

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Марина Д. Симовић-Павловић

**Радиомертарски детектор базиран на
биолошким структурама-МЕМС/НЕМС**

докторска дисертација

Београд, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Marina D. Simović-Pavlović

**Radiometric detector based on biological
structures - MEMS / NEMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

Комисија за преглед и одбрану:

Ментори:

др Дејан М. Мицковић, редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет

др Дарко М. Васиљевић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за физику

Чланови комисије:

др Предраг Елек, редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет

др Вера Павловић, редовни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет

др Ивана Тодић, ванредни професор, Универзитет у Београду-Машински факултет

др Милош Марковић, доцент, Универзитет у Београду-Машински факултет

др Бранко Коларић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за физику

Бокију...

Посвећујем ти цео свој живот!

ЗАХВАЛНИЦА

Посебну захвалност дугујем ментору, проф. др Дарку Васиљевићу, на пруженој подрици у досадашњем научном и стручном усавршавању као и на помоћи приликом реализације Дисертације. Такође се захваљујем ментору проф. Др Дејану Мицковићу на труду, пренесеном знању и пруженим могућностима.

Велику захвалност желим да изразим проф. др Бранку Коларићу чије су идеје и залагање на усмеравању мог рада биле од непроцењиве вредности.

Захваљујем свим члановима комисије на подрици и на корисним сугестијама у току прегледа Дисертације.

Захваљујем се Душану Грујићу на безусловној подели знања и увођењу у експеримент. Хвала Бојани Бокић и Маји Пањако на веома корисним саветима.

Хвала мојим колегама из Телеоптика на подрици и пренетом знању, како у послу, тако и у животу: Слоба Кочић, Влада Јефтовић, Милан Настић, Жижжа, Ивана...

Хвала Ана Марији из студентске службе Машинског факултета, на огромном стрпљењу и професионалности са великом дозом емпатије.

Хвала свим мојим пријатељима који су уз мене у добру и у злу, а највише се захваљујем мојој породици. Хвала мами и тати на свим могућностима које су ми пружили у животу, на љубави и на прелепом одрастању уз моју браћу. Волим вас. Хвала Стеви што је ту, што постоји, јер нас двоје морамо да будемо троје (разумеће). Хвала мом мужу што је баиш такав какав треба да буде, а посебно му хвала на нашој деци, Душану, Јањи и Гоги, која су моја највећа радост и утеха, моја непресушна инспирација.

Тетка,

Теби хвала што си била мој највећи ослонац и моја мотивација:

Сваку аксиому си ми усадила, као и теорему доказала...

Или ме натерала да сама нађем доказ.

*Пратила ме кроз све животне једначине и усмеравала да се не погубим
у неједначинама, већ да спознам ширину њихових решења.*

Сабирали смо искуства, одузимали невоље, множили љубав и делили срећу...

Срећа је била наш пресек, а ми смо били унија...

Ти си била наша акција, ми смо твоја реакција!

*Можемо да избројимо године, догађаје, проблеме, али равнотежу одржава
бесконачност наших осећања.*

Твоје речи „све око нас је физика“ – Све око нас си ти!

ПОДАЦИ О ДИСЕРТАЦИЈИ

Радиометарски детектор базиран на биолошким структурама-МЕМС/НЕМС

Тема је одобрена на захтев Машинског факултета бр. 1437/4, од стране Универзитета у Београду на седници 23. јануара 2020. године, Одлуком под бројем: 61206-159/2-20

Сажетак:

Инфрацрвени детектори су у великој употреби данас и имају примену на разним пољима. Посебну примену термовизија има у војне сврхе. Термалне камере формирају слику користећи инфрацрвено зрачење, а формирана слика детектованог зрачења назива се термограм. Како сваки објекат са температуром изнад апсолутне нуле емитује инфрацрвено зрачење, термографија је метода посматрања објеката са или без видљивог осветљења. Ове карактеристике чине термовизијске уређаје ефикасним при ноћном осматрању и осматрању у условима смањене видљивости.

Постоје две велике групе инфрацрвених детектора, термални и квантни. Термални детектори су, иако дају спорији одговор, практичнији за примену јер не захтевају хлађење, односно раде на собној температури. Самим тим, њихова производња је једноставнија и приступачнија.

Константна је потреба за проналажењем нових механизма-сензора, који ће превазићи досадашња ограничења детекције термалног зрачења. Један од начина детекције тзв. топлотног (термалног) електромагнетног зрачења је заснован на употреби радиометарског ефекта. Ради се о термо-механичкој појави која настаје када је електромагнетно зрачење апсорбовано на комаду материјала, тако да се на њему формира градијент температуре, док је истовремено средњи слободни пут молекула окружујућег гаса приближно једнак карактеристичној димензији комада материјала.

Радиометарски ефекат је заснован на чињеници да молекули окружујућег гаса односе много више механичког импулса са топлије стране материјала у односу на хладнију страну, чиме се формирају силе које називамо радиометарске, а које доводе до механичког померања материјала. Претварање енергије невидљивог електромагнетног зрачења у механички померај микромеханичког детекционог система, и то таквог да је величина механичког помераја сразмерна енергији, мери се методом холографске интерференције.

Крила различитих лептира коришћена су за конструисање новог инфрацрвеног сензорног система. Коришћена је промена спектра боја на природној структури крила лептира, изазвана термалним утицајем, и фотофоретски ефекат као последица процеса. Истраживање је обухватило одређивање утицаја различитих параметара на ефекат и довело је до значајних закључака у правцу једнозначног одређивања главног фактора који одређује јачину фотофоретског ефекта, коругацију биофотонске структуре.

Дисертација, односно њен крајњи резултат у виду предлога радиометарског детектора базираног на биолошким структурама, је моћна комбинација спознаје до сада неоткривених својстава ефекта термофорезе у теоријском и експерименталном смислу и практичне, инжењерске примене и пласирања холографске методе за иновативна испитивања биолошких и других нано материјала, односно посматрања динамике нано процеса.

Кључне речи: термална камера, радиометарски детектор, ИЦ зрачење, холографија, Био НЕМС, фотофореза

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Системи наоружања

DISERTATION DATA

Radiometric detector based on biological structures - MEMS / NEMS

Abstract:

Today, infrared detectors are broadly used for various applications. Thermal imaging has a particular application for military purposes. Thermal cameras form an image using infrared radiation, and the created image of detected radiation is called a thermogram. Since every object with a temperature above absolute zero emits infrared radiation, thermography observes entities without the need for additional illumination. These features make thermal imaging devices effective at night and in low visibility conditions.

There are two significant groups of infrared detectors, thermal and quantum. Although thermal detectors give a slower response, they are more practical because they operate at room temperature without the need for additional cooling, and their manufacturing is more straightforward and less expensive.

However, there is a constant need to find new mechanisms, which will overcome the current limitations in the detection of thermal radiation. One of the new ways to detect thermal radiation is based on the radiometric effect. The radiometric effect is a thermo-mechanical phenomenon that occurs when electromagnetic radiation is absorbed on a piece of material, so the temperature gradient is formed on it. At the same time, the mean free path of the surrounding gas molecules is approximately equal to the characteristic dimension of the material architecture or sub-architecture.

Since the molecules of the surrounding gas carry much more mechanical impulse from the warmer side of the material compared to the colder side, thus forces called radiometric occur, which leads to mechanical displacement. Shortly, the radiometric detector is intended to detect invisible parts of the electromagnetic radiation spectrum, harnessing motions of submillimeter size particles caused by interaction with surrounding gas atoms or molecules. The conversion of the energy of invisible electromagnetic radiation into mechanical displacement is detected by the holographic method.

The complex nanoarchitecture of butterflies' wings offers the possibility of combining the power of photonics with the chance of detecting infrared radiation by molding the photophoretic effect. The strength of the photophoretic response is the function of nano-corrugation of natural photonic structures, their size, and shape and that is the main findings of the research presented in this thesis.

The result of this dissertation, ie a radiometric detector proposal based on biological structures, is a powerful combination of knowledge of hitherto undiscovered properties of the thermophoretic effect in theoretical and experimental terms and practical, engineering application of holographic methods for innovative testing of biological nanomaterials and observations of nano process dynamics.

Key words: Thermal camera, Radiometric detector, IR radiation, Holography, Bio-MEMS, Photophoresis

Scientific field: Mechanical engineering

Scientific subfield: Weapon systems

САДРЖАЈ

1.	УВОД	1
2.	ИСТОРИЈСКИ КОНТЕКСТ И СТАЊЕ У СВЕТУ	3
2.1	Појам и дефиниција детектора	3
2.2	Историјски контекст.....	3
2.3	Стање у свету данас.....	7
3.	ТЕОРИЈСКИ АСПЕКТИ.....	9
3.1	Фотофореза/Термофореза	9
3.1.1	Дефиниција појмова	9
3.1.2	Историјски преглед	9
3.1.3	Физика фотофоретског ефекта	11
3.1.4	Фотофоретски ефекат на биофотонским наноструктурама	11
3.2	Холографија	14
3.2.1	Историјска перспектива	14
3.2.2	Основи таласне оптике.....	15
3.2.3	Холографија – од аналогне до дигиталне.....	18
3.2.4	Математички модел.....	18
3.2.5	Формирање холограма	20
3.2.6	Холографска интерферометрија.....	20
4.	ЕКСПЕРИМЕНТ	22
4.1	Холографска поставка.....	22
4.2	Математички модел као основ за писање главног програма	24
4.2.1	Дифракциони прорачун	24
4.2.2	Описивање Френелове дифракције применом методе конволуције	26
4.2.3	Френелова дифракција – Фуријеов облик.....	26
4.2.4	Померена Френелова дифракција	27
4.3	Ток истраживања	29
4.3.1	Биолошка карактеризација	29
4.3.2	Почетна испитивања	31
4.3.3	Додатне процедуре	32
4.4	Анализа резултата истраживања	34
5.	ДЕТЕКТОР – ОСВРТ ИЗ УГЛА МАШИНСТВА: МЕМС/НЕМС.....	43
5.1	Микро/Нано електромеханички системи – МЕМС/НЕМС	43
5.1.1	Увод у МЕМС/НЕМС и њихов значај	43
5.1.2	Детектор као конкретан пример МЕМС/НЕМС	44
5.2	МЕМС/НЕМС уређаји у производњи.....	49
5.2.1	Избор материјала за израду МЕМС/НЕМС	49

5.2.2 Тродимензионална штампа (адитивни инжењеринг).....	51
5.3 Биоинспирисани НЕМС – предности проналаска инспирације у природи	52
6. ПРИМЕНА У ВОЈНОЈ ТЕХНИЦИ	55
6.1 Структура термовизијских уређаја	57
6.1.1 Зрачење	58
6.1.2 Деградација сигнала	58
6.1.3 Оптички систем	58
6.1.4 Скенер.....	61
6.1.5 Детектор	62
6.1.6 Систем за хлађење	62
6.1.7 Електронска обрада сигнала.....	63
6.1.8 Екран.....	63
6.2 Резолуција термовизијских система	63
6.2.1 Просторна резолуција	63
6.2.2 Температурна резолуција термовизијских уређаја	64
6.3 Карактеристике термовизијских уређаја	65
6.3.1 Оптичке карактеристике	66
6.3.2 Оптичелектронске карактеристике	66
6.4 Термовизијски уређаји у војним системима	67
6.4.1 Примена термовизије у копненим војскама (НАТО пакт и Војска Србије)	67
6.4.2 Примена термовизије у ратном ваздухопловству (РВ) и противваздушној одбрани (ПВО)	68
6.4.3 Ратна морнарица	71
6.4.4 Телеоптик-Жироскопи	72
7. ИНЖЕЊЕРСКА ПРИМЕНА	75
7.1 Конструктивна документација	75
7.2 Технолошка документација.....	77
8. ЗАКЉУЧАК	79
ЛИТЕРАТУРА	80

САДРЖАЈ СЛИКА

Слика 2. 1 Мелонијев термопар	5
Слика 2. 2 Примери савремених микроболометара	5
Слика 3. 1 „ТЕМ“ снимак крила лептира <i>Morpho didius</i> (Hopffer 1874)	12
Слика 3.2 Холограм.....	14
Слика 3. 3 Шематски приказ раванског електромагнетног таласа.....	15
Слика 3. 4 Конструктивна интерференција	16
Слика 3. 5 Деструктивна интерференција.....	17
Слика 3. 6 Холографска поставка	18
Слика 4. 1 Шема холографског сетапа	23
Слика 4. 2 Геометријска основа дифракционог прорачуна.....	25
Слика 4. 3 Шема дискретизације	25
Слика 4. 4 Лептири. Горњи ред, с лева на десно: <i>Morpho didius</i> (Fabricius, 1807), <i>Morpho peleides</i> (Kollar, 1850), <i>Morpho portis</i> (Hubner, 1821), <i>Apatura</i> (Fabricius, 1807); Доњи ред, с лева на десно: <i>Pieris rapae</i> (Linnaeus, 1758), <i>Calophrys rubi</i> (Linnaeus, 1758), <i>Issoria lathonia</i> (Linnaeus, 1758), <i>Polyommatus</i> (Latreille, 1804)	30
Слика 4. 5 Венеце у структури крила лептира	31
Слика 4. 6 Лево: пример холограма, Десно: пример холографске реконструкције.....	31
Слика 4. 7 Пуњени лептири (с лева на десно): <i>Neobotoia glaucippe</i> (Linnaeus 1758.), иста врста пуњена CuS, иста врста пуњена CuS и посута честицама злата	33
Слика 4.8 Развој холографске реакције у функцији температуре	35
Слика 4.9 Дијаграм зависности холографског одговора од таласне дужине ласера, за хитински филм	36
Слика 4.10 Микроскопски снимак; Крило лептира Апатура, страна 1: увећање 300х (лево) и 10000х (десно).....	36
Слика 4.11 Микроскопски снимак; Крило лептира Апатура, страна 2: увећање 300х (лево) и 6000х (десно).....	37
Слика 4.12 Микроскопски снимак; Крило лептира <i>Morpho didius</i> , страна 1: увећање 300х (лево) и 4000х (десно).....	37
Слика 4.13 Микроскопски снимак; Крило лептира <i>Morpho didius</i> , страна 2: увећање 300х (лево) и 10000х (десно).....	37
Слика 4.14 Микроскопски снимак; Пуњено крило лептира <i>Neobotoia glaucippe</i> , страна 2: увећање 300х (лево) и 6000х (десно).....	38
Слика 4.15 Дијаграм зависности загревања узорка од таласне дужине (са додатним дијаграмом зависности рефлексије од таласне дужине)	39
Слика 4.16 Фазни дијаграми за четири таласне дужине.....	40
Слика 4.17 Упоредни дијаграм зависности фазе од таласне дужине за лептире <i>Morpho didius</i> и <i>Apatura</i>	41
Слика 4.18 Дијаграм фазе за различите таласне дужине (лево) и максимуми фазног профила (десно) мерени на крилу модификованог лептира <i>Neobotoia glaucippe</i>	41
Слика 4.19 Фазни дијаграми чији су опадајући делови фитовани експоненцијалном функцијом (<i>Apatura</i>)	42
Слика 5. 1 МЕМС/НЕМС.....	43
Слика 5. 2 Општи блок дијаграм оптоелектронског детекторског система	44
Слика 5. 3 Шема детекције зрачења	45
Слика 5. 4 Структура термалног детектора	45
Слика 5. 5 Шема термопара.....	47
Слика 5. 6 Шема електричног кола болометра.....	47
Слика 5. 7 Шема пироелектричног детектора	48
Слика 5. 8 Принцип литографије	50
Слика 5. 9 Тродимензионална штампа	51

Слика 5.10 Биоинспирисан НЕМС.....	53
Слика 6. 1 Блок шема термовизијског уређаја.....	57
Слика 6. 2 Шема функционисања термовизијског уређаја	58
Слика 6. 3 Шема термовизијског уређаја са скенирањем у простору лика	62
Слика 6. 4 Термовизијски уређај за пешадијско наоружање са краја 20. века.....	68
Слика 6. 5 Термовизијски нишан NT-75	68
Слика 6. 6 Видљиви (плава фотографија) и термовизијски (црне слике) изглед ваздушног циља.....	70
Слика 6. 7 Мултисензорска платформа за осматрање ваздушног простора у Војсци Србије.....	70
Слика 6. 8 Термовизијске слике генерисане из ваздухопловног термовизијског уређаја	70
Слика 6. 9 Термовизијска слика (лево) и класична фотографија (десно) поморских циљева.....	71
Слика 6. 10 Различити модели бродских осматрачких платформи са нехлађеним термалним детекторима.....	71
Слика 6. 11 Шема панорамског осматрања уређаја са хлађеним детектором NN8485-360	72
Слика 6. 12 Блок дијаграм система за тестирање „MS300“.....	73
Слика 7.1 Конструктивни цртеж димензионисане јелкице (све мере су дате у микрометрима)	75
Слика 7.2 Идејни цртеж детекторског чипа.....	76
Слика 7.3 Шема предложеног детектора	77

САДРЖАЈ ТАБЕЛА

Табела 3.1 Дефиниције параметара за једначине 3.1 до 3.3	10
Табела 3.2 Дефиниције параметара за једначине 3.4 до 3.8	13
Табела 3.3 Дефиниције параметара за једначине 3.9 до 3.17	17
Табела 3.4 Дефиниције параметара за једначине 3.18 до 3.22	19
Табела 4.1 Дефиниције параметара за једначине 4.1 до 4.13	28
Табела 4.2 Димензије структурних елемената крила лептира	38
Табела 4.3 Табела израчунатих времена релаксације фазе	42
Табела 5.1 Дефиниције параметара за једначине 5.1 до 5.4	46
Табела 6.1 Упоредни приказ основних концепата термовизијских уређаја	56
Табела 6.2 ИЦ материјали.....	59
Табела 6.3 Упоредни приказ својстава ИЦ материјала.....	60
Табела 6.4 Фактори утицаја на процес формирања слике термовизијског уређаја [75]..	67
Табела 7.1 Табела - саставница елемената склопа детектора.....	77

СКРАЋЕНИЦЕ

ЗД	Тродимензионално
БиоМЕМС	Биомедицински МЕМС
БиоНЕМС	Биомедицински НЕМС
ИЦ	Инфрацрвено
МЕМС	Микро-Електро-Механички Системи
МОЕМС	Микро-Опто-Електро-Механички Системи
НАТО	Северноатлантски савез
НЕМС	Нано-Електро-Механички Системи
ПА	Против-Авионски
ПВО	Противваздухопловна Одбрана
ПО	Против-Оклопни
РВ	Ратно Ваздухопловство
ТТЗ	Тактичко Технички Захтеви
УВ	Ултраљубичасто

CCD	Charge-Coupled Device
CM	Common Modules
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CWO	Computational Wave Optics
DLP	Digital Light Processing
DOE	Diffraction Optical Element
FFT	Fast Fourier Transformation
FLIR	Forward Looking Infra-Red
FPN	Fixed Pattern Noise
GPU	Graphics Processing Unit
GWO	Grey Wolf Optimization
LED	Light-Emitting Diode
LIGA	Lithographie, Galvanik und Abformung

LO	Low Observable
MDT	Minimum Detectable Temperature
MDTD	Minimum Detectable Temperature Difference
MRC	Minimum Resolvable Contrast
MRT	Minimum Resolvable Temperature
MRTD	Minimum Resolvable Temperature Difference
MTF	Modulation Transfer Function
NEI	Noise Equivalent Illuminance
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
OLED	Organic LED
SMT	Systeme Modulaire Thermique
TEM	Transmission Electron Microscopy
TICM	Thermal Imaging Common Modules
TOD	Triangle Orientation Detection
TTP	Targeting Task Performance

1. УВОД

Наука и технологија неретко траже инспирацију у биолошком окружењу. Захваљујући веома практичним и оригиналним решењима која су присутна у природи, и ова дисертација, односно предмет њеног истраживања је биоинспирисан. Проучаван је ефекат термофорезе, тј. како температура утиче на динамику система. Идеална структура за ово истраживање је пронађена код лептира (*Morpho didius*, Hopfer 1874; *Apatura*, Fabricius 1807).

