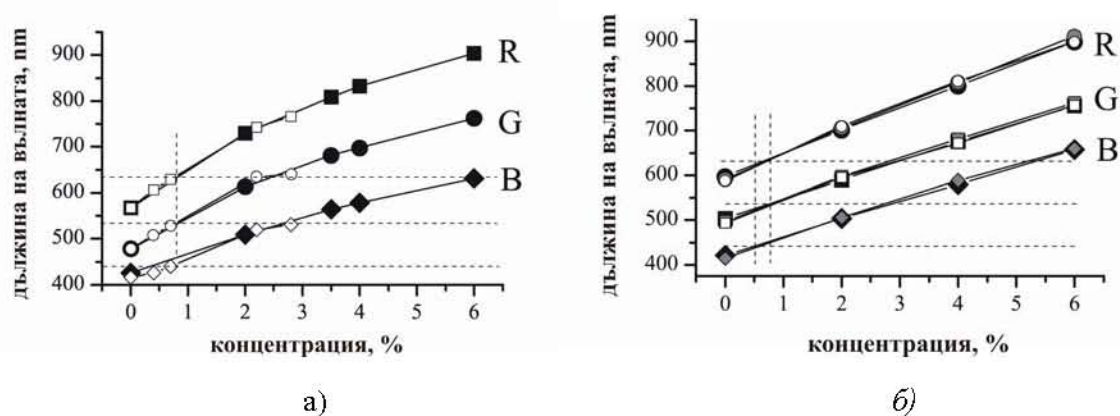
Едно от вероятните обяснения за различните отмествания на спектралните пикове по оста на дължината на вълната е възможният различен механизъм на формиране на интерференчните ивици за 442 nm, 532 nm и 632.8 nm в обема на записващия слой. Силното разсейване в синята спектрална област прави възможно формирането на синфазна интерференчна картина само в близост до повърхностния емулсионен слой, където светлочувствителният слой е в пряк контакт с все още синфазното лазерно лъчение, като по този начин се намалява ефективната дълбочина на светлочувствителния слой. Разсейването в червената и зелената спектрални области е повече или по-малко еднакво, което води до близки стойности на отместване на дължината на вълната на дифракционните пикове. Разликите в отместването за различните спектрални области могат да направят трудно правилното Бреговско възстановяване след приключване на процеса по раздуване на RGB отразителните холограми.



Фиг. 3.20 Спектрална зависимост на дифракционната ефективност за записи на 442 nm, 532 nm и 632.8 nm; (a) - независими записи на три различни холографски плаки за всяка от дължините на вълните, (б) - едновременно запис на три дължини на вълните върху една холографска плака

За да изследваме кинетиката на раздуването за възстановяване на RGB отразителни холограми, ние използвахме оптичната схема на **Фиг. 3.5**. За да се компенсира свиването на холограмите, те се обработват във вана с воден разтвор на колаген хидролизат, разтворен в различни концентрации за 5 минути при 20 °C (същата температура се поддържа при проявяването, избелването, миенето и сушенето на холографските плаки). На **Фиг.3.21** са представени резултатите, получени при последователно експониране на два записа върху една плака (**а**) и едновременно експониране на два записа върху една плака (**б**). Резултатите на **Фиг. 3.21** от двете плаки при даден вид експозиция са изобразени с кухи и пълни символи. Всяка записана холографска плака е начупена на няколко парчета, които са раздувани в различни вани при повишаване концентрацията на раздуващото вещество. Доброто съвпадение на ниво 0.8 % (вертикалната пунктирна линия) между резултатите за двете плаки на (**а**) и (**б**) е очевидно.

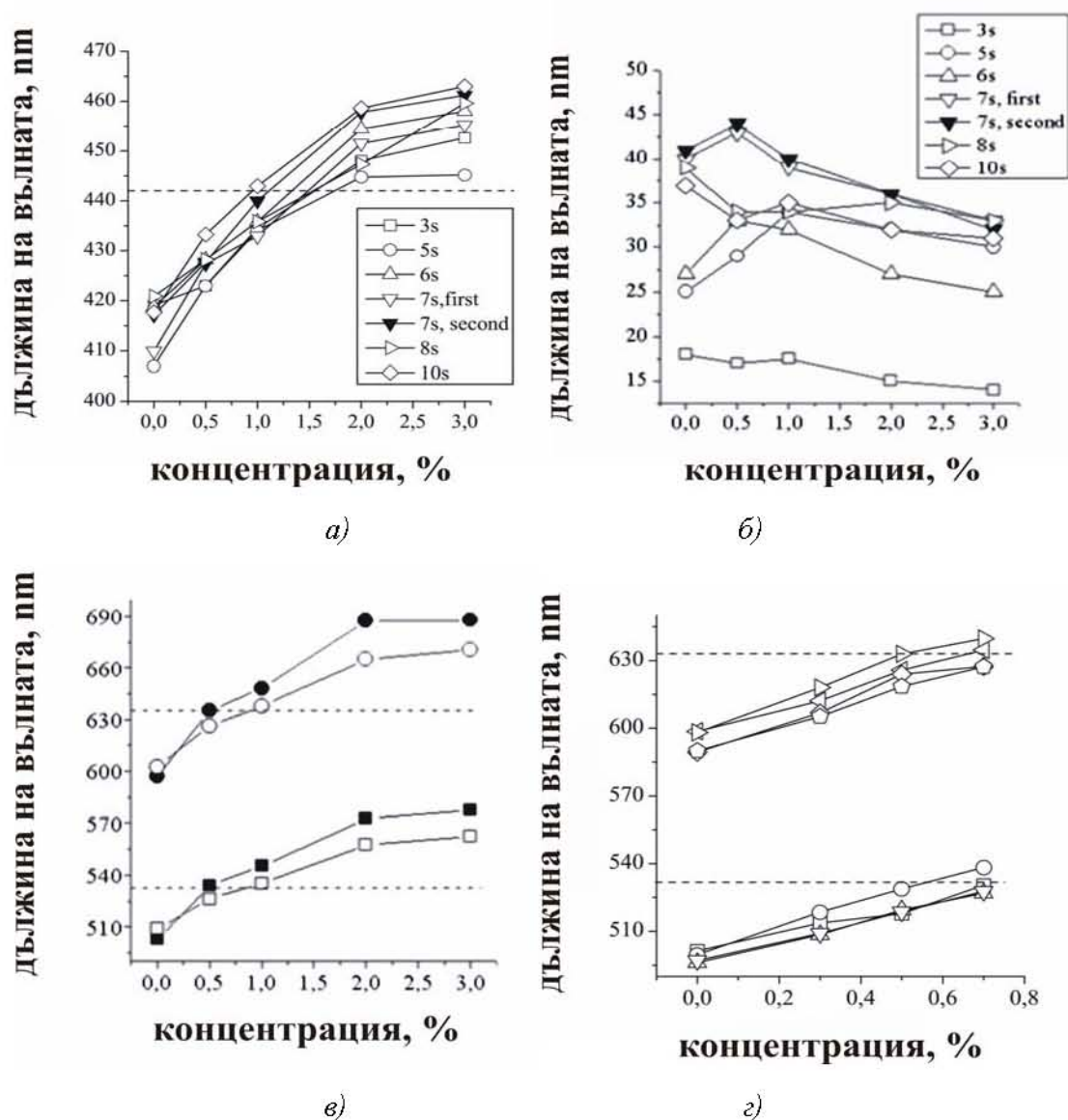
Налице е малка разлика в наклона на кривите, отговарящи на едновременен и последователен запис. Отместването на дифракционните пикове от действителното им положение при едновременния запис е по-малко от това при последователния запис. Като цяло, разликите в положението на пиковите, получени при запис с 442 nm, 532 nm и 632.8 nm, нарастват с концентрацията на раздуващия агент. Може да се направи заключението, че на практика коректно компенсиране за записите в зелената и червената спектрални области може да се постигне само с едно раздуване при последователно и едновременно експониране. За записа в синята спектрална област концентрацията на раздуващия агент, необходима за отместване на пика към истинското му положение е повече или по-малко една и съща на **Фиг. 3.21a** и малко по-ниска на **Фиг. 3.21б** в сравнение със съответните стойности за записите в червената и зелената области. Следва да се има предвид, че разлика от няколко нанометра може да разруши необходимия цвят баланси.