Шира област истраживања у оквиру дисертације је повезана са применом инфрацрвеног (ИЦ) неконтактнoг снимања, односно термографијом у машинским, војним технологијама. Термалне камере су веома скупи уређаји, међутим, њихова цена је условљена и у складу са веома сложеним системом. За разлику од класичних камера код којих слика настаје деловањем светлости на осетљиву површину, у овом случају, топлотно зрачење објеката и инфрацрвене технологије дају резултат. Принцип рада оваквих уређаја започиње са специјалним сочивима која фокусирају инфрацрвено зрачење емитовано од свих објеката у околини. Поменуто зрачење се фокусира и усмерава на детектор осетљив на инфрацрвено зрачење, који је централни елемент оваквог система. Детектор региструје зрачење, преводи га у електрични сигнал, сваком сигналу додељује релативну боју (скалу обојености) која се приказује на термалној слици-термограму, а затим и на екрану као коначна слика. Термографија из дана у дан проналази нову примену, пристижу савременије идеје и модели, постаје незаобилазан део технологије и производње [1] [2]. Идеја је да се пронађу нови механизми-сензори, који ће превазићи досадашња ограничења детекције термалним зрачењем.

Циљ проучавања се своди на решавање проблема ефикасне детекције невидљивог електромагнетног зрачења, претварањем његове енергије у механички померај микромеханичког детекционог система, тако да је величина механичког помераја сразмерна енергији невидљивог електромагнетног зрачења и да је померај довољно велики да омогућава мерење различитим оптичким методама. Направа која би интегрисала описане функције назива се радиометарски детектор.

У другом поглављу сажет је историјски контекст инфрацрвене детекције, од првих момената уочавања инфрацрвеног зрачења ка развоју савремених, ефикасних материјала за примену на овом пољу. Такође је дат преглед стања у свету у овој области и тренутне могућности технологије.

Треће поглавље даће теоријски аспект ове дисертације. Најпре ће бити објашњен појам термофорезе и разоткривена друга начела која чине темеље истраживања. Теоријски добро савладан феномен, представља тезу водилу код практичног (експерименталног) дела истраживања. Други део овог поглавља дефинисаће поступак холографије, методе која је кључни алат овог истраживања.

Четврто поглавље говори о конкретном експерименту. Најпре је дато образложење коришћења комплексне и релативно скупе технологије, а затим је шематски приказана лабораторијска поставка и анализа предности и недостатака наведеног поступка. Описан је ток рада у лабораторији прожиман идејама и начином размишљања извођача. Проблеми и недостаци на које је наложено, приказани су у ходу, у временском складу са напредовањем истраживања. Коришћена опрема је наведена и дефинисана, док је поступак обраде резултата детаљније описан.

Пето поглавље обухвата приказ идеје за пројекат израде термалне камере. Детектор, као њена централна јединица, а осмишљен и усвојен на основу експерименталног испитивања које је база ове дисертације, представља најзначајнију иновацију и могућу перспективу. Представљају се микро/нано електромеханички системи и могућности за микромеханичку обраду оваквих деликатних елемената. У другом делу овог поглавља представљени су

материјали погодни за израду оваквих уређаја и саме технологије израде, као што је процес тродимензионалног штампања као оптимално решење за конкретан проблем.

Шесто поглавље се бави војном применом. Војни стандарди са собом носе додатна правила и ограничења која представљају адекватан начин да производ оствари своју намену. С друге стране, тактички и технички захтеви одржавају квалитет, усмереност и безбедност производне линије. У овом поглављу су представљени системи који имају улогу у војном смислу за потребе борбе у ноћним и условима смањене видљивости. Као кључни уређај издваја се термална камера чије су могућности и карактеристике описане до детаља.

У последњем поглављу налази се закључак.

2. ИСТОРИЈСКИ КОНТЕКСТ И СТАЊЕ У СВЕТУ

2.1 ПОЈАМ И ДЕФИНИЦИЈА ДЕТЕКТОРА

Оптички детектор (у даљем тексту детектор), је детектор оптичког зрачења и представља оптоелектронску компоненту која служи за прихватање или мерење оптичког зрачења. Детектор ради по принципу коришћења термичког, фотоелектричног или фотохемијског ефекта, који оптичку енергију претвара у вид енергије који се може електронски обрађивати.

Постоје различити типови поделе детектора. Може се посматрати осетљивост детектора према области спектра (дефинисано у даљем тексту), подела према радној температури уређаја (300К, 195К, 77К и 4К) и подела према механизму детекције [3].

Према коришћењу начина претварања енергије, односно механизма детекције, можемо посматрати термички, фотоелектрични и фотохемијски ефекат. Термички детектори раде по принципу промене својстава материјала насталих услед апсорпције оптичког зрачења, односно загревања. Код фотоелектричних детектора долази до стварања електричног сигнала унутар детектора насталог након интеракције упадних фотона са материјалом, и разликујемо фотопроводне и фотонапонске детекторе (фотоотпорници и фотодиоде, респективно). Што се тиче фотохемијских детектора, у основи, то су филмске траке код којих долази до хемијских промена као последица упадног оптичког зрачења [3].

У практичном смислу, последњи вид поделе се може упростити и већина оптичких детектора се могу поделити у две велике групе: фотонски и термални.

Фотонски детектори функционишу на принципу интеракције фотона у снопу упадног оптичког зрачења са електронима у материјалу. Услед побуђивања електрона из материјала под дејством светлости настаје излазни електрични сигнал који је могуће мерити. Овакви уређаји имају високу ефикасност и брз одговор, али најчешће захтевају криогено хлађење како би се спречило генерисање топлоте на носачима наелектрисања, па су осетљиви и скупљи од класичних.

Термални детектори апсорбују упадно зрачење, услед чега материјал мења температуру, док промена физичког својства генерише електрични излаз. Раније су термални детектори били спори, неосетљиви, гломазни и скупи. Са развојем технологије полупроводника и напретка на пољу микро електро механичких система (МЕМС), врата за масовну производњу постају широм отворена. Поље микро и нано механике отвара велике могућности за пружање конкретних техничко-технолошких решења, али и за истраживање и досезање до првобитно недоступних, а значајних научних феномена. У последњим деценијама се матричним детекторима постиже слика високог квалитета и то у режиму рада на собној температури, без хлађења и великом брзином.

Што се тиче израде, уређаји могу бити конструисани тако да дају само интензитет зрачења и називају се тачкасти, док детектори слике као резултат формирају слику која се обично даље електронски обрађује.

2.2 ИСТОРИЈСКИ КОНТЕКСТ

Људско око је у могућности да разликује основни, дугин спектар боја, па се људи могу назвати „трихромати“. Наиме, човечије око може видети црвену, зелену и плаву боју и нијансе које се налазе између наведеног. Вид човека је веома сиромашан по питању боја у поређењу са неким животињама које имају по четири сензора за боје или са фасцинантном богомољком са 12 различитих сензора.

У електромагнетном опсегу постоје фреквенције које се крећу изван видљивог спектра, као што је на пример инфрацрвено зрачење, које људско око не види, али човек може на неки начин да га детектује мерењем емитоване топлоте. Видљиви спектар код људи се налази у опсегу таласних дужина између 390 и 770 нанометара, док се спектрални опсег инфрацрвене светлости може поделити у неколико категорија: блиско ИЦ зрачење које се наслања на област видљиве светлости (770-1000nm), краткоталасно ИЦ зрачење (1-3 μ m), средња ИЦ светлост (3-5 μ m), дуготаласно ИЦ зрачење (8-14 μ m) и далека ИЦ светлост (14-1000 μ m) која тачније представља термално зрачење [3]. Инфрацрвена светлост, односно зрачење представља интересантну појаву и феномен подложен исцрпним истраживањима, а са упознавањем истог јавља се широк опсег примене у различитим сферама.

Може се рећи да је инфрацрвено зрачење први пут уочено пре око 200 година када је немачко-британски астроном Хершел (William Herschel 1738.-1822.) направио експеримент са необрађеним монохроматором, који у продужетку користи термометар као детектор. Након пропуштања сунчеве светлости кроз призму, термометар који се налазио иза црвеног краја видљивог спектра је показао пораст температуре. На тај начин је показао постојање невидљиве светлости, односно ИЦ зрачења [4].

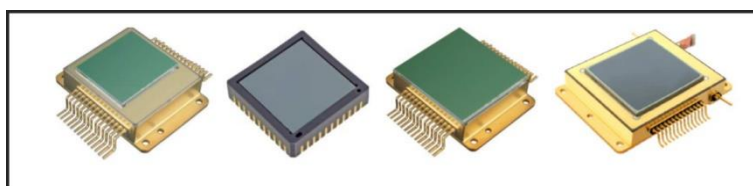
Како се термални ефекти упадног ИЦ зрачења прате кроз различите температурно зависне феномене, истраживања у скоријој историји су водила ка откривању важних корака за развој ИЦ детектора. Открића и примена на пољу ИЦ зрачења довела су до појашњења различитих ефеката, развоја термалних и електричних компоненти и употребе разних хемијских елемената и материјала за израду. Сибек (Thomas Johann Seebeck 1770.-1831.), балтичко-немачки физичар, открива термоелектрични ефекат 1821. године, а убрзо након открића формира први термопар. Термопар је електрична направа која се састоји од два различита проводника који чине електрични спој и користи термоелектрични ефекат. Овај елемент има велику примену као тип температурног сензора. Склапајући неколико термопарова у серије, 1829. године настаје прва термоелектрична батерија у улози електричне направе која конвертује термалну енергију у електричну. Овај изум се приписује Нобилију (Leopoldo Nobili 1784.-1835.), италијанском физичару, и представља термални елемент за мерење термалног зрачења [5]. Неколико година касније, 1833. године, Нобилијев млади пријатељ Мелони (Macedonio Melloni 1798.-1854.), италијански физичар, модификује првобитни дизајн термопара (слика 2.1) и то увођењем бизмута (Bi) и антимона (Sb) у структуру [6].



Слика 2. 1 Мелонијев термопар

[7]

Познато је да је болометар уређај за мерење снаге упадног електромагнетног зрачења, чији се рад најчешће заснива на мерењу промене електричне отпорности апсорпционог елемента услед загревања материјала након апсорпције упадног зрачења. Као и микроболометри (слика 2.2), своје функционисање базирају на промени електричног отпора. Први болометар датира из 1880. године, осмишљен од стране америчког астронома и физичара Ленглија (Samuel Pierpont Langley 1834.-1906.). Ова направа, која иницијално мери далеко инфрацрвено зрачење, у зачецима се састојала од две траке платинске фолије, након чега је усавршавана 20 и више година, али сведочи да од самих почетака датира повезаност између ИЦ зрачења и термалних детектора [8].



Слика 2. 2 Примери савремених микроболометара

[9]

Још један битан феномен за праћење термалних ефеката је пироелектрични ефекат који карактерише појаву електричног напона услед промене температуре детектора при апсорпцији упадног топлотног зрачења, те се пироелектрични детектори веома често користе у ИЦ спектрометрији.

Велико откриће на пољу интеракције светлости са материјом начинио је Смит (Willoughby Smith 1828.-1891.), енглески електро инжењер, 1873. године у експерименту на кабловима подморнице где је користио селен (Se) као изолатор и открио његову фотопроводљивост [10]. Посматрањем фотоелектричног ефекта, принцип фотоемисије први приказује немачки физичар Херц (Heinrich Rudolf Hertz 1857.-1894.) 1887. године служећи се

УВ светлошћу, али су касније студије откриле да се исти ефекат постиже са видљивом светлошћу уз коришћење алкалних електрода [11] [12]. Након многобројних покушаја и очекивања различитих научника, да са повећањем интензитета светлости добију већу јаћину електричне струје, чувени теоријски физичар, пореклом из Немачке, Ајнштајн (Albert Einstein, 1879.-1955.), схвата да енергија електрона емитованих из метала заправо зависи од фреквенције упадне светлости. Захваљујући овом закључку добија Нобелову награду након објављивања рада о фотоелектричном ефекту [13] базираном на проширењу Планкове хипотезе из 1900. године [14]. Иако је први феномен у интеракцији светлости са материјом уочен у 19. веку, следећи век постаје значајан за развој фотонских детектора. У то име, амерички хемичар и физичар Кејс (Theodore Willard Case 1888.-1944.) предлаже први ИЦ фотопроводник 1917. године и то употребом талијума (Tl) и сумпора (S) [15]. На Берлинском универзитету 1933. године, Кучер (Kutscher) открива проводљивост олово-сулфида (PbS), након чега фотопроводници од овог материјала постају први практични ИЦ детектори и налазе примену као квантни детектори за војне сврхе [8]. Најважније достигнуће у то време се односи на проналазак инфрацрвених појачавача слике, који су коришћени за ноћно осматрање са инфрацрвеним извором светлости. Појачавачи слике су направе које раде по принципу коришћења фотоелектричног ефекта на фотокатоде када фотони светлости избијају електроне који кроз појачавачки систем убрзавају и повећавају енергију и на тај начин долазе на електролуминисцентни екран где изазивају светлуцање. Нулта (0) генерација појачавача је у ствари претварач слике који само преводи ИЦ зрачење у видљиво. Након првог, дефинисане су четири генерације појачавача, и данашњи уређаји овог типа се не разликују битно од почетних, осим што су два главна недостатка, слабе фотокатоде и слабо упаривање, унапређена, и самим тим овакве направе постају много корисније и применљивије.

Након другог светског рата долази до прогресивног развоја технологија детектора на бази соли олова и развија се прва генерација претварача слике. У овој фази се конструишу први спољашњи фотопроводни детектори на бази германијума (Ge), а након тога долази до битног унапређења полупроводника малог опсега пропустљивости, што отвара нове могућности опсега таласних дужина и води ка побољшању осетљивости детекције. Као први материјал коришћен у те сврхе, а добрих карактеристика, показује се кристално једињење индијум антимионид (InSb). Убрзо затим, група научника отпочиње развој легура са варијабилном пропустљивошћу и предлажу живу-кадмијум-телурид (HgCdTe) као нови материјал за ИЦ детекторе који покрива велики опсег ИЦ таласних дужина [16]. Услед високих улагања за стварање оваквог специфичног материјала, из разлога што се технологија своди на настајање из цинк-кадмијум-телурида (ZnCdTe), предлажу се и алтернативне детекционе технологије као на пример оловни калај телурид (PbSnTe), са предностима јефтине технике развита и бољом стабилношћу, што укључује и већу прилагодљивост масовној производњи. Са друге стране, жива кадмијум телурид (HgCdTe) са собом носи својство ниже диелектричне константе, што је довољна предност да се алтернативно решење прогласи битно ограниченим и да се у наредној деценији не развија даље. Паралелно се припремају ИЦ фотокондуктори и базирано на тим технологијама настају детектори од талијум сулфида (STI₂) [17]. Касних 1950их година када су развијени нови, осетљиви ИЦ детектори, многе науке као што је астрономија подижу своје могућности на инфрацрвеном нивоу. Велики допринос на пољу ИЦ радиометрије и спектроскопије дао је амерички физичар Вилијам Кобленц (William Weber Coblentz 1873.-1962.) [18].

Већ осмишљени спољашњи германијумски детектори се обогаћују живом и воде ка првим „FLIR“ (Forward Looking Infra Red) системима. Ови системи са напредним ИЦ посматрањем имају бројне предности као што је одлична слика, али мана им је ограничен животни век и теже одржавање услед неопходног система за хлађење.

Ера силиконских детектора почиње радом професора Сорета (Richard A. Soref) [19]. Са открићем система са спрегом преко просторног наелектрисања (CCD) ИЦ матрични сензори

се поново разматрају, а 1973. године почиње и њихова производња. Прва намена CCD система је меморија за рачунаре, која је потпуно занемарена у моменту када су откривене могућности примене у обради сигнала и као детектора слике. Формирање слике на CCD детектору се може упрошћено представити као претварање флукса светлосног зрачења у носиоце наелектрисања на пикселима, затим пренос наелектрисања у оквиру силицијумске подлоге и коначно његово претварање у напон и појачање излазног сигнала [3]. Шеперд (F.D. Shepherd) и Јанг (A.C. Yang) представљају метално-силиконске детекторе са Шоткијевом баријером и тиме уводе по први пут софистициране шеме читавања и ефикасне детекције на једном силиконском чипу [21].