Фиг. 3.21 Кинетика на раздуването за възстановяване на RGB отразителни холограми при последователни (**а**) и едновременни (**б**) записи с дължина на вълните 442 nm , 532 nm и 632.8 nm (хоризонталните пунктирани линии представляват дължината на вълната на запис; кухите и запълнени символи съответно представят две различни измервания)

Както вече бе показано, ефективен начин за избягване на възможни усложнения вследствие на раздуването и за постигане на висока дифракционна ефективност е прибягването към сандвична структура със запис в зелената и червената области върху едната плака и единичен запис в синята област върху друга плака. В проведения от нас експеримент в случая на синия запис подложката на плаката е обърната към обекта. Резултатите след раздуването в този случай са показани на **Фиг. 3.22** . Записът на 442 nm бе направен при повърхностна плътност на лъчистия поток 106 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ и време на

експониране 3 s , 5 s и 7 s , и при 119 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ с време на експониране 6 s , 8 s и 10 s . В синята спектрална област правилната стойност на дължината на вълната при възстановяване се постига във воден разтвор на колаген хидролизат с концентрация от 1 % до 1.8 % . Може да се направи заключението, че при по-висока експозиция се изисква по-висока концентрация за достигане на дължината на вълната при записа. В случая на раздуване на холограмите с комбинация от записи в червената и зелената спектрални области направихме по-грубо оценяване за стойности на концентрацията 0.5 % , 1 % , 2 % , 3 % , 4 % и 5 % . Както при синия запис, се забелязва насищане за концентрации над 2 % .



Фиг. 3.22 Кинетика на раздуването за възстановяване на холограмите с дължината на вълната на записа: единичен запис на 442 nm (а) и промяна на дифракционната ефективност (б), едновременно записи на 532 nm и 632.8 nm (в и г).

На базата на тази по-груба преценка ние направихме втора серия от експерименти за концентрации, вариращи от 0 % до 0.8 % . Резултатите показват, че една и съща кинетика характеризира процеса на раздуване за двата записа. За разлика от резултатите, получени за запис върху една плака, коректно възстановяване за 532 nm и 632.8 nm бе постигнато при двойно по-ниска концентрация на раздуващия агент в

сравнение със синия запис. Наблюдава се добра възпроизводимост на характера на получаваните криви.

В обобщение, представените експерименталните данни за процеса на раздуване при многоцветните отразителни холограми, записани на светлочувствителни плаки HP-R доказват, че този светлочувствителен материал е подходяща среда за цветен холографски запис. Съчетавайки цветен запис и последващо преместване по дължина на вълната на дифракционните максимуми може да сведем до минимум хроматичните и геометричните аберации на реконструирания изображения, но за сметка на намаляване на дифракционната ефективност. Получените резултати за сандвична структура със записи на две плаки показват, че концентрацията на раздуващото вещество необходимо за правилната промяна в дължината на вълната на един син запис е два пъти по-голяма от съответната концентрация за едновременно червен и зелен запис на единични плаки. Наблюдаваният емпиричен резултат показва необходимостта от събиране на повече експериментални данни, за да се изясни сложният физико-химичен характер на раздуване и да се създаде надеждно работеща процедура за химическа промяна положението на дифракционните максимуми във вълновото пространство.

3.4. Анализ на цвето предаването и корекции на цветовия баланс

Както вече бе дискутирано, постигането на пълно съответствие между цветовете на реалния обект и възстановения холографски образ е трудна задача. Точното възпроизвеждане на оригиналния цвят изисква отклонението в цветовете координати да бъде по-малко от 0.1 % .За да се подобри качеството на възстановяване при отразителните холограми, ние предлагаме да се използва специално проектиран светлинен източник с управляем интензитет и цветови параметри. С такъв източник може да се осъществи по-плавна настройка на цветовия баланс, за да се осигури цветово възприемане по-близко до оригиналното.

За да проверим тази идея, ние записахме като сандвична структура (едновременен запис на 532 nm и 632.8 nm върху задната плака и единичен запис на 442 nm върху предната плака) холограма на великденско яйце и тестов обект „Machbeth Color Checker” , които бяха поставени в сандъч с пясък в близост един до друг. За възстановяване на холографския образ използвахме диодна матрица „Z-power LED” F50381 на фирмата „Seoul SemiConductors” [22]. За целите на нашия експеримент ние проектирахме специализирано захранващо устройство, което прави възможно :

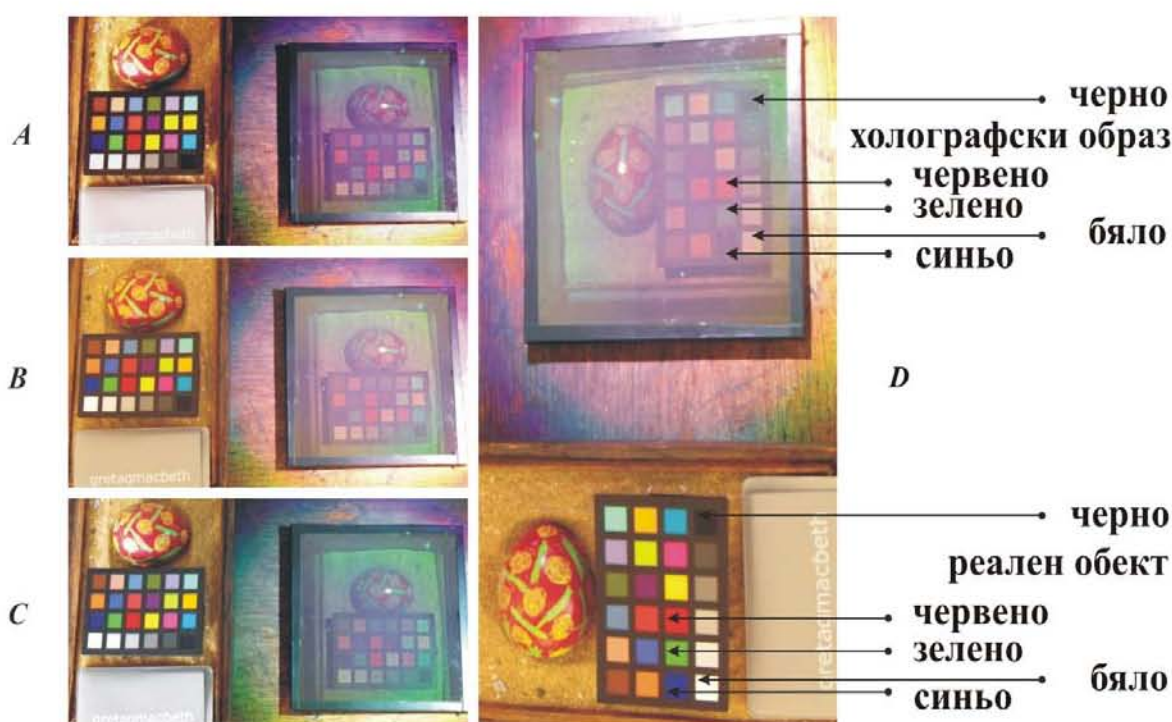
- 1) контролируема промяна на всяка от дължините на вълните на основните цветове;
- 2) контролируема промяна на излъчения интензитет за всеки от основните цветове.

Контролируемата промяна на спектралните характеристики на емисията може да се използва за компенсиране на неточностите при възстановяване на холографския образ чрез промяна както на дължината на вълната, така и на интензитета на червената, зелената и синята компоненти в спектъра на светлинния източник. Тук разбира се следва да се има предвид, че компенсирането на дължината на вълната е осъществимо в границите на няколко нанометъра.

Таблица 3.2 Сравнение на идентични цветни пространства за реален обект и неговия възстановен холографски образ

Образ	Възстановен цветен образ		Реален обект – образ <i>D</i>	
	Област (цвят) при дневно осветление	Цифрова стойност (8 bit) на RGB компонентите	Област (цвят) при дневно осветление	Цифрова стойност (8 bit) на RGB компонентите
A Осветяване с доминираща червена светлина.	Червена	R=171	Червена	R=202
		G=64		
		B=119		
	Зелена	R=125		G=7
		G=101		
		B=127		
	Синя	R=100		B=10
		G=61		
		B=112		
	Бяла	R=160	Зелена	R=87
		G=123		
		B=120		
B Осветяване с балансирана бяла светлина.	Червена	R=86		G=160
		G=85		
		B=92		
	Зелена	R=192	Синя	B=43
		G=108		
		B=134		
	Зелена	R=152		R=20
		G=130		
		B=143		
	Синя	R=141		G=34
		G=107		
		B=131		
C Осветяване с доминираща синя светлина.	Бяла	R=189	Синя	B=132
		G=150		
		B=136		
	Черна	R=126		R=207
		G=117		
		B=122		
	Червена	R=149	Бяла	G=207
		G=94		
		B=119		
	Зелена	R=99		B=207
		G=118		
		B=123		
	Синя	R=66	Черна	R=29
		G=90		
		B=111		
	Бяла	R=136		G=21
		G=138		
		B=128		
	Черна	R=74		B=20
		G=105		
		B=103		