Од новијих технологија се може поменути „Quantum-well“, тип технологије квантних детектора, која је веома брзо развијена и покрива широки опсег таласних дужина. Базирана је на алуминијум-галијум-арсениду (AlGaAs/GaAs) и доста је јефтинија од технологије са жива-кадмијум-телуридом (HgCdTe). На жалост, ниска квантна ефикасност и висока цена нанолитографије представља непремостиву ману ове технологије.

Такође је вредно поменути технологију матричног детектора у жижној равни оптичког система „Focal Plane Array“ која се у суштини односи на посебну врсту болометра и користи се као термални детектор у ИЦ камерама и заснована је на низу малих танкослојних болометра.

Развој детектора инфрацрвеног зрачења доживљава експанзију у одговарајућем смислу и коначно, комбинацијом фотонске ИЦ технологије и унапређеном науком о полупроводничким материјалима, као и развојем фотолитографске технологије за интегрисана кола, велике предности и нове могућности примене ИЦ зрачења долазе до изражаја. Континуално унапређење области указује на битне утицаје развоја ове модерне технологије и активно учешће у разним сферама науке и технике.

2.3 СТАЊЕ У СВЕТУ ДАНАС

Тренутно се највише примењује жива-кадмијум-телурид (HgCdTe) као полупроводнички материјал за ИЦ фотодетекторе, због одличних карактеристика и највероватније ће због истих у наредном периоду још напредовати. За најближу конкуренцију овом избору се може прогласити нови алтернативни ИЦ материјал као што је суперрешетка из групе индијум-арсенида или галијум-индијум-антимонида (InAs/GaInSb). У сваком погледу, ИЦ технологија је ушла у своју трећу генерацију високих перформанси са високим захтевима за радне температуре, ефикасност и разноврсност детекције. У будућности се може очекивати да фотодетектори буду интегрисани са моћним хардверима који изводе паметне алгоритме, базирани на усавршеним био-инспирисаним сензорима.

Једна од компанија које имају водећу улогу у производњи детектора у смислу разноврсности и квалитета је „Hamamatsu Photonics“ из Јапана. Производи су већином базирани на технологијама на бази индијума (InAs, InGaAs, InSb, InAsSb), и асортиман им се простире од базичних елемената као што су матричне фотодиоде, фотонапонски и фотопроводни детектори, детектори базирани на принципу суперрешетке и термоелектричне батерије, закључно са разним модулима и потребним додацима. Као пример за европско тржиште, сличне технологије користи и корпорација „Xenics“ из Белгије, али са мањим избором компоненти, већ интегрисаних у модуле или камере. Немачка компанија „InfraTec“ се бави мало другачијом делатношћу, развојем пироелектричних инфрацрвених детектора, који раде без хлађења у великом температурном опсегу и у широком спектру таласних дужина. Ова сфера производње је слабо комедијализована из разлога претежно војне примене, и веома често фабрике које производе детекторе и компоненте преузимају даљу производњу комплетних уређаја који их користе, па дистрибуцију истих ограничавају у сврху веће потражње коначног производа.

За сложене уређаје као што су термалне камере важни су оптички елементи који се праве од специјалних материјала као што су германијум, силицијум, сафир (алуминијум оксид Al_2O_3), цинксулфид и др., јер на пример од фокуса сочива зависе оптички параметри као што су увећање и видно поље, али и термичка детекција. Зависно од примене и различитости циљева разликују се и захтевани параметри сочива. Наравно, главна и основна разлика која чини предности термалног уређаја базира се на принципу рада, односно на детектору који може опазити и најмање промене у температури. Сигнал са детектора се процесуира у електронским модулима уређаја и преноси се на екран. Неке од угледних компаније које су специјализоване да производе овај тип производа су „FLIR“ из Орегона, а у комерцијалном смислу се могу именовати и производње намењене за цивилну употребу као што су белоруски „Pulsar“ и „Yukon“ из Литваније.

У погледу квалитета, у смислу добрих карактеристика и финалних перформанси термалне направе, улагање не може бити јефтино када се узму у обзир све важне компоненте. Ствара се потреба за проналажењем јефтинијих решења, а конкурентних по квалитету и ефикасности. Овакво решење се мора тражити на различитим нивоима, почев од одговарајућих материјала усклађених са одабраном технологијом израде, а сама идеја и принцип рада би требало да буде потпуна иновација, у најбољем случају био-инспирисана, јер сва једноставна а ефикасна решења воде порекло из природног окружења.

Ово поглавље дало је дефиницију и систематизацију појма ИЦ детектора од момента њиховог појављивања, закључно са савременим системима и њиховом применом.

3. ТЕОРИЈСКИ АСПЕКТИ

3.1 ФОТОФОРЕЗА/ТЕРМОФОРЕЗА

3.1.1 ДЕФИНИЦИЈА ПОЈМОВА

Термофоретски ефекат је термо-механички ефекат који настаје услед апсорпције електромагнетног зрачења. Упадно зрачење проузрокује градијент температуре, што даље води загревању, односно ширењу материјала.

Физичка својства полимера и биофотонских структура одређена су њиховом унутрашњом архитектуром на мезоскопском нивоу и не зависе директно од хемијске структуре материјала. Корелациона дужина дефинише средње растојање између два структурна елемента (полимерни ланац, нано-геометрија и сл.). У случају када корелациона дужина (димензија структуре) одговара средњем слободном путу молекула, долази до формирања силе чије је дејство видљиво на макроскопском нивоу, и та сила се назива радиометријска сила [22].

Имајући у виду веома сличне, а уско повезане појмове у овој деликатној области, као и извесне неусаглашености, тј. неразјашњеност у литератури најпре ће бити појашњене разлике и сличности између појмова радиометријске силе, термофорезе, термофоретског ефекта и силе, и фотофорезе, фотофоретског ефекта и силе.

Радиометријска сила је последица неуниформне расподеле енергије зрачења, односно резултат интеракције између флуида и неједнако осветљене/загрејане површине [23]. Ова сила представља компоненту фотофоретске/термофоретске силе, која зависи искључиво од градијента температуре и карактеристичне димензије (nano meso correlation length „ η “) материјала. Карактеристична димензија наноструктуре мора да се поклопи са величином средњег слободног пута молекула да би се произвела сила, и овај однос се карактерише као Кнудсенов бездимензионални број, који се у пракси користи као параметар за анализу протока гаса. Ова величина названа је по данском физичару Мартину Кнудсену (Martin Knudsen 1871.-1949.) [24].

Потребно је нагласити да је термофореза процес кретања честица, типично у гасу око разматраног материјала, који је условљен постојањем температурског градијента (нпр. услед различите апсорпције термалног зрачења) на материјалу док је термофоретска сила - сила која доводи до деформације материјала, а настаје након стварања температурског градијента на истом.

Специјални случај термофорезе назива се фотофореза. Фотофоретски ефекат настаје деловањем довољног интензитета светлости који ствара неуниформну расподелу температуре, а фотофоретска сила изазива ефекат деформисања материјала услед дејства светлосног зрачења на честице малих димензија.

Осим узрока настајања температурног градијента, једина разлика између описаних ефеката је што се услед фотофорезе градијент не распростире по целом материјалу.

За ову дисертацију је практично користити оба назива за ефекат узрокован радиометријском силом. Са једне стране биће приказане теоријске претпоставке на основу којих ће се очекивати одређени резултати који се могу подвести и под ефекат термофорезе и под ефекат фотофорезе, док ће приказани експеримент из практичних разлога припадати специјалном случају термофоретског ефекта, фотофоретском ефекту.

3.1.2 ИСТОРИЈСКИ ПРЕГЛЕД

Први наговештаји термофоретског ефекта уочени су, у виду померања материјала услед појаве температурног градијента, од стране Френела (Augustin-Jean Fresnel, 1788.-1827., француски инжењер и физичар познат по својим достигнућима у области оптике), и Крукса (William Crookes, 1832.-1919., енглески физичар и хемичар) [25]. Касније су феномен истраживали и посматрали бројни научници, док га Еренхафт (Felix Ehrenhaft, 1879.-1952.), аустријски физичар, није произвео светлосним зрачењем и дефинисао као фотофорезу [26].

Пасиан (A. Passian) 2002. године експериментално доказује да загревањем микроконзола ласерским зрацима, уколико су оне на растојању упоредивом са средњим слободним путем молекула околног гаса, настају одређене силе које делују на посматране микроконзоле [27]. У научном раду [28], теоретски је анализирана фотофоретска сила. Узета је у обзир сферна честица радијуса a , у гасу притиска P_g и температуре T_g , осветљена зраком светлости одређеног интензитета. Температурна расподела T_p у оквиру честице је дата једначином

$$\rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = k_p \nabla^2 T_p + Q \quad (3.1)$$

где ρ_p , C_p , k_p представљају густину, специфичну топлоту и топлотну проводљивост честице, респективно, а Q количина топлоте настала при апсорпцији упадног електромагнетног таласа, од стране јединичне запремине у јединици времена (све ознаке су дате у табели 3.1). Након даљих прорачуна долази се до једначине за притисак настао услед одбијања молекула од површине честице

$$P_r = \frac{1}{2} P_g \left(\frac{T_p}{T_g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

при чему израз за фотофоретску силу поприма форму

$$F_p = -\pi a^2 P_g \int_0^\pi \left(\frac{T_p}{T_g} \right)^{\frac{1}{2}} \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (3.3)$$

где се сила узима као позитивна у смеру пропагације светлости.

Табела 3.1 Дефиниције параметара за једначине 3.1 до 3.3

ОЗНАКА	ЗНАЧЕЊЕ
ρ_p	Густина честице
C_p	Специфична топлота честице
T_p	Функција расподеле температуре унутар честице
t	Време
k_p	Топлотна проводљивост честице
Q	Количина топлоте топлотног извора
P_r	Притисак услед одбијања молекула од површине честице
P_g	Притисак гаса
T_g	Температура гаса
F_p	Фотофоретска сила
a	Радијус сферне честице
θ	Угао простирања упадног зрачења

У питању је недовољно проучаван ефекат и тек се очекују открића и научни радови на ову тему.

3.1.3 ФИЗИКА ФОТОФОРЕТСКОГ ЕФЕКТА

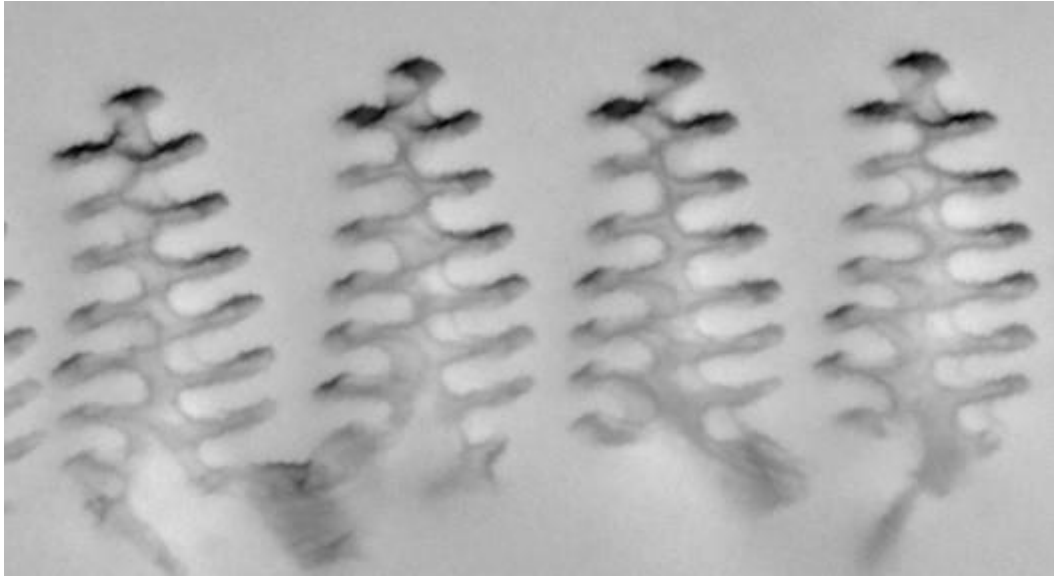
Када се у обзир узму нано димензије које су карактеристичне за посматрани ефекат, не можемо се са сигурношћу ослонити само на законе класичне физике који важе на макро нивоима. На пример, фотофоретска сила може бити већа од гравитационе силе код честица димензија реда величина средњег слободног пута молекула окружујућег гаса, па последично може изазвати кретање против закона гравитације [29]. Такође, посматрајући специфичне структуре материјала и њихова хемијска и физичка својства, термофореза и фотофореза морају да се повежу са међумолекулским интеракцијама у оквиру материјала, а самим тим проучавања залазе и у подручје квантне физике.

У последњих двеста година термофоретски ефекат привлачи пажњу научника, јер је са једне стране енигматичан и несвакидашњи, а са друге - практично применљив за истраживање и потврђивање других појава у свету око нас, односно у свету сведеном на микро и нано скалу. У теоретском смислу, велике су могућности примене проучаване појаве у свету науке. Научници су се већ окушали на пољима астрономије, авионике, физике, хемије, а свој допринос овај ефекат даје и у областима фармације и медицине. Практично, у сваком окружењу где постоје изузетно мале димензије објекта и температурни градијент, постоји и испољавање неког од наведених случајева ефекта.

3.1.4 ФОТОФОРЕТСКИ ЕФЕКАТ НА БИОФОТОНСКИМ НАНОСТРУКТУРАМА

Уобичајено је да се најбоља решења комплексних проблема проналазе у природи, као и да се бројни физички феномени могу уочити на биолошким структурама. Као структура карактеристична за фотофоретски ефекат уочена је структура лептировог крила, са микроструктуром љуспица и длака од које потиче структурна обојеност.

У биолошком свету најчешће се сусрећемо са коругованим структурама и површинама и коругација се креће од нано (лептири „Lepidoptera“, бубе „Coleoptera“) до макро (кора дрвета) нивоа. Корелациона дужина (L) је параметар који се може користити за описивање постојања неравнина на посматраној површини (нпр. површини узорка). Она се може дефинисати као растојање између две блиске тачке на датој површини, за које постоји незанемарљива међусобна корелација у погледу вредности z -координате (незанемарљиво ограничење могућег међусобног одступања у висини, тј. у z -координати). У пракси, храпавије површине генерално имају краћу корелациону дужину. Пример овакве коруговане микроструктуре, и то конкретно пресека лептировог крила, *Morpho didius* (Hopffer 1874), дат је на микроскопском снимку добијеном помоћу трансмисионог електронског микроскопа (ТЕМ), на слици 3.1 у наставку [30].



Слика 3. 1 „ТЕМ“ снимак крила лептира *Morpho didius* (Hopffer 1874)

Можемо посматрати две тачке, на одређеном растојању τ , у структури као на слици 3.1, и за њих дефинисати z -координате: Z_1 и Z_2 . Одредимо функцију корелације $C(\vec{d}) = \langle Z_1(\vec{r})Z_2(\vec{r} + \vec{d}) \rangle$, где је r вектор положаја у систему, а d је вектор помераја између тачака у којима меримо Z_1 и Z_2 . Теоријска анализа проблема који се описује подразумева да је дата површина изотропна и стационарна [31]. Ознаке коришћене у наредним једначинама дате су у табели 3.2.

Када је $Z_2 = Z_1 + \Delta Z$ следи

$$p(Z_1, Z_2) \rightarrow p(Z_1, \Delta Z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{2Z_1^2(1-\rho) + 2Z_1\Delta Z(1-\rho) + (\Delta Z)^2}{2\sigma^2(1-\rho^2)}\right] \quad (3.4)$$

где је ρ нормализовани коефицијент функције аутокорелације израчунат на растојању τ . Даље се интеграцијом над Z_1 добија функција густине вероватноће промене висине ΔZ :

$$p(\Delta Z) = \int_{-\infty}^{\infty} p(Z_1, \Delta Z) dZ_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{2\sigma}\sqrt{1-\rho}} \exp\left[-\frac{(\Delta Z)^2}{4\sigma^2(1-\rho)}\right] \quad (3.5)$$

Сада се ефективна дужина корелације (L_e) дефинише преко следећег израза, у којем фигурише аутокорелациона функција $R(\tau)$:

$$\int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^{\infty} R(\tau)\tau d\tau = R(0)\pi L_e^2 \quad (3.6)$$

Овде је ефективна дужина корелације дефинисана као полупречник оног цилиндра чија је висина једнака максимуму Гаусове аутокорелационе функције, при чему се цилиндар може описати ефективном корелационом функцијом која износи $R(0)$ унутар цилиндра, док је једнака нули ван цилиндра.

За нулти Гаусов изотропни случај важи да је $L_e = L$. Користећи ову ефективну корелациону функцију уместо реалне, површинске осцилације нестају за $\tau < L_e$, а потпуно су некорелисане за $\tau > L_e$. Што се тиче функције аутокорелације, након дефинисања ефективне

спектралне ширине опсега и њених трансформација, добија се веза између ефективне дужине корелације и ефективне спектралне ширине опсега (k_e):

$$k_e L_e = 2 \quad (3.7)$$

Из једначине 3.7 следи да је $k_e/2\pi = 1/\pi L_e$ мера максималне просторне фреквенције изложене насумично коругованој површини. Може се закључити да је L_e одговарајућа мера просторних стохастичких валовитости површине : ако L_e опада, повећава се коругација (валовитост површине). Из наведеног се јасно види да је, након постављања површинског модела, експериментална процена ефективне ширине графика погодан начин за одређивање дужине корелације.

Може се рећи да се степен некохерентности електромагнетног поља повећава ако се повећа храпавост и валовитост површине. Сходно томе, мера разлике између равне и коруговане површине се добија односом

$$\Omega = \frac{\sigma}{L_e} = \frac{k_e \sigma}{2} \quad (3.8)$$

а добијени параметар се назива параметар некохерентности (Ω) [31].

Табела 3.2 Дефиниције параметара за једначине 3.4 до 3.8

ОЗНАКА	ЗНАЧЕЊЕ
Z_1	Функција простирања тачке 1 коругације
Z_2	Функција простирања тачке 2 коругације
$p(Z_1, Z_2)$	Здružена функција густине вероватноће за случај Гаусове расподеле Z вредности
ΔZ	Промена висина тачака коругације
σ	Стандардна девијација
ρ	Нормализовани коефицијент функције аутокорелације
ϑ	Угао аутокорелације
$R(\tau)$	Аутокорелациона функција
$R(0)$	Аутокорелациона функција добијена на нултом растојању
τ	Растојање између тачака одређених са Z_1 и Z_2
L_e	Ефективна дужина корелације
k_e	Ефективна спектрална ширина опсега
Ω	Параметар некохерентности

3.2 ХОЛОГРАФИЈА



Слика 3.2 Холограм

[32]

3.2.1 ИСТОРИЈСКА ПЕРСПЕКТИВА

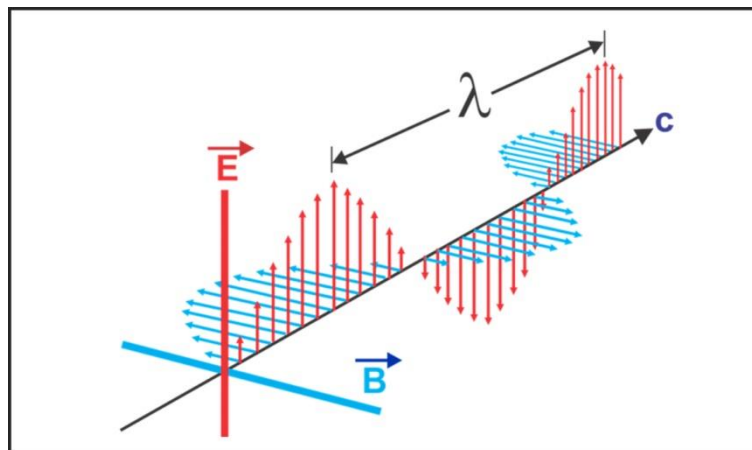
Холографија је метода репродукције тродимензионалних слика применом кохерентне светлости (слика 3.2). Изумитељ ове научне области је британски научник, мађарског порекла, Денис Габор (Dennis Gabor 1900.-1979.), који је из потребе да унапреди функцију електронског микроскопа, дошао на идеју да искористи принцип интерференције светлосних таласа [33] [34]. Након открића 1948. године, Габор осмишљава назив методе и то спајајући речи „Holos“ која значи све, потпуно и „Grafos“ са значењем запис. Иако веома интересантна у научном смислу, идеја није заживела истог момента, него тек скоро две деценије касније. Након што је Габор утврдио основе холографије 1948. године, тек са открићем ласера 1960их година, учење о кохерентној светлости добија практично значење и оптичке науке напредују у том правцу.

Први који су применили научни метод у проучавању светлости су Њутн (Sir Isaac Newton 1642.-1726.) и Хајгенс (Christian Huygens 1629.-1695.). Њутн 1672. године успева да раздели талас беле светлости на његове спектралне компоненте уз помоћ призме [35], али упркос овом открићу важно је напоменути да Њутн није разумео таласну природу светлости. Хајгенс је познат по томе да је први научник који је тврдио да светлост представља талас. Амерички физичар Таунс (Charles Hard Townes 1915.-2015.) и нобеловац Шаулоу (Arthur Leonard Schawlow 1921.-1999.) наговештавају могућности ласерског емитовања кохерентне светлости 1958. године и дају оквирна упутства за прављење ласера [36]. Убрзо потом, након истраживања ефикасности флуоросценције рубина [37], амерички инжењер и физичар Маиман (Theodore Harold Maiman 1927.-2007.) конструише и изводи први импулсни рубински ласер. Захваљујући понављању његових експеримената уз коришћење ласера, које су извршили професор Лит (Emmet Norman Leith 1927.-2005.) и литванско-амерички физичар Упатникс (Juris Upatnieks 1936.) 1961. године на Универзитету у Мичигену, Габора проглашавају оцем холографије и 1971. године добија Нобелову награду за физику.

Интересантно је да класична фотографија која настаје дистрибуцијом интензитета светлости, приликом оштећења трајно губи податке, док у случају холографије, интеракцијом светлости са емулзијом настаје интерференциони образац који у сваком свом делу чува комплетну информацију.

3.2.2 ОСНОВИ ТАЛАСНЕ ОПТИКЕ

Светлост представља кретање електромагнетног таласа (слика 3.3), при чему су вектори јачине електричног и магнетног поља у том таласу међусобно нормални, а нормални су такође и на правац простирања поменутог таласа.



Слика 3. 3 Шематски приказ раванског електромагнетног таласа

[38]

Простирање електромагнетног таласа је у ствари простирање међусобно спрегнуте осцилаторне промене јачине електричног и магнетног поља кроз простор, а брзина простирања је највећа у вакууму.

За даља разматрања у овој дисертације је важно издвојити две појаве које одражавају таласну природу светлости: интерференцију и дифракцију. Интерференција се односи на слагање два или више међусобно кохерентних таласа, услед чега долази до правилне прерасподеле интензитета таласа у простору, при чему се у неким тачкама простора јавља максимално појачање интензитета таласа, а у другим тачкама – максимално слабљење, што зависи од фазне разлике у посматраној тачки. Дифракција, која се испољава као скретање електромагнетних таласа са праволинијске путање под одређеним условима (нпр. при проласку кроз мале отворе, или при наиласку на довољно мале препреке), може се сматрати специјалним случајем интерференције, тј. може се разматрати као интерференција међусобно кохерентних секундарних таласа из великог броја тачкастих извора. Ефекти дифракције су најочљивији када је карактеристична димензија структуре реда величине таласне дужине таласа.

Када говоримо о интерференцији два прогресивна монохроматска хармонијска раванска светлосна таласа која се простиру у позитивном смеру x осе, говоримо о сабирању, тј. о суперпозицији два независна таласа, која се могу описати једначинама следећег типа (све ознаке које се појављују у једначинама дате су у табели 3.3):

$$y_1(x_1, t) = y_0 \sin(\omega t - kx_1) \quad (3.9)$$

$$y_2(x_2, t) = y_0 \sin(\omega t - kx_2) \quad (3.10)$$

Резултујући талас се може приказати следећом једначином: [38]

$$y = 2y_0 \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1)}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{k(x_1 + x_2)}{2}\right) \quad (3.11)$$

Добијен је прогресиван резултујући талас, чије су амплитуда и фаза, респективно:

$$A = 2y_0 \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1)}{2}\right) \quad (3.12)$$

$$\varphi = \omega t - \frac{k(x_1 + x_2)}{2} \quad (3.13)$$

Из израза за амплитуду се види да зависи од пређених путева таласа, а вредности јој варирају у опсегу $(-2y_0, +2y_0)$.

На интерференционој слици се разликују места конструктивне и деструктивне интерференције.

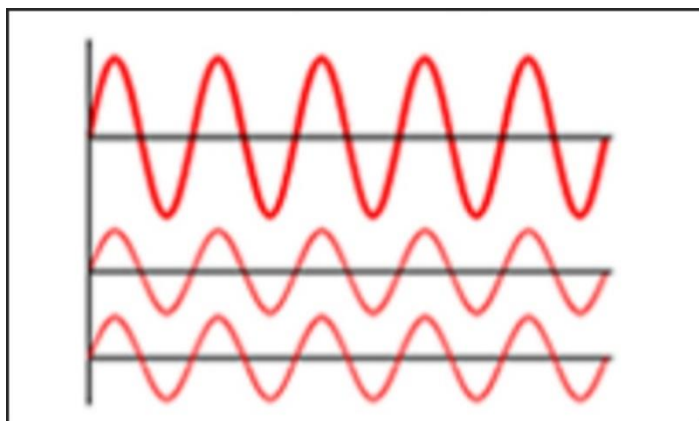
Конструктивна интерференција представља појачање резултујућег таласа када важи да је $A = |2y_0|$, што значи да је испуњен услов:

$$\frac{k(x_2 - x_1)}{2} = \frac{k\Delta x}{2} = z\pi \quad (3.14)$$

Сређивањем последњег израза и применом дефиниционог израза за угаони таласни број: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, на крају се добија

$$\Delta x = \frac{2z\pi}{k} = z\lambda \quad (3.15)$$

где је z цео број.



Слика 3. 4 Конструктивна интерференција

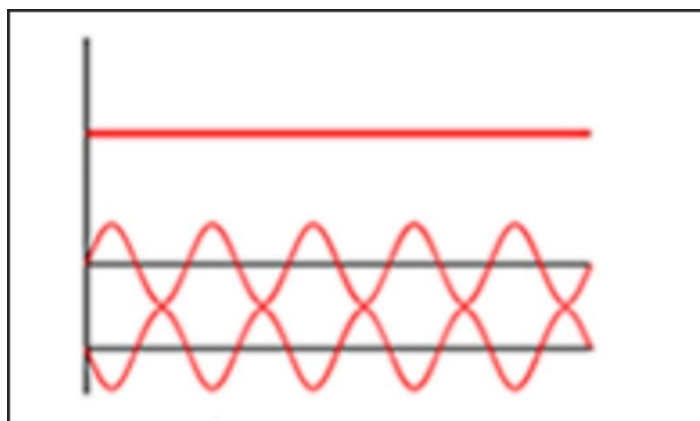
Закључак: Ако је разлика путева које су прешли интерферирајући таласи једнака целом броју таласних дужина, амплитуда резултујућег таласа је једнака збиру амплитуда појединачних таласа (слика 3.4).

Деструктивна интерференција представља максимално слабљење или чак поништавање таласа када важи да је $A = 0$, што даље значи да је испуњен услов $\cos\left(\frac{k(x_2 - x_1)}{2}\right) = 0$, односно:

$$\frac{k(x_2 - x_1)}{2} = \frac{k\Delta x}{2} = (2z + 1)\frac{\pi}{2} \quad (3.16)$$

Сређивањем израза и увођењем таласног броја $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, на крају се добија

$$\Delta x = \frac{(2z + 1)}{2} \cdot \frac{2\pi}{k} = (2z + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (3.17)$$



Слика 3.5 Деструктивна интерференција

Закључак: Ако је разлика путева које су прешли интерферирајући таласи једнака непарном броју половина таласних дужина, амплитуда резултујућег таласа је једнака нули (слика 3.5) [39].

Табела 3.3 Дефиниције параметара за једначине 3.9 до 3.17

ОЗНАКА	ЗНАЧЕЊЕ
y	Таласна функција резултујућег таласа
y_1, y_2	Таласне функције независних таласа који интерферишу
x_1, x_2	Растојање уочене тачке у првом и другом таласу од извора датог таласа
t	Време простирања таласа
y_0	Амплитудна вредност таласне функције првог и другог таласа
ω	Кружна фреквенција
k	Угаони таласни број у вакууму
A	Амплитуда резултујућег таласа
φ	Фаза резултујућег таласа
Δx	Разлика пређених путева другог и првог таласа
z	Ознака за цео број
λ	Таласна дужина у вакууму
$(\omega t - kx)$	Фаза таласа

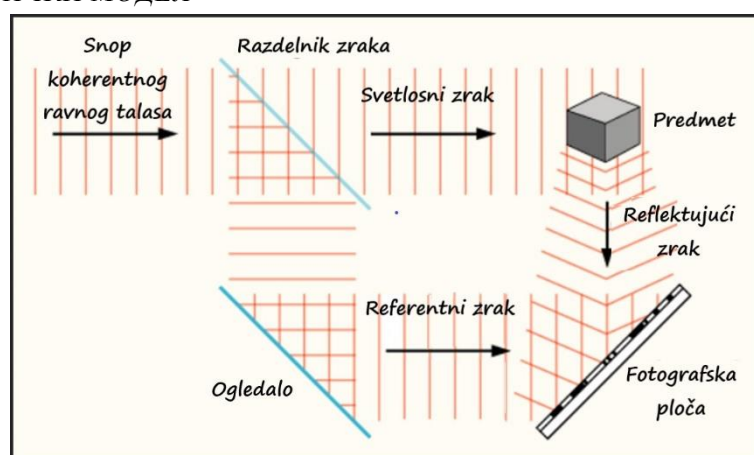
Ако се таласи простиру кроз средину са индексом преламања n , онда би у горњим једначинама уместо k фигурисало nk , а уместо λ би фигурисало λ/n .

3.2.3 ХОЛОГРАФИЈА – ОД АНАЛОГНЕ ДО ДИГИТАЛНЕ

Када је холографија била у својим зачецима, холограми су бележени на материјалима као што су фотографски и термопластични филмови, а затим се ласерским осветљавањем реконструисало таласно поље. Због дуготрајности процеса и развијања фотографског филма, ова метода је била прилично непогодна за индустријску употребу. Услед развоја CCD и CMOS (комплементарни метал-оксидни полупроводнички сензори), и напредовања компјутерских технологија, омогућен је развој система као што су електронска спектрометријска интерферометрија и дигитална холографска интерферометрија.

Дигитална холографија подразумева анализирање два или више међусобно кохерентних таласа и синтезу резултата уз помоћ рачунара и користи се за њихово поређење. Ово поређење се назива дигитална холографска интерферометрија и обично се рачунају фазе два таласна фронта снимљена у два различита временска тренутка, док фазна разлика садржи информације о деформацији предмета између два момента изложености [40] [41].

3.2.4 МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ



Слика 3. 6 Холографска поставка

[42]

На слици 3.6 се види објекат, тј. предмет снимања и емулзија, односно фотоплоча на којој се холограм бележи. Такође се види сноп равнског кохерентног таласа, који се дели на два таласа, од којих један након одбијања од огледала пада директно на фотоплочу (референтни талас), док се други рефлектује од испитиваног предмета (рефлектујући талас) и након тога пада на фотоплочу. У наставку ће бити дефинисана обележја за сваки од ових појмова како би се лакше испратило математички модел [39][43].

- T - сноп кохерентног равнског таласа
- P - предмет
- T1 - рефлектујући талас/зрак (талас предмета)
- E - емулзија/фотографска плоча
- T2 - референтни талас/зрак (талас у односу на који се врши регистровање фазне разлике)

Осветљеност емулзије услед интерференције таласа T1 и T2 зависи од амплитуде тих таласа и њихове фазне разлике. Ознаке из наредних неколико једначина дефинисане су у табели 3.4.

У математичком формализму, тзв. предметни талас се може представити следећим комплексним бројем, који се назива комплексна амплитуда таласа:

$$A = ae^{i\Phi} \quad (3.18)$$

где је a константни вектор по интензитету једнак амплитуди електричног поља светлости, а Φ фаза таласа која зависи од удаљености појединих тачака објекта од емулзије.

За комплексну амплитуду референтног таласа се може писати:

$$A_0 = a_0 e^{i\Phi_0} \quad (3.19)$$

Интензитет светлости на површини холографске плоче, односно емулзије, сразмеран је квадрату апсолутне вредности збира комплексних амплитуда јачина електричног поља таласа T_1 и T_2 :

$$I = |A_0 + A|^2 = a^2 + a_0^2 + ae^{i\Phi} a_0 e^{-i\Phi_0} + ae^{-i\Phi} a_0 e^{i\Phi_0} \quad (3.20)$$

Поред других, једна од претпоставки је да се, при реконструкцији холограма (када се холограм осветљава референтним зраком), комплексна амплитуда таласа који пролази кроз холограм може приказати следећим изразом:

$$B = IA_0 \quad (3.21)$$

$$B = a_0(a^2 + a_0^2)e^{i\Phi_0} + a_0^2 ae^{i\Phi} + a_0^2 e^{2i\Phi_0} e^{-i\Phi} \quad (3.22)$$

Ова једначина има три компоненте у решењу, које носе следеће значење:

Прва компонента је идентична референтном таласу са малим разликама у амплитуди. Она потиче од недифрактованог референтног зрака, који пролази кроз фотоплочу са холограмом без промене правца. Та компонента не учествује у преносу информација.

Друга компонента представља талас који ствара имагинарни лик предмета и привидно делује као талас који излази из холограма, при чему фаза и амплитуда садрже информације о предмету.

Трећи сабирак у горњој једначини одговара таласу који ствара реалан лик предмета, тј. реални интерференциони образац иза холограма.

Табела 3.4 Дефиниције параметара за једначине 3.18 до 3.22

ОЗНАКА	ЗНАЧЕЊЕ
A	Комплексна амплитуда предметног таласа
a	Константни вектор по интензитету једнак амплитуди електричног поља предметног таласа
Φ	Фаза зависна од удаљености објекта од емулзије
A_0	Комплексна амплитуда референтног таласа
a_0	Константни вектор по интензитету једнак амплитуди електричног поља референтног таласа
Φ_0	Фаза референтног таласа
I	Интензитет светлости на површини емулзије
B	Комплексна амплитуда таласа који пролази кроз холограм

3.2.5 ФОРМИРАЊЕ ХОЛОГРАМА

Холографија је поступак стварања холограма приликом ког се истовремено бележи запис фазе и амплитуде светлосних таласа. Ради остварења наведеног примењује се интерференција једног таласа који се рефлектује од објекта и другог који се простира независно. Када дође до сусрета ових таласа долази до интерференције светлости, а на холограму се формира светлосно поље идентично као оно које настаје када се осветли предмет. Ова два таласа су кохерентна јер потичу од истог светлосног извора, ласера, чија се светлост дели на два снопа, једног који обасјава предмет и другог који се шаље на огледало. Као резултат интерференције таласа рефлектованог од поменутог огледала (референтни талас) и од посматраног предмета (предметни талас), на емулзији се формира низ светлих и тамних густо распоређених пруга (преко 5000 пруга по 1mm). Облик, профил и растојање ових линија одређени су обликом посматраног предмета. Разлика фаза у било којој тачки површине холограма је пропорционална разлици оптичких путева референтног зрака и зрака рефлектованог са предмета. При формирању холограма, на његов изглед утиче и интензитет таласа који интерферишу и фазна разлика тих таласа. Фазна разлика зависи од облика предмета, тј. од рељефа његове површине. Дакле, холограм у свакој тачки садржи потпуну информацију о објекту.