За определяне на цветовите координати бяха направени фотографски снимки на обекта при осветяване с дневна светлина и на холографското му изображение, възстановено с пренастроваем RGB светлинен източник с 8 мегапикселов цифров фотоапарат „Panasonic”. Сравнението между цветните координати, взето съответно от обекта и възстановения образ, са дадени в **Таблица 3.2** и пояснени на **Фиг. 3.23**. Цветовите координати са получени за 8 бита цветно кодиране. Холографските изображения в рамките, означени с А, В, и С, са възстановени съответно при доминираща червена компонента в спектъра на светлинния източник (А), при балансирано осветяване с бяла светлина (В), и при доминираща синя компонента (С). Изображението D дава схемата на съпоставяне между идентичните области на реалния обект и на холографския образ. Най-доброто възстановяване отговаря на холографския образ В. Резултатите от този експеримент показват, че използването на цветен светлинен източник с контролируемо излъчване позволява да се подобрят основните цветове във възстановеното изображение за сметка на засилване на допълнителните цветове в дадена област на възстановения образ.



Фиг. 3.23 Измерване на цветовите характеристики на реален обект и на холографския му образ, където: А – реален обект при дневно осветление и холографският му образ, възстановен с доминираща червена компонента; В – реален обект при дневно осветление и холографският му образ, възстановен с балансирана бяла светлина; С – реален обект при дневно осветление и холографският му образ, възстановен с доминираща синя компонента; D – схема за сравняване на идентични области от реалния обект и холографския му образ. Всички стойности, измерени в посочените изображения А, В, С са дадени в **Таблица 3.2**.

Авторски приноси в дисертационния труд

Основните приносни резултати, получени в настоящата дисертация, са както следва:

1. Получени са експозиционните характеристики на свръхдребнозърнестата сребърно-халогенидна панхроматичната емулсия НР-Р, производство на ИОМТ-БАН, при запис върху единична холографска плака с една дължина на вълната и с повече от една дължини на вълната, като при многоцветния запис характеристиките са получени при последователно и едновременно експониране на плаката. Определени са експериментално дифракционните ефективности при единичен и едновременен запис върху единична холографска плака за конструиране на сандвична холограма.
2. Разработена е система за цветен холографски запис, позволяваща последователен или едновременен запис с повече от един лазерни източника и е тествана за запис на сандвични и трицветни холограми. Определени са параметрите на химичната обработка за цветово коригиране на отклика на проявените холограми при последователен или едновременен запис върху единична холографска плака с повече от една дължини на вълните. Осъществена е цветова корекция при възстановяване на холографското изображение чрез избор на подходящ източник на осветяване.
3. Разработени са двуканален и четириканален холографски оптични елементи за целите на оптичната метрология посредством съответно двоен холографски запис чрез експониране с две дължини на вълните и комбиниране на два двойни холографски записа чрез експониране с една дължина на вълната под еднакви ъгли от двете страни на нормалата към холографската плака. Записите са направени върху монохромна и панхроматична свръхдребнозърнести сребърно-халогенидни емулсии, производство на ИОМТ-БАН. Осъществено е контролируемо отместване на работните дължини на вълните на елементите в близката инфрачервена област чрез химична обработка със запазване на спектралната разлика между използваните дължини на вълните в случай на запис с две дължини. Разработен е холографски оптичен елемент на базата на бихромиран желатин, работещ като тесноивично отразяващо огледало.