3.2.6 ХОЛОГРАФСКА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЈА

Уколико се реконструктивни талас коришћен у методи интерферометрије подударе са референтним таласом, фаза и амплитуда предметног таласа ће бити верно репродуковане. Дакле, уколико уклонимо предмет и осветлимо холограм, формираће се имагинарни лик предмета, који ће изгледати исто као и сам предмет. Уколико предмет оставимо, оба таласа ће наставити да се шире иза холограма, а како су кохерентни, интерферираће. Уколико се стање предмета променило у смислу настанка деформације или померања, а у периоду између снимања холограма и посматрања насталог обрасца, сам интерференциони образац који описује настале промене ће се такође променити. Овај вид методе се назива интерферометрија у реалном времену.

Позната је и метода двоструке или вишеструке експозиције која подразумева сукцесивно бележење два или више холограма који одговарају различитим стањима истог предмета. У истовременој реконструкцији, верни снимци предметних таласа из различитих временских момената интерферирају. Постоји и могућност снимања сваког од интерферирајућег таласа на одвојеном холограму и то представља модификацију методе двоструког излагања – „Сендвич“ холографију. Екстремни случај ове методе је техника континуалног излагања холограма предмета који варира у времену у смислу вибрирања или неког вида померања. Оваквим снимањем холограм бележи таласе које шаље предмет у свим стањима кроз које пролази у току времена излагања. Реконструкцијом се добија интерференциони образац који приказује померање различитих тачака предмета у току његовог кретања или у току промене његових димензија [43].

Експеримент који је у центру истраживања ове тезе је специјалан случај холографске интерферометрије, примењене за праћење механичког помераја дела биофотонске структуре насталог као последица спољашњег загревања, односно интеракције са ласерским зрачењем. У том смислу, овај померај се посматра на наноскопском нивоу у реалном времену. Цео процес се врши у циљу проналажења оптималне структуре која услед интеракције са електромагнетним зрачењем даје могућност детекције инфрацрвеног зрачења са најмањим могућим шумом.

Као веома значајно својство холографског проучавања показала се могућност кратке експозиције, односно бележење комплетне тродимензионалне информације о насталим

променама. Таква опција накнадне реконструкције је веома важна за покретне предмете малих и променљивих димензија.

Поглавље „Теоретски аспекти“ даје детаљну анализу у смислу теоретског приступа двома главним областима на којима је базирана ова теза: фотофорези и холографији. Након утемељених теоријских основа, отворен је пут практичном приступу изучаваног феномена:

„Теорија је када се све зна, а ништа не функционише. Пракса је кад све функционише, а нико не зна зашто.“

Алберт Ајнштајн

4. ЕКСПЕРИМЕНТ

Експериментални део истраживања извршен је у лабораторији за биофотонику, Института за физику, Универзитета у Београду. Коришћена је лабораторија за биофотонику у оквиру Центра за фотонику, наведеног института, који се бави класичном и квантном оптиком, као и холографијом. Област деловања лабораторије за биофотонику обухвата експериментална истраживања у области класичне и дигиталне холографије, холографских фото-осетљивих материјала, фотонских структура и биомиметике.

У наставку поглавља биће представљена холографска поставка (Слика 4.1) коришћена у оквиру методе испитивања (у даљем тексту поставка) која је постављена на оптичком, антивибрационом столу, марке „Thorlabs“. Поставка је повезан са рачунаром.

За прилично слободне услове примењеног експеримента, важан је параметар климатизације, односно подешавање температуре у лабораторији на просечних 22°C. Како се ради о производњи холограма, за добијање доброг квалитета, такође је важно да механичке и оптичке компоненте у сваком моменту снимања буду добро причвршћене, како би се спречила нежељена кретања и вибрације. Различите изворе вибрација је потребно уклонити, удаљити или максимално умањити [44]. Из тих разлога, цео ток експеримента вршен је под заштитном завесом како би се умањио утицај укљученог клима уређаја, односно струјања ваздуха.

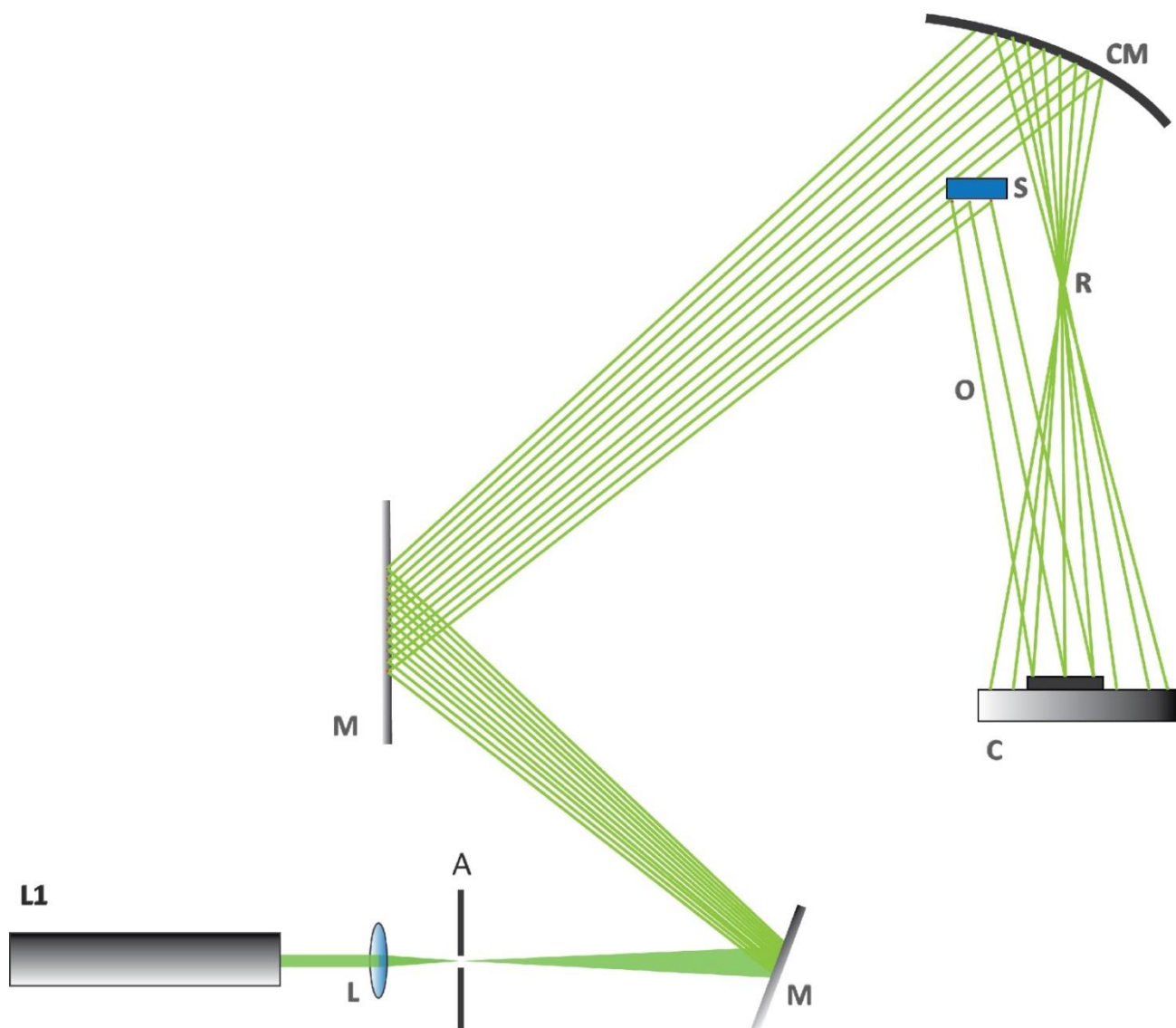
4.1 ХОЛОГРАФСКА ПОСТАВКА

Сноп електромагнетног зрачења са ласера L1 је проширен и усмерен на конкавно огледало M. Део снопа директно пада на испитивани узорак S, постављен испред огледала CM, на тај начин формирајући предметни (рефлексни) сноп O. Остатак снопа, који не одлази на узорак, сакупља се на сферном огледалу и генерише референтни зрак R. CMOS детектор C је постављен у зони где долази до интерференције референтног и предметног снопа. Додатни ласер није фиксни део поставке и служи да озрачи узорак (као извор упадног зрачења). Његов термални отисак на крилу се детектује холографски [45]. Овај сетап, слика 4.1, је механички веома стабилан, зато што су сви неопходни снопови генерисани са истог упадног снопа [46].

L1 – Коришћен је ласер „Torus 532 laser“, произвођача „Laser quantum“, таласне дужине 532 nm, снаге 390 mW и дужине кохеренције 10m.

Додатни ласер – Ласер који служи за локално загревање, односно да изазове очекивану промену на узорку. Испробани су континуирани ласерски поинтери различитих таласних дужина, и за конкретан експеримент одабрани су они таласних дужина од 450 nm, 532 nm, 660 nm и 980 nm. Поинтери су подешавани на снаге од 1mW и 0,8 mW наизменично, за шта је коришћен варијабилни атенуатор снопа. Време зрачења појединачног ласера контролисано је Ардуино микроконтролером. У питању је пратећи елемент који чини физичко-рачунарска платформа чији се хардвер састоји од Ардуино плоче са процесором и додатним улазно-излазним елементима. Софтвер је писан у програмском језику „JAVA“. Важно је напоменути да су изабране снаге условљене деликатном структуром узорка, крила лептира, које на већим снагама могу прогорети.

L – Оптички експандер снопа мења карактеристике дивергенције и попречног пресека снопа. Увећава сноп али се користи и за смањење пречника снопа. Квалитет проширеног ласерског зрака који осветљава предмет се може знатно побољшати постављањем елемента „Pinhole“ у жижду тачку увећавајућег сочива. Прашина и огреботине на оптичким површинама производе просторни шум, а „Pinhole“ делује као просторни филтер [44].



Слика 4. 1 Шема холографског сетапа

[47]

CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) – комплементаран метал-оксидни полупроводник- Сензор слике би у основи требало да апсорбује фотоне, генерише наелектрисање као последицу интеракције фотона са материјалом и претвори га у напон. Осим генерисања електрона фотонима и њиховог преношења, CMOS сензор може да врши обраду слике, детекцију ивица, смањење шума или претварање аналогног у дигитални сигнал (одговор). Главна предност CMOS у односу на CCD сензоре је управо ова могућност функционалне интеграције на један чип. Осим тога предност ових сензора је мањи утрошак енергије, односно ниже температуре, услед чега се смањује термички шум [44]. У коришћеном сетапу, за детекцију холограма употребљен је CMOS фотоапарат „Nikon 1v3“ (величина детектора 13.2x8.8mm, 18.4 Mpixel, 60 фрејмова по секунди на максималној резолуцији 5232x3488). На основу ових параметара , односно величине чипа детектора и његовог растојања од узорка, резолуција холограма је процењена на 29.5 μ m.

Мерење и контрола температурне расподеле извршена је употребом комерцијалне ИЦ камере „FLIR A65“ (640x512pixel, термалне резолуције 50mK, жижне дужине 13mm, угла видног поља 45°x37°).

За генерисање референтног и предметног снопа електромагнетног зрачења коришћена су дивергентна сочива и конкавно огледало.

Рачунар са добром графиком дозволио је имплементацију помереног Френеловог алгоритма на „Cuda-enabled“ графичкој картици, што је финално омогућило реконструкцију појединачног дифракционог реда холограма резолуције 2048x2048, реконструисаног за неколико секунди на „ASUS expedition Ge Force GTX 1050 Ti“ графичкој картици.

4.2 МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ КАО ОСНОВ ЗА ПИСАЊЕ ГЛАВНОГ ПРОГРАМА

Простирање електромагнетних таласа, засновано на Максвеловим једначинама, би требало посматрати као векторске таласе. Међутим, овакво посматрање је веома сложено и захтева доста времена и меморије на рачунару. Прорачун се поједностављује узимањем светлости - електромагнетног таласа као скаларног, што је омогућено у већини примена компјутерске холографије [48]. Простирање скаларног електромагнетног поља се израчунава помоћу неколико дифракционих прорачуна који имају широку примену на пољу оптике: код рачунарски генерисаних холограма, дигиталне холографије, фазног преузимања, шифровања и дешифровања слика, стеганографије, тродимензионалне анализе оптичких уређаја, дифрактивних оптичких елемената итд [49].

Прорачун дифракције је најважнији прорачун у рачунарској холографији. Користи се за математичко описивање електромагнетних таласа емитованих из тродимензионалних објеката и за реконструкцију снимљених тродимензионалних информација у холограмима [48].

CWO++ библиотека се претежно састоји из две класе C++ програма: CWO и GWO. CWO извршава дифракционе прорачуне на CPU (Central Processing Unit), има помоћне функције и омогућава нам израчунавање у случајевима следећих типова дифракције:

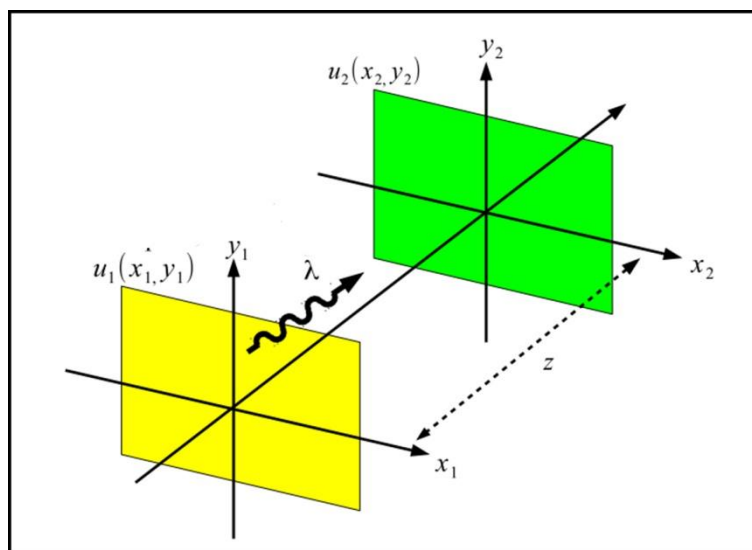
1. Френелова дифракција (конволуциони облик)
2. Френелова дифракција (Фуријеов облик)
3. Померена Френелова дифракција
4. Метод угаоног спектра
5. Метод помереног угаоног спектра
6. Прорачун 3Д дифракција

Првих пет су базични прорачуни на којима је шести базиран. Ови прорачуни се могу вршити и на GPU користећи GWO класу [49].

4.2.1 ДИФРАКЦИОНИ ПРОРАЧУН

Све ознаке коришћене у прорачуну дате су у табели 4.1.

Слика 4.2 шематски приказује неке од основних појмова при Френеловој пропагацији монохроматске светлости, таласне дужине λ , између две паралелне равни: равни извора $u_1(x_1, y_1)$ и крајње равни $u_2(x_2, y_2)$ [48].

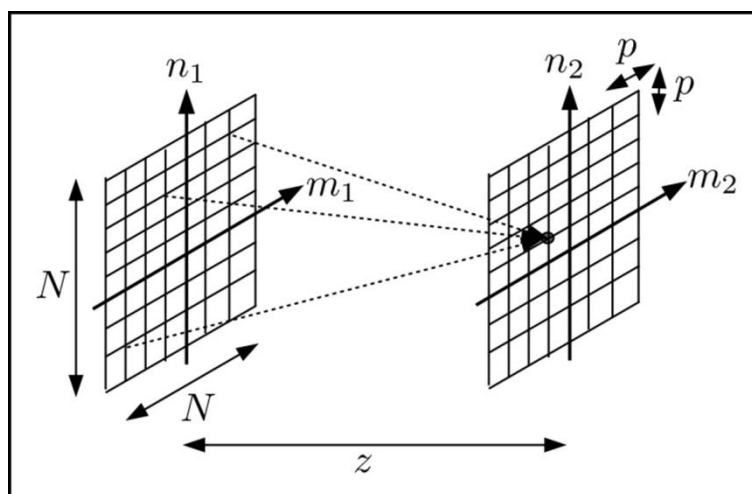


Слика 4. 2 Геометријска основа дифракционог прорачуна

[49]

Френелова дифракција има важну улогу у компјутерској холографији и користи се за велике дужине простирања. Пре приступања једначинама за типове дифракција значајне за програм који је коришћен у експерименту, објашњене су неке коришћене нумеричке примене писане на програмском језику C, за Френелову дифракцију у интегралном облику [48]:

- Дискретизација



Слика 4. 3 Шема дискретизације

[48]

Када у једначини координате представљају континуалне променљиве, оне се морају дискретизовати као на слици 4.3 ради примене брзе Фуријеове трансформације (FFT). Тада се и раван извора и крајња раван узоркују на пикселе и координате им се записују преко интервала (корака) узорковања:

(x_1, y_1) и (x_2, y_2) – координате

(m_1, n_1) и (m_2, n_2) – дискретизоване координате

- „Fast Fourier Transformation (FFT)“ – познат алгоритам за ефикасно израчунавање Фуријеових трансформација

4.2.2 ОПИСИВАЊЕ ФРЕНЕЛОВЕ ДИФРАКЦИЈЕ ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНВОЛУЦИЈЕ

Комплексна величина која описује реални лик предмета добијен при реконструкцији холограма, односно комплексна амплитуда јачине електричног поља у датој тачки у таласном фронту на крајњој равни, представља се следећим изразом [49]:

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right)}{i\lambda_z} \iint_{-\infty}^{+\infty} u_1(x_1, y_1) \cdot \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} \left((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\right)\right) dx_1 dy_1 \quad (4.1)$$

Уколико се уведу оператори за Фуријеову трансформацију $F[\]$ и инверзну Фуријеову трансформацију $F^{-1}[\]$, горња једначина се након примене теореме конволуције може записати у следећем облику

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right)}{i\lambda_z} F^{-1}\left[F\left[u_1(x_1, y_1)\right] F\left[h_F(x_1, y_1)\right]\right] \quad (4.2)$$

где је $h_F(x_1, y_1)$ функција импулсног одзива система (одзива на побуду) и изражава се

$$h_F(x_1, y_1) = \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} (x_1^2 + y_1^2)\right) \quad (4.3)$$

За нумеричку имплементацију, све просторне променљиве се морају дискретизовати после чега се може употребити FFT.