Литература

- [R01] - D. Gabor, "A new microscopic principle", *Nature*, 161, 777–778, (1948).
- [R02] - G. Ackermann and J. Eichler, *Holography: A Practical Approach*, Wiley online library, published online, (2008).
- [R03] - T. Kreis, ed. *Handbook of holographic interferometry: Optical and Digital Methods*, Wiley-VCH GmbH&Co.KGaA: Weinheim; (2006).
- [R04] - P. Marquet, B. Rappaz, P. J. Magistretti, E. Cuche, Y. Emery, T. Colomb, and C. Depeursinge, "Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy," *Opt. Lett.* 30, 468–470 (2005).
- [R05] - E. Leith, Upatnieks, J. J. *Opt.Soc. Am. A*, 52, 1123–1130, (1962).
- [R06] - Y. Denisyuk, "On the reflection of optical properties of an object in the wavefield of light scattered by it", *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 144 (6), 1275, (1962).
- [R07] - Caulfield, J. (ed.) *The Art and Science of Holography: A Tribute to a Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk*, SPIE Press Monograph, (2003).
- [R08] - В. Съинов, „Изследвания в областта на изобразителната холография, холографската и лазерна интерферометрия“, дисертация за присъждане на научна степен „Доктор на физическите науки“, (2000).
- [R09] - V. Sainov and E. Stoykova, *Display Holography – Status and Future*, Chapter in a book “*Optical Imaging and Metrology: Advanced Technologies*”, First Edition. Edited by Wolfgang Osten and Nadya Reingand. © 2012 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp.93-117, (2012).
- [R10] - Y. Denisyuk, V. Sainov, and E. Stoykova, (eds) *Materials and systems for optical data storage and processing of information*, Proc. SPIE, 6252, 625202–625215, (2006).
- [R11] - U. Schnars and W. Jueptner, *Digital Holography* (Springer-Verlag, 2005), (2005).
- [R12] - J. Park, E. Stoykova, H. Kang, S. Hong, S. Lee, K. Jung, "Numerical reconstruction of full parallax holographic stereograms", *3D Research* 03, 03:6, (2012).
- [R13] - Geola Digital UAB, Company (2011) URL <http://www.geola.com> (accessed December 2012), (2012).
- [R14] - E. Stoykova, F. Yarash, H. Kang, L. Onural et.al., "Visible reconstruction by a circular holographic display from digital holograms recorded under infrared illumination," *Opt. Lett.* 37, 3120-3122, (2012).
- [R15] - T. Kubota, "Recording of High Quality Color Holograms", *Appl. Opt.*, 25, 4141–4145, (1986).
- [R16] - Съинов В., Съинов С., Изобразителна холография, (1986).
- [R17] - H. Bjelkhagen, E. Mirlis, "Color holography to produce highly realistic three-dimensional images", *Appl. Opt.* 47(4), A123-A133, (2008).
- [R18] - Y. A. Sazonov, P. I. Kumonko, "Holographic materials produced by the Micron plant at Slavich," in *Sixth International Symposium; on Display Holography*, T. H. Jeong, ed., Proc. SPIE 3358, 31–40, (1998).
- [R19] - Y. Gentet and P. Gentet, "Ultimate emulsion and its applications: a laboratory made silver-halide emulsion of optimized quality for monochromatic pulsed and full-color holography", Proc. SPIE 4149, 56–62, (2000).
- [R20] - J. Kim, B. Choi, S. Kim, J. Kim, H. Bjelkhagen, and N. Phillips, "Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part 2. Reflection holographic optical elements", *Appl. Opt.*, 40, 622–632, (2001).
- [R21] - M. S. Percy and L. Hesselink, "Wavelength selection for true color holography," *Appl. Opt.* 33, 6811–6817, (1994).
- [R22] - Seoul Semiconductor, "Z-POWER LED Series – Technical Datasheet for F50381", SEOUL SEMICONDUCTOR CO., LTD Rev 02 –09/2006, (2006).

**Пълно библиографско описание на публикуваните статии и доклади,
включващи резултати от дисертационния труд**

Публикации с импакт-фактор :

- [A1] – **B. Ivanov**, M. Shopova, E. Stoykova, V. Sainov, “Reconstruction of silver halide volume reflection holograms at the wavelengths of recording”, *Optica Applicata*, Vol. XLII, No. 3, 2012, DOI: 10.5277/oa1203, (2012).
- [A2] - **B. Ivanov**, E. Stoykova, T. Petrova, V. Sainov “Exposure characteristics of silver-halide volume reflection holograms”, *Proc. Bulg. Acad. Sci.*, 64 (3), 345-351, (2011).
- [A3] - V. Sainov, K. Zdravkov, E. Stoykova, **B. Ivanov**, D. Nazarova, B. Markova, S. Sainov, “Multi-color holographic recording”, *JOAM* 2011, 1448-1451, (2009).
- [A4] - Ts. Petrova, **B. Ivanov**, K. Zdravkov, D. Nazarova, E. Stoykova, G. Minchev, V. Sainov, “Basic holographic characteristics of panchromatic light sensitive material for reflective auto stereoscopic 3D display”, *EURASIP Journ. Adv. Sign. Process. Issue January, Capture, Transmission, and Display of 3D Video*, Article No. 2, ISSN:1110-8657, (2009).