Дискретизовано описивање Френелове дифракције применом методе конволуције:

$$u_2(m_2, n_2) = \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right)}{i\lambda_z} \text{FFT}^{-1}\left[\text{FFT}\left[u_1(m_1, n_1)\right] \cdot \text{FFT}\left[h_F(m_1, n_1)\right]\right] \quad (4.4)$$

$$h_F(m_1, n_1) = \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} \left((m_1 \Delta x_1)^2 + (n_1 \Delta y_1)^2\right)\right) \quad (4.5)$$

m_1, n_1 – целобројни индекси као дискретизоване координате у равни извора

m_2, n_2 – целобројни индекси као дискретизоване координате у крајњој равни

$$m_1 \geq -\frac{N_x}{2}, \quad m_2 < \frac{N_x}{2} \quad \text{и} \quad n_1 \geq -\frac{N_y}{2}, \quad n_2 < \frac{N_y}{2} \quad (4.6)$$

N_x, N_y – број хоризонталних и вертикалних пиксела на равни извора и крајњој равни

$\Delta x_1, \Delta y_1; \Delta x_2, \Delta y_2$ – кораци узорковања

Кораци узорковања на крајњој равни су исти као на равни извора након дифракције:

$$\Delta x_2 = \Delta x_1 \quad \text{и} \quad \Delta y_2 = \Delta y_1$$

4.2.3 ФРЕНЕЛОВА ДИФРАКЦИЈА – ФУРИЈЕОВ ОБЛИК

Фуријеов облик Френелове дифракције [49] добија се када се квадратни члан у једначини 4.1 прошири:

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right)}{i\lambda_z} \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} (x_2^2 + y_2^2)\right) \iint_{-\infty}^{+\infty} u_1'(x_1, y_1) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda_z} (x_2 x_1 + y_2 y_1)\right) dx_1 dy_1 \quad (4.7)$$

$$u_1'(x_1, y_1) = u_1(x_1, y_1) \exp\left(i\pi \frac{(x_1^2 + y_1^2)}{\lambda_z}\right) \quad (4.8)$$

Дискретизовани Фуријеов облик описа Френелове дифракције:

$$u_2(m_2, n_2) = \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right)}{i\lambda_z} \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} (m_2 \Delta x_2)^2 + (n_2 \Delta y_2)^2\right) \cdot FFT[u_1'(m_1, n_1)] \quad (4.9)$$

Корак узорковања на крајњој равни је скалиран на:

$$\Delta x_2 = \Delta x_1 / (\lambda_z) \quad \text{и} \quad \Delta y_2 = \Delta y_1 / (\lambda_z)$$

Ограничења методе Френелове дифракције, која се често користи у компјутерској холографији су следећа:

- раван извора и крајња раван морају бити коаксијалне;
- интервали узорковања се не могу слободно постављати;
- равни морају бити паралелне;

У случају да посматране равни нису коаксијалне, користи се метода прорачуна померене Френелове дифракције [48].

4.2.4 ПОМЕРЕНА ФРЕНЕЛОВА ДИФРАКЦИЈА

Ова метода омогућава произвољне кораке узорковања који се постављају на раван извора и крајњу раван, као и помак од осе простирања што се назива простирање ван осе. Једначина је изведена из комбинације Фуријеовог облика Френелове дифракције и скалирана Фуријеовом трансформацијом. Изражена је дискретизована померена Френелова дифракција [49]:

$$u_2(m_2, n_2) = C_s FFT^{-1} \left[FFT[u_1'(m_1, n_1)] FFT[h_s(m_1, n_1)] \right] \quad (4.10)$$

$$C_s = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda_z} \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} (x_2^2 + y_2^2)\right) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda_z} (O_{x1} m_2 \Delta x_1 + O_{y1} n_2 \Delta y_1)\right) \cdot \exp\left(-i\pi (S_x m_2^2 + S_y n_2^2)\right) \quad (4.11)$$

$$u_1'(m_1, n_1) = u_1(m_1, n_1) \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda_z} (x_1^2 + y_1^2)\right) \cdot \exp\left(-i2\pi (m_1 S_x O_{x2} + n_1 S_y O_{y2})\right) \cdot \exp\left(-i\pi (S_x m_1^2 + S_y n_1^2)\right) \quad (4.12)$$

$$h_s(m_1, n_1) = \exp\left(i\pi (S_x m_1^2 + S_y n_1^2)\right) \quad (4.13)$$

где су:

(O_{x1}, O_{y1}) и (O_{x2}, O_{y2}) – координате почетка x-y мреже у равни

$$S_x = \frac{\Delta x_1, \Delta x_2}{\lambda_z}, \quad S_y = \frac{\Delta y_1, \Delta y_2}{\lambda_z}$$

$$\begin{aligned} x_1 &= m_1 \Delta x_1 + O_{x1}, & y_1 &= n_1 \Delta y_1 + O_{y1} \\ x_2 &= m_2 \Delta x_2 + O_{x2}, & y_2 &= n_2 \Delta y_2 + O_{y2} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Више детаља о представљеном прорачуну налази се у раду [50].

Табела 4.1 Дефиниције параметара за једначине 4.1 до 4.13

ОЗНАКА	ЗНАЧЕЊЕ
u_1, u_2	Комплексна амплитуда јачине електричног поља светлосног таласа у почетној и крајњој равни
x_1, y_1	Координате равни извора
x_2, y_2	Координате крајње равни
λ	Таласна дужина
z	Растојање између равни
F, F^{-1}	Фуријеова и инверзна Фуријеова трансформација
h_F, h_S	Функција импулсног одзива Френелове и померене Френелове дифракције
FFT, FFT^{-1}	Брза Фуријеова трансформација и инверзна брза Фуријеова трансформација
m_1, m_2, n_1, n_2	Дискретизоване координате
N_x, N_y	Број хоризонталних и вертикалних пиксела на равнима
$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2$	Кораци узорковања на координатама
u'_1, u'_2	Дискретизована комплексна амплитуда
k	Таласни број
$O_{x1}, O_{x2}, O_{y1}, O_{y2}$	Координате почетка x-y мреже у равни

У истраживању је за реконструкцију холограма највише коришћен математички модел за методу померене Френелове дифракције, јер нуди следеће могућности:

1. зумирање реконструкције;
2. удаљавање од нултог (централног) дифракционог реда, који није од значаја, или узрокује сметњу;
3. избор Френеловог растојања, односно промена тачке фокуса приликом реконструкције.

Приказан математички модел представља кључне делове имплементираног прорачуна нумеричке дифракције који је добијен помоћу програмског језика C++.

Стварајући интерферограм између референтног холограма који је снимљен пре укључивања додатног ласера и холограма насталог у току термалног процеса, остварена је могућност посматрања насталих промена. Суштина је да се за добијање интерференционих слика било ког типа (фазних или амплитудних), референтни холограм, односно холограм предмета у изворном стању, одузме од холограма предмета измењеног услед загревања или сличног дејства. Из тог поступка се ради реконструкција коју заправо посматрамо.

4.3 ТОК ИСТРАЖИВАЊА

Као што је у претходним поглављима утврђено, проучавање фотофоретског ефекта довело је до закључка да су биолошке структуре идеални медијуми за детекцију ИЦ зрачења. Као идеалан узорак биофотонске структуре изабрана су крила лептира из врста објашњених у параграфу 4.3.1.

Сам почетак експерименталног истраживања се заснива на подешавању и фиксирању оптичких и других елемената сетапа, као и постављању самог узорка. Када је сетап припремљен и механички стабилан, приступа се покретању програма за снимање холограма и паљење додатних ласера. Такође се подешава сноп ласера у односу на узорак, односно тачка на коју пада сноп зрачења (касније ће бити објашњена структура лептировог крила и потреба да се избегне гађање мреже вена на крилу). По завршеној припреми, обезбеђују се потпуни мрак и тишина у лабораторији, као и минимално кретање у околини сетапа.

Снимање се одиграва у циклусима. Сваки узорак се снима у четири циклуса за четири изабрана ласера различитих таласних дужина. Циклус подразумева снимање једним ласером снаге подешене на 0.8mW, промену снаге ласера на 1 mW и поновно снимање. Циклус се завршава покретањем програма за реконструисање холограма.

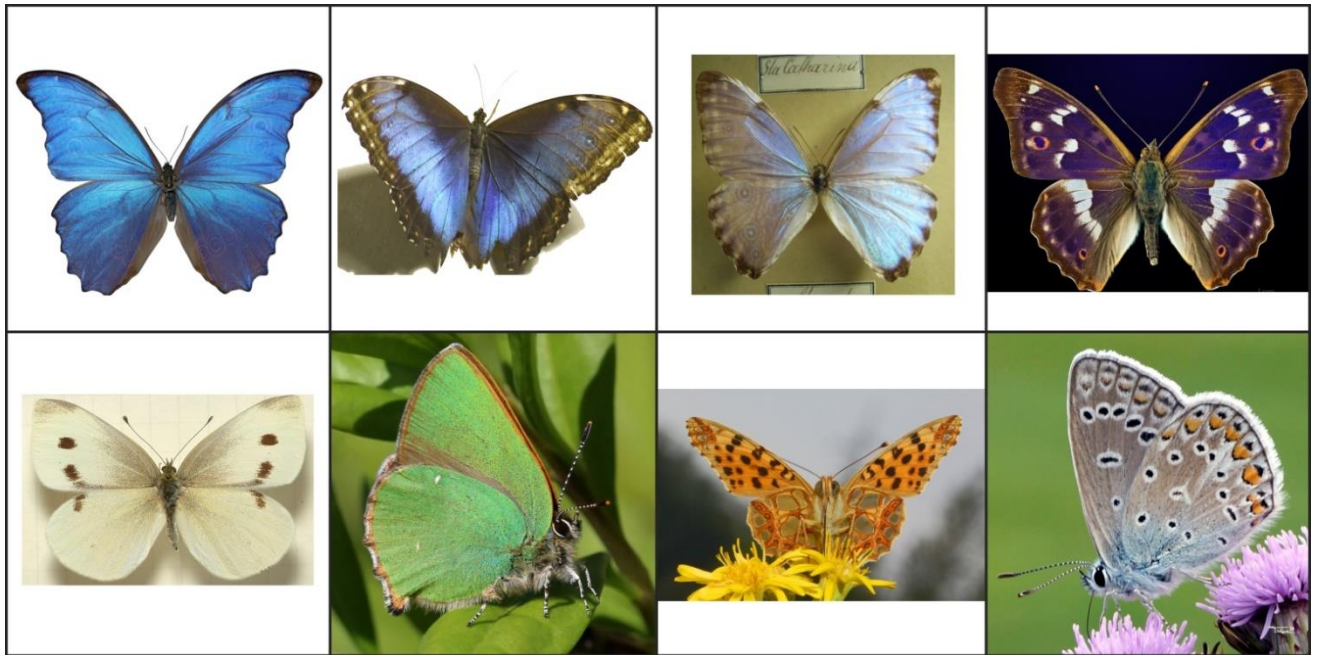
У другој фази експеримента, поступак се понављао, осим што се мењао редослед коришћења додатних ласера.

4.3.1 БИОЛОШКА КАРАКТЕРИЗАЦИЈА

За детекцију зрачења коришћена су крила различитих врста лептира, чији су кружни исечци коришћени без даљих модификација. Припрема је извршена опсецањем специјалним алатом, на димензије прилагођене идејној конструкцији носача узорка. Крила свих лептира су густо прекривена иридисцентним честицама различитих облика.

Тестирано је осам врста лептира (слика 4.4):

1. *Morpho didius* (Fabricius, 1807)
2. *Morpho peleides* (Kollar, 1850)
3. *Morpho portis* (Hubner, 1821)
4. *Apatura* (Fabricius, 1807)
5. *Pieris rapae* (Linnaeus, 1758)
6. *Calophrys rubi* (Linnaeus, 1758)
7. *Issoria lathonia* (Linnaeus, 1758)
8. *Polyommatus* (Latreille, 1804)



Слика 4. 4 Лептири. Горњи ред, с лева на десно: *Morpho didius* (Fabricius, 1807), *Morpho peleides* (Kollar, 1850), *Morpho portis* (Hubner, 1821), *Apatura* (Fabricius, 1807); Доњи ред, с лева на десно: *Pieris rapae* (Linnaeus, 1758), *Calophrys rubi* (Linnaeus, 1758), *Issoria lathonia* (Linnaeus, 1758), *Polyommatus* (Latreille, 1804)

[42]

Прве три врсте које припадају *Morpho* лептирима, као и *Apatura* имају структуру названу „јелкица“. У питању су честице облика микроконзола, које се састоје из слојевите структуре нанодимензија.

Pieris rapae је врста лептира чија крила имају нано грануларну структуру, а такође садрже и пигмент птерин.

Calophrys rubi је представник структуре фотонских кристала, *Issoria lathonia* има крајње једноставну структуру, док је структура типа Брагове решетке карактеристика лептира *Polyommatus*.

4.3.2 ПОЧЕТНА ИСПИТИВАЊА

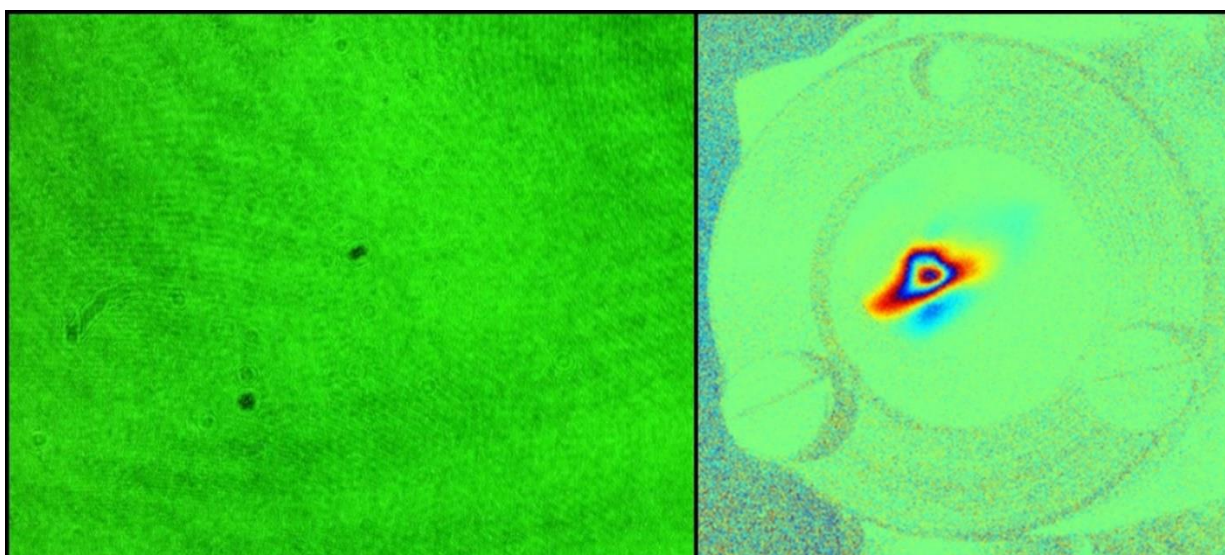
У структури крила лептира, зависно од врсте, налази се одређен број ситних веница (Слика 4.5). Када сноп електромагнетног зрачења погоди веницу, долази до његовог неправилног ширења, које утиче на расејање светлости и компликује даљу анализу. Из тих разлога, приликом подешавања ласерског снопа циља се „глатка“ површина између веница. Код неких врста, ово је једноставан задатак услед постојања мањег броја вена, док за неке представља поприличан изазов, због мреже ситних, многобројних веница.



Слика 4.5 Венице у структури крила лептира

Истраживање је спроведено у више фаза које су се састојала из описаних циклуса. Након пробних испитивања, и прве фазе, наступиле су три контролне фазе. У свакој од прве четири фазе је вршено испитивање осам наведених узорака у по четири објашњена циклуса. Поменуте фазе су се разликовале су се по редоследу укључивања додатних ласера. Након прве две фазе, направљени су нови узорци, исечени са истих крила уколико је величина то дозвољавала, или код ситнијих врста са нових.

Након прве четири фазе урађена је прва детаљна анализа резултата. Анализирани су холограми и њихове реконструкције. (Слика 4.6)



Слика 4.6 Лево: пример холограма, Десно: пример холографске реконструкције

Прва анализа је показала да мала разлика у примењеним снагама ласера не игра битну улогу и да се обе снаге могу користити. Због лакшег испитивања и ради уштеде времена и меморије рачунара установљено је даље коришћење само једне снаге ласера и то оне од 1mW.

Анализа фазне промене довела је до искључивања врста лептира који не показују значајне промене, односно довела је до закључка да је идеална структура „јелкице“. Овакви резултати су сузили број узорака само на оне из *Morpho* и *Apatura* врсте. Од три *Morpho* лептира изабран је најреактивнији на проучавани ефекат, *Morpho didius*. Са две одабране врсте узорака настављен је ток испитивања.

4.3.3 ДОДАТНЕ ПРОЦЕДУРЕ

Пета фаза испитивања је још једна контролна фаза, у којој су испитиване две коначно одабране врсте у по четири циклуса са ласерима различитих таласних дужина, али при истој снази ласера на узорку. Након ове фазе следе још две додатне фазе са додатним елементима испитивања.

4.3.3.1 Гађање различитих тачака

Овај део експеримента је био користан јер је показао слична својства на деловима крила са истим параметрима структуре. Остао је у својству корисне референце за даљи рад, пружајући сазнања да су разлике у испитиваним тачкама незнатне. Ипак, с обзиром на то да није било могуће прецизно координисати тачке гађања, тај приступ није био применљив у даљем делу експеримента.