Публикации със SJR :

- [A5] - **B. Ivanov**, M. Shopova, E. Stoykova, V. Sainov, “Four channel holographic infrared optical element”, *Proc. SPIE* 7747, 77470K-1-8, (2011).

Доклади от конференции :

- [A6] - V. Sainov, S. Sainov, Ts. Petrova, E. Stoykova, K. Zdravkov, D. Nazarova, **B. Ivanov**, “Silver-halide materials for monochrome and multi-color holographic recording”, oral presentation at Int. Symp. “The 60th anniversary of the invention of holography”, Springfield, MA, USA, 27-29 Oct., published in *Proc. of SEM*, 251-258, (2008).
- [A7] - Ts. Petrova, **B. Ivanov**, K. Zdravkov, D. Nazarova, E. Stoykova, G. Minchev, V. Sainov, “Basic holographic characteristics of panchromatic light sensitive material for reflective auto stereoscopic 3D display”, *Proc. IEEE of 3D TV conference*, 4-7 May, Kos, Greece, 4 pages, ISBN: 978-1-4244-0722-4, (2007).

Забелязани цитирания

Работата :

- [A4] - Ts. Petrova, **B. Ivanov**, K. Zdravkov, D. Nazarova, E. Stoykova, G. Minchev, V. Sainov, "Basic holographic characteristics of panchromatic light sensitive material for reflective auto stereoscopic 3D display", EURASIP Journ. Adv. Sign. Process. Issue January, Capture, Transmission, and Display of 3D Video, Article No. 2, ISSN:1110-8657, (2009).

се цитира в :

1. J. Desse and J. Tribillon, "Real-time three-color reflection holographic interferometer," Appl. Opt. 48, 6870-6877 (2009).
2. D. Brotherton-Ratcliffe, S. Zacharovas, R. Bakanas, J. Pileckas, A. Nikolski, J. Kuchin, Digital holographic printing using pulsed RGB lasers, *Opt. Eng.* 50(9), 091307, doi:10.1117/1.3596182, (August 03, 2011).
3. Yu-Hsiang Cheng, Study of optical switching and development of replication process for disk-type hologram, Master's Thesis, Department of Optics and Photonics, National Central University Library Theses@Dissertations System (2012).
4. J. Desse, Real-Time Colour Holographic Interferometry (from Holographic Plate to Digital Hologram), Chapter 1, Advanced Holography – Metrology and Imaging, Edited by Izabela Naydenova, ISBN 978-953-307-729-1, Hard cover, 374 pages, Publisher: InTech, Published: November 09, 2011.

Представяне на резултатите в дисертационния труд на конференции

1. 3D TV conference, 4-7 May, Kos, Greece, 2007 .
2. Int. Symp. "The 60th anniversary of the invention of holography", Springfield, MA, USA, 27-29 Oct. (2008) .
3. 16th Intl. School on Quantum Electronics, Nessebar, 20-24 September, 2010 .
4. III International School and Conference on *Photonics* August 29 - Belgrade, Serbia, September 2, 2011 .

Специализации

1. Специализация във Физико-техническият институт „А. Йоффе“ в групата на Юрий Николаевич Денисюк, Ст. Петербург, ноември 2005 .
2. Специализация в Университета на Калабрия, сътрудничество по проект „Опазване на културното наследство“, Ренде, май 2007 .
3. Участие в изложението „Дни на България в Русия“, Москва, май 2009 .

Преподавателска дейност

1. Годишен учебен стаж на ученици IV курс от Техникума по Фина Механика и Оптика „М. В. Ломоносов“, от 2002 до сега.
2. Лабораторни упражнения по холография за магистри от Катедрата по Квантова Електроника, СУ „Кл.Охридски“, 2008-2011 .
3. Ръководител на дипломна работа на тема „Изработване на холограми и приложението им в полиграфията“, на дипломант от ХТМУ-София, Мариана Шопова, защитила с отличен през 2009 .





АВТОРЕФЕРАТ

на

Бранимир Людмилов Иванов