4.3.3.2 Коришћење дифракционог оптичког елемента (DOE)

Дифракциони оптички елемент (Diffractive Optical Element) је дизајниран са микроструктурним обрасцима који мењају и контролишу фазу пропуштеног ласерског електромагнетног зрачења. Изменом микроструктура је могуће да овакав елемент произведе готово било који профил интензитета снопа или облик снопа.

DOE је уведен у експеримент са идејом да се снап подели на више једнаких снопова, односно да се узорак гађа на више места истовремено. Овај део експеримента није ушао у главну фазу из више разлога. Након примене је утврђено најпре да се не може одредити тачан интензитет снопа на узорку. Највећи проблем је представљала неуједначеност снага снопа, јер је основни, централни снап био јачи од осталих и правио сметње. С друге стране, са већ утврђеним обрасцем, није постојала могућност да се избегне гађање веница, па је отисак био крајње неправилно распоређен.

4.3.3.3 Метализиране биофотонске структуре

Осма фаза истраживања је заправо потпуно засебна целина. Спада у веома интересантну и потпуно нову област. Резултати ове фазе нису коришћени и од мањег су значаја за предмет дисертације, али употпуњавају истраживање и отворили су могућности за даљи рад и нове анализе. Испитивањем модификованих узорака, посматран је утицај модификације на одговор биофотонског система.

У досадшњим холографским испитивањима рађено је на неким металним структурама, али је ово први пут да се холографија примењује на овом типу плазмонице. Кинески научници су направили експеримент у ком су крила различитих лептира пунили различитим металима. У оквиру овог истраживања, конкретно је испитивано крило лептира *Hebomoia glaucippe* (*Linnaeus, 1758.*). Први узорак овог крила пуњен је једињењем бакар-моносулфид (CuS), док је други узорак након истог процеса пуњења присут честицама злата (Au) (слика 4.7). Очекивани су интересантни резултати, имајући у виду да се комплексни индекс преламања мења додавањем метала у полимер.



Слика 4. 7 Пуњени лептири (с лева на десно): *Neotoma glaucippe* (Linnaeus 1758.), иста врста пуњена CuS, иста врста пуњена CuS и посута честицама злата

Ова фаза се дакле састојала из снимања две врсте узорака у четири циклуса. Оно што се показало као веома интересно је да је узорак са честицама злата знатно осетљивији од свих претходно испитиваних узорака. Показана је знатна апсорпција топлоте услед зрачења, као и да узорак до краја снимања не стиже да се у потпуности охлади, односно врати у првобитно стање. За разлику од узорка са златом, плазмонски узорак без злата показао је малу осетљивост, чак мању од већине узорака обичних лептира. Овакав резултат се може објаснити вредношћу индекса преламања бакар-моносулфида, по којој је ово једињење практично сличније полимеру него металу.

Испитивање „кинеских лептира“ се показао као сувишно за предмет дисертације, али као веома корисно за општа сазнања везана за могућности холографије и фотофоретског ефекта.

4.4 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА ¹

Ово поглавље представља есенцијални део дисертације и описује цео ток експерименталних истраживања, као и добијене резултате.

Претходно описана холографска метода је модификована и дефинисана као метода троструког снимања. Односи се на симултано холографско снимање праћено фотографском и термалном камером [47].

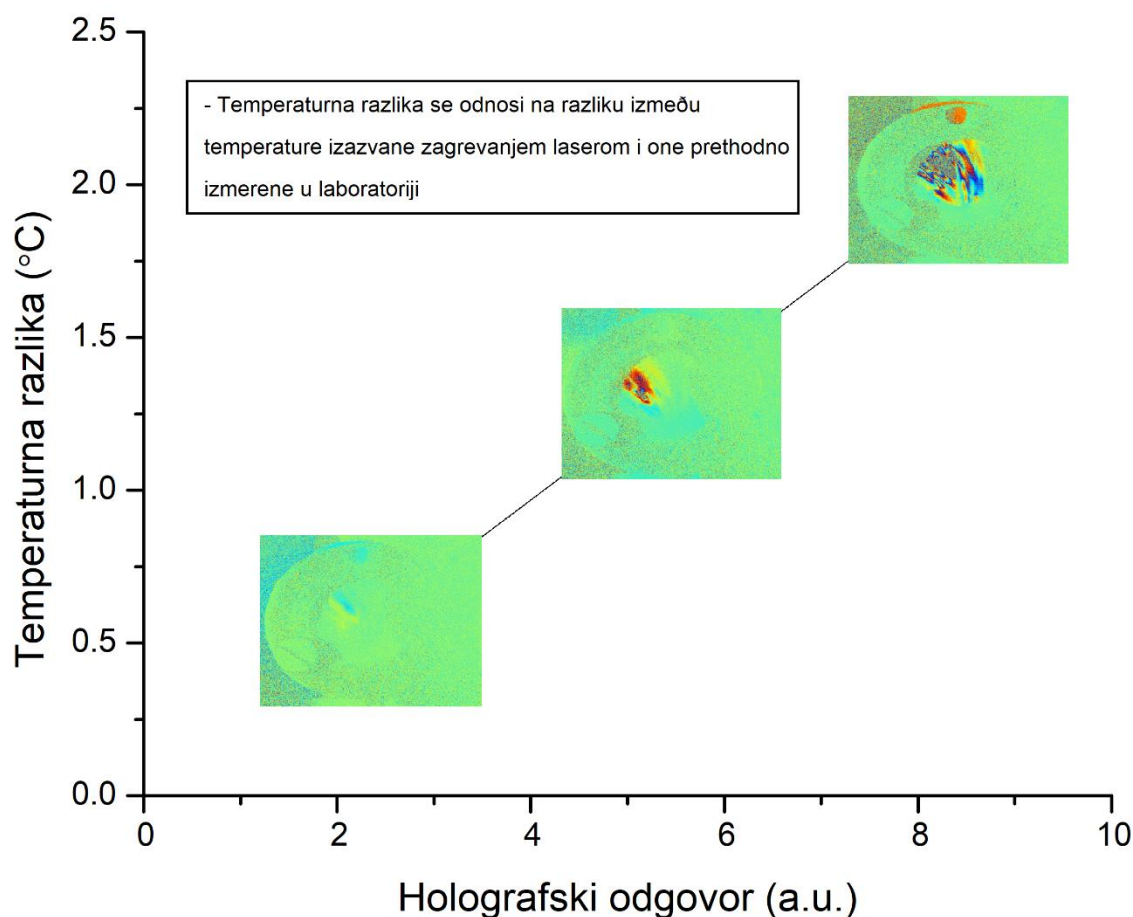
Анализа резултата експерименталног истраживања довела је до изванредних закључака у виду оригиналних резултата који су по први пут објављени у научној литератури. Најважније је напоменути да је сам ефекат померања, односно деформације, регистрован и детаљно анализиран.

Најпре је постављено питање: Шта је то што прави разлику у јачини ефекта, односно зашто се појављују разлике у фазним мерењима? Да би се одговорило на ово кључно питање анализирани су различити утицаји.

Утицај температуре на холографски одговор

Загревање узорка изазива фотофоретски ефекат који доводи до деформације честица истог. Теорија предвиђа да док је деформација еластична, њен интензитет линеарно расте са повећањем температуре [23]. Ова чињеница је и експериментално поткрепљена на примеру свих осам узорака. Холографски одговор који бележи вибрације система се линеарно повећава са порастом температуре (слика 4.8). Зависност температуре се директно визуелно читава на холографским реконструкцијама:

¹ Одељак 4.4 је базиран на раду у оквиру НАТО пројекта на ком је кандидат учествовао у оквиру истраживања извршених на Институту за физику.

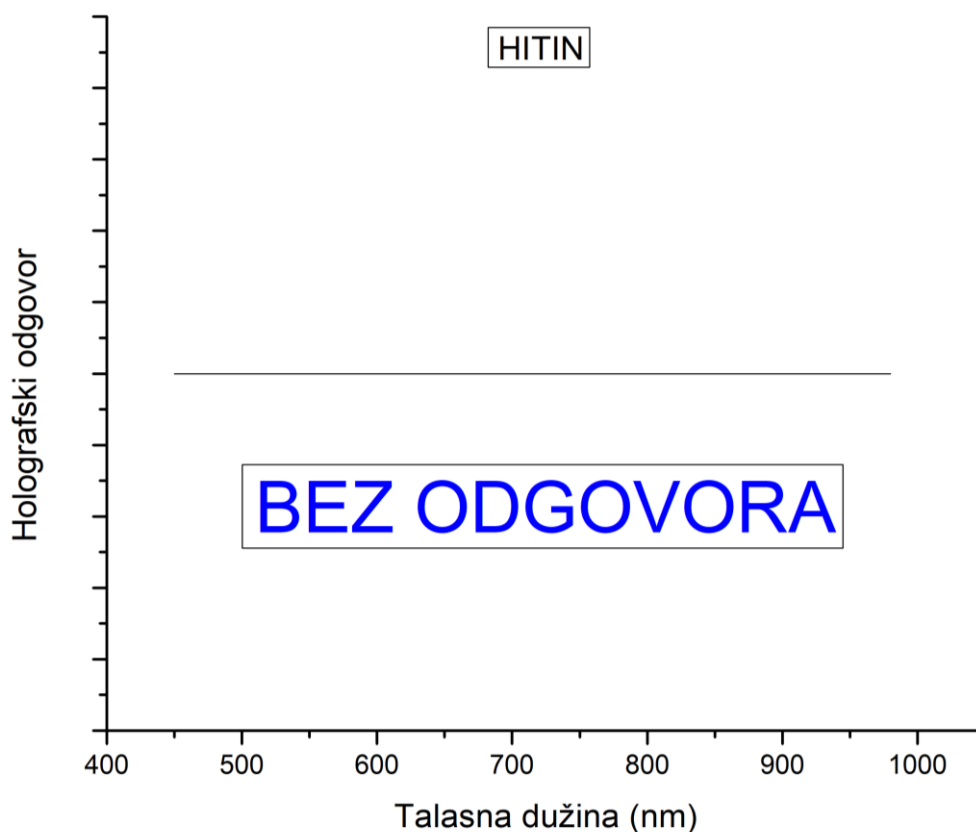


Слика 4.8 Развој холографске реакције у функцији температуре

Зависност деформације од хемијског састава узорка

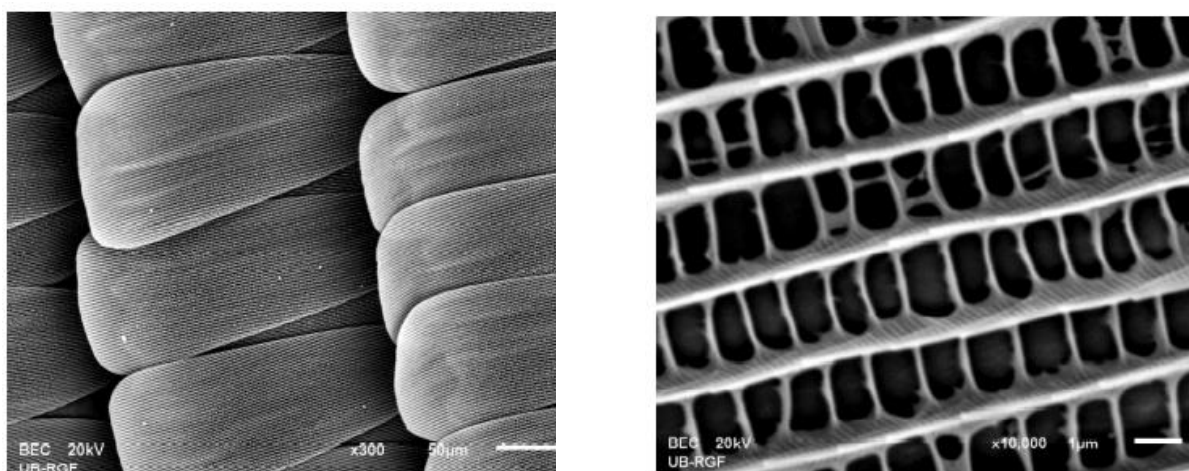
Крило лептира се састоји од биополимера – хитина, полисахарида који је основни градивни елемент природних фотонских структура. Како би се проверило да ли холографски одговор зависи од хемијског састава, односно, како би се искључио утицај хемијске структуре, направљен је узорак филма од хитина, истог облика и димензија као испитивани узорак лептировог крила. Овако модификовани узорак подвргнут је идентичном испитивању као и делови крила лептира и нису запажене никакве промене у погледу холографског одговора (слика 4.9). На овај начин је доказано да сама хемијска структура не утиче на фотофоретски ефекат.

Такође су у смислу биофотонске хемијске структуре, у обзир узети пигменти. Наиме, могло би се на први поглед очекивати да би присуство пигмената морало утицати на ефекат, међутим, пигменти испитиваних врста апсорбују светлост таласних дужина много мањих од оних које су коришћене у експерименту. Из наведених разлога, пигменти који се налазе у биофотонској структури немају значајан, мерљив утицај на динамику фотофоретског одговора.

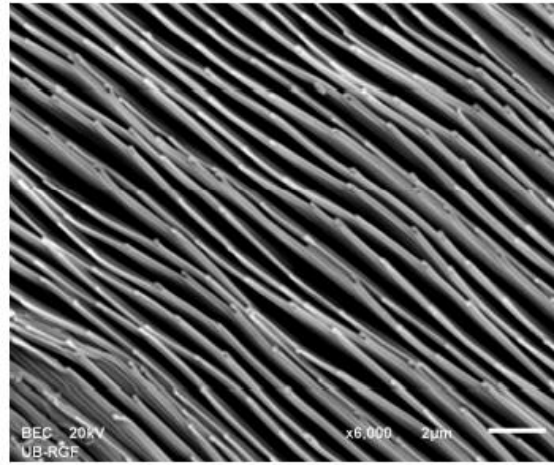
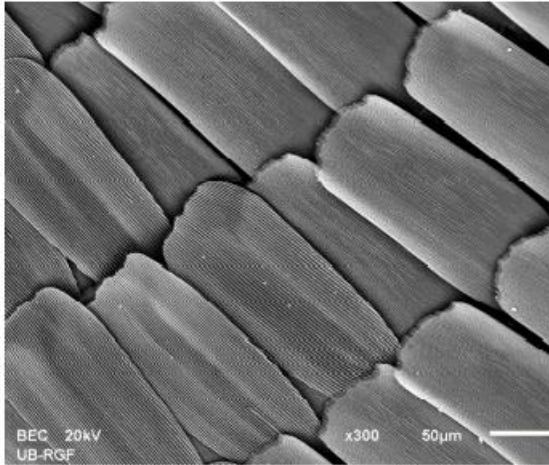


Слика 4.9 Дијаграм зависности холографског одговора од таласне дужине ласера, за хитински филм

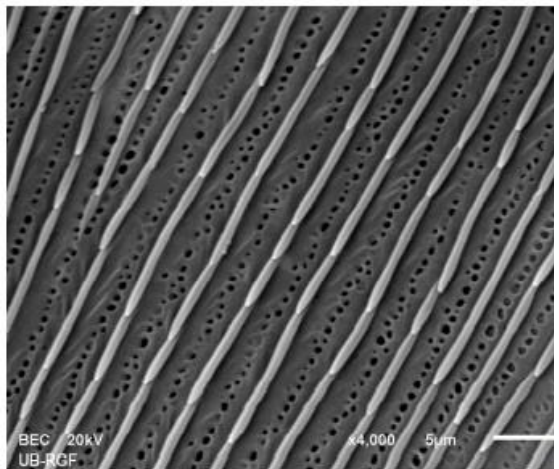
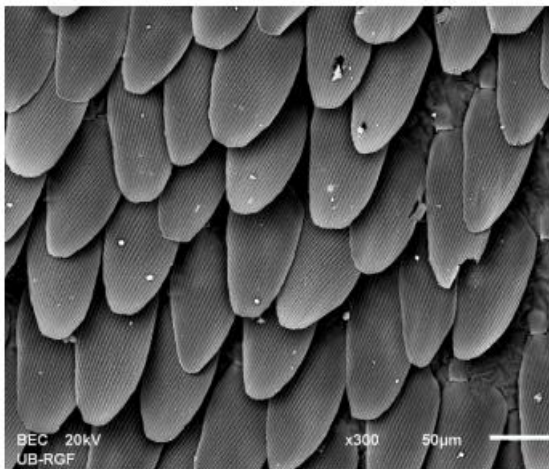
Када су искључени утицаји хемијског састава, остао је утицај физичке структуре, у оквиру чега је разматрана коругација лептировог крила. Утицај коругације се показао као кључни утицај од ког зависи јачина фотофоретског ефекта. Идеална структура може да се апроксимира структуром типа „јелкице“. Овакав податак је од огромног значаја у смислу производње детектора, јер даје конструктивно решење у смислу габаритног коругационог својства потребног за успешно пројектовање истог. Морфологија површине узорака крила два лептира репрезентативна за наведени тип структуре окарактерисана је скенирајућим електронским микроскопом (слике 4.10-4.14):



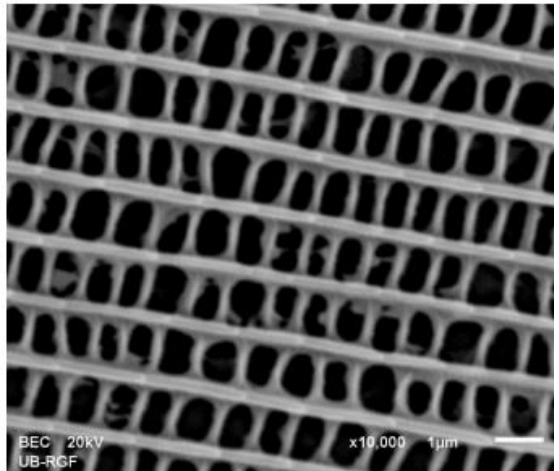
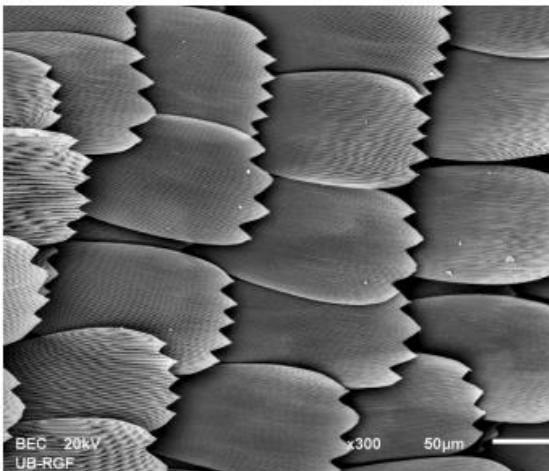
Слика 4.10 Микроскопски снимак; Крило лептира Апатура, страна 1: увећање 300x (лево) и 10000x (десно)



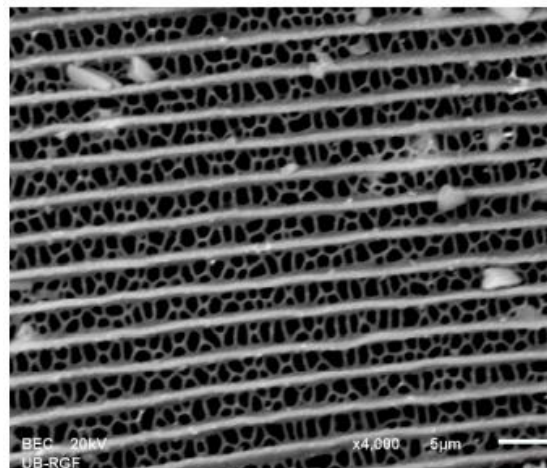
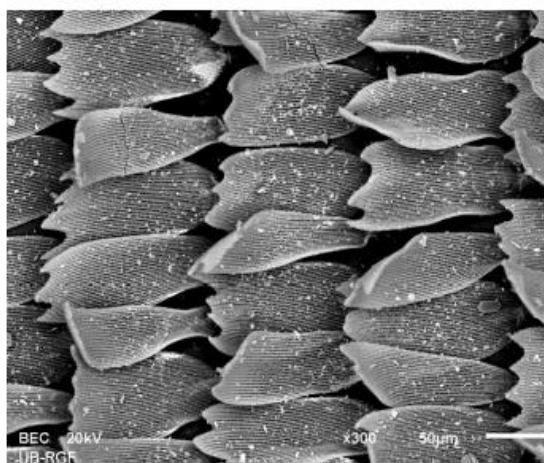
Слика 4.11 Микроскопски снимак; Крило лептира Апатура, страна 2: увећање 300x (лево) и 6000x (десно)



Слика 4.12 Микроскопски снимак; Крило лептира Morpho didius, страна 1: увећање 300x (лево) и 4000x (десно)



Слика 4.13 Микроскопски снимак; Крило лептира Morpho didius, страна 2: увећање 300x (лево) и 10000x (десно)



Слика 4.14 Микроскопски снимак; Пуњено крило лептира *Neobomoia glaucippe*, страна 2: увећање 300x (лево) и 6000x (десно)

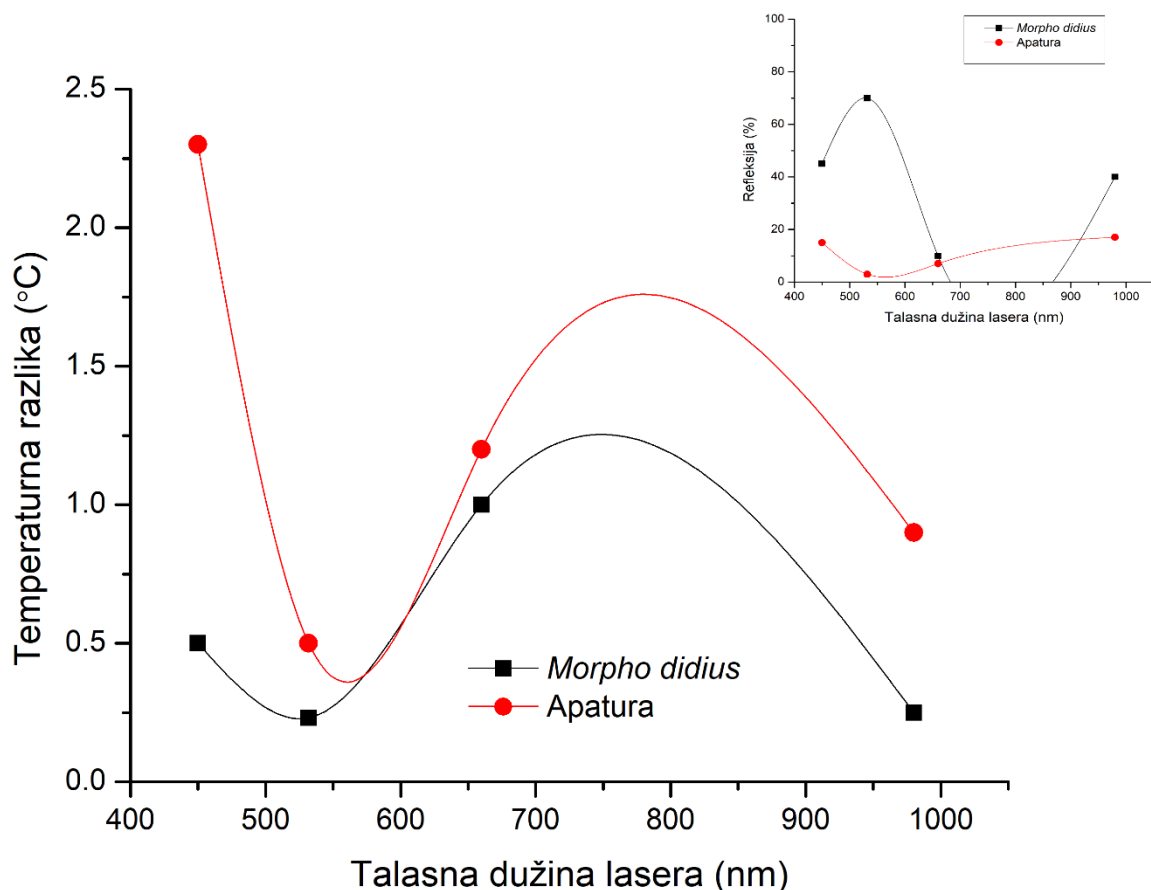
На основу поређења величине елемената структуре крила, закључено је да се издвајају три елемента структуре крила. Међу њима су скале највећи елемент и састоје се из тзв. јелкица са одређеним бројем парова микроконзола. Поређењем димензија основних елемената крила, увиђа се једина битна разлика код узорака *Apatura* и *Morpho didius* у виду димензија самих скала. Димензије скала *Morpho* лептира су дупло већег реда величине од скала *Apatura* лептира (табела 4.2). Оно што је важно, долази се до карактеристичних димензија јелкица, што је кључни фактор за касније могућности пројектовања детектора. Табела у наставку упоређује наведене димензије.

Табела 4.2 Димензије структурних елемената крила лептира

Величина	<i>Apatura</i>	<i>Morpho didius</i>
Дужина скале [µm]	120-150	200
Ширина скале [µm]	60	100
Ширина јелкице [µm]	0.5	0.6
Размак између јелкица [µm]	0.7	0.7

Биофотонске структуре припадају фотонским структурама, а као такве, оне имају способност да модификују пропагацију електромагнетних таласа (светлости). Могућност простирања светлости различитих таласних дужина кроз њих се разликује, па је из тих разлога очекиван одређен утицај таласних дужина на загревање, односно деформацију структуре. Овакво размишљање довело је до мерења која су даље описана.

Такође је посматран и утицај таласне дужине ласерске светлости, тј. енергије упадног фотона на загревање самог узорка (слика 4.15).



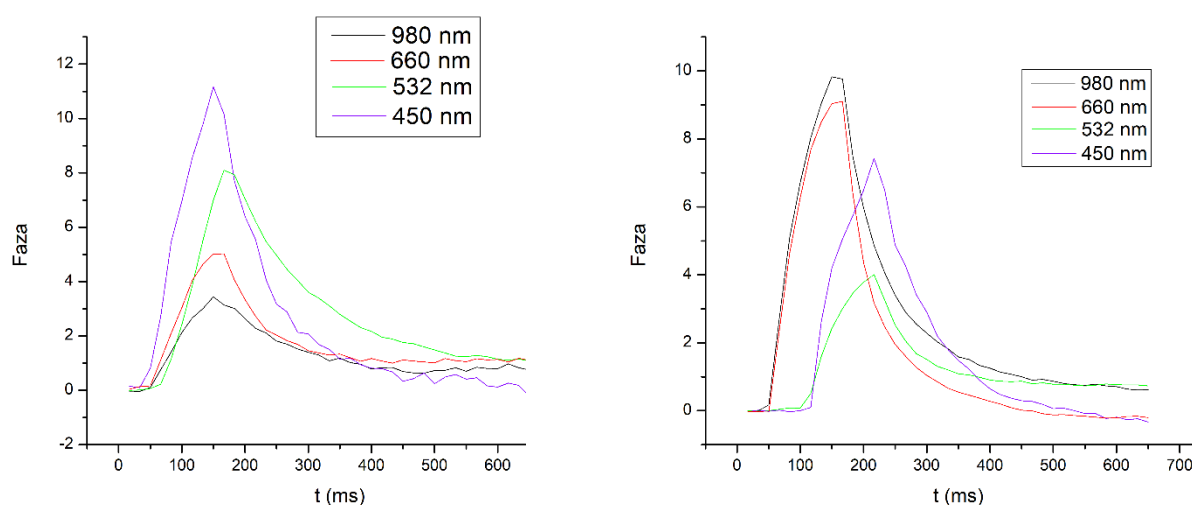
Слика 4.15 Дијаграм зависности загревања узорка од таласне дужине (са додатним дијаграмом зависности рефлексије од таласне дужине)

Измерена је нелинеарна зависност температуре, односно загревања објекта, у функцији таласне дужине. Уочена непропорционалност директно указује на утицај фотонске структуре на степен загревања. Узимајући у обзир да испитиване структуре показују најизраженију дифракцију за одређене таласне дужине у видљивој и ИЦ области, може се претпоставити да је, због интерференционих ефеката унутар разматране периодичне фотонске структуре (структуре са периодичном променом диелектричне пермитивности и индекса преламања средине) и постојања тзв. „фотонских забрањених зона“ (у складу са обликом зависности пропагационих константи светлосних таласа од таласног броја) – слабије изражена (спутана) трансмисија поменутих таласних дужина кроз дату структуру. Стога, интеракција материјала са тим таласима ефективно слабије утиче на промену температуре узорка и појаву механичког помераја, тј. деформације. Графичка зависност приказана на слици 4.15 се може корелисати са дијаграмима рефлексије испитиваних биофотонских структура, али је детаљно испитивање овог феномена још увек у току. Овај правац истраживања је значајан због тога што показује утицај наноструктуре на интеракцију светлости са материјом. Конкретно за ову тезу важан је онај део енергије светлосног таласа који се преноси кроз испитивану структуру и изазива деформацију, која је суштински тема посматрања и анализе.

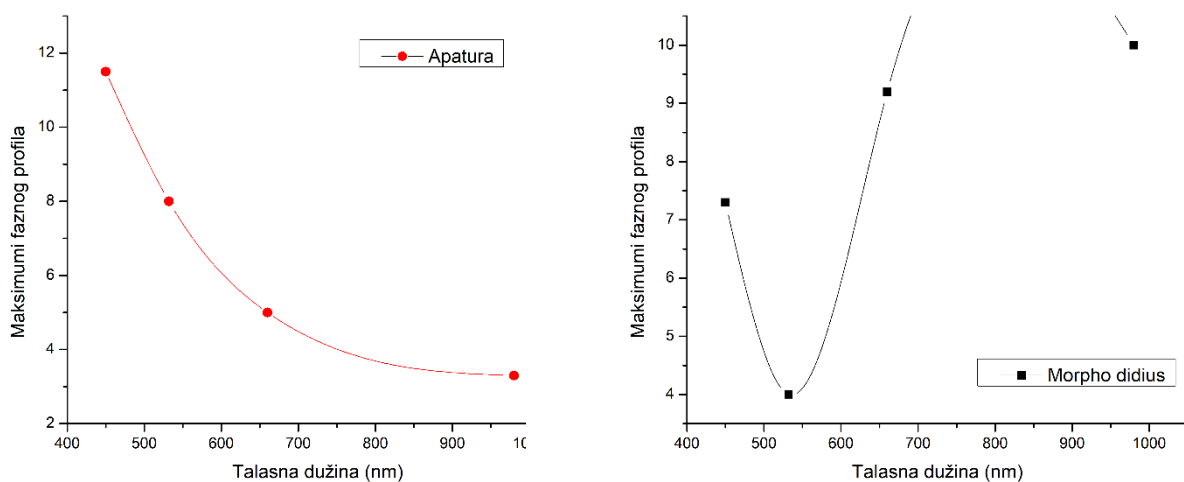
Предност холографије је што постоји могућност да се анализира фаза. Фаза, као показатељ простирања вектора електромагнетног поља је од великог значаја за анализу осетљивости структуре на зрачење. Као што је већ речено, сложене природне структуре, одређене таласне дужине пропуштају лакше, док неке не пропуштају уопште. Имајући то у виду, даље истраживање је усмерено на корелисање оптичке фазе са добијеним померајем.

Фазе, као важан параметар за карактеризацију деформације, су израчунате софтверски из реконструкција снимљених холограма. Интеракција светлости са фотонским структурама зависи од таласне дужине светлости и корелације између димензија структуре и таласне дужине светлости. Посматрајући графике фазе у функцији таласних дужина, уочава се нелинеарна зависност. Мерена нелинеарност се може тумачити као последица различитог расејања светлости различитих таласних дужина и директно показује утицај структуре на интеракцију светлости са материјалом, односно интерференцију светлости [3]. Утицај таласне дужине показаће се као важан параметар и индикатор за нека даља истраживања.

У наставку (слике 4.16-4.18) су приказани дијаграми зависности фазе од врсте узорка и таласних дужина употребљене ласерске светлости.

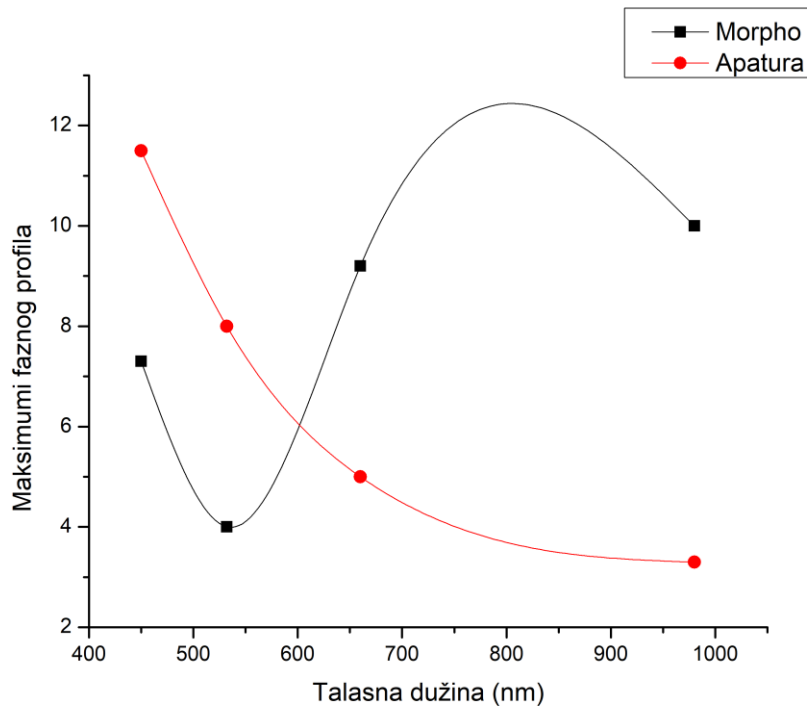


Фазни дијаграм за четири таласне дужине: Крило лептира *Apatura* (лево); Крило лептира *Morpho didius* (десно)



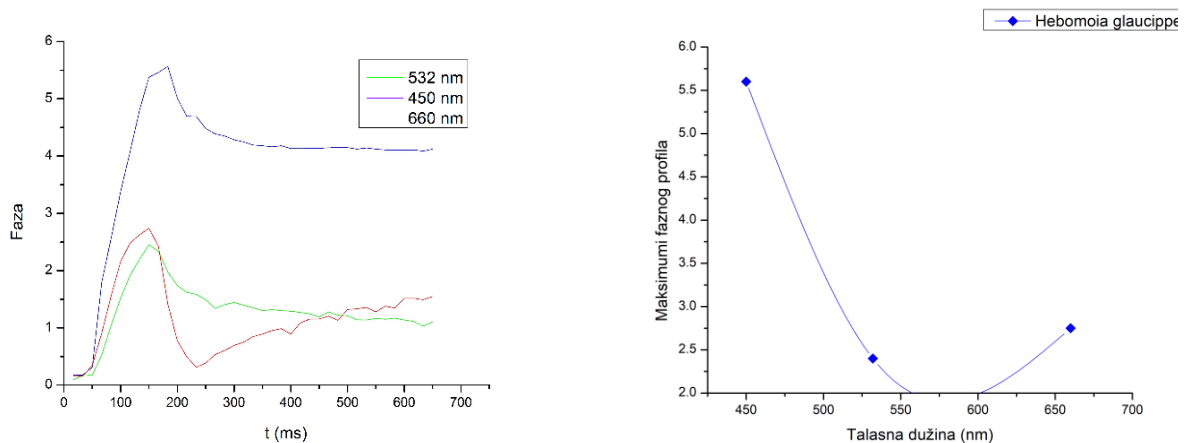
Дијаграм зависности фазе од таласне дужине (максимуми): Крило лептира *Apatura* (лево); Крило лептира *Morpho didius* (десно)

Слика 4.16 Фазни дијаграми за четири таласне дужине



Слика 4.17 Упоредни дијаграм зависности фазе од таласне дужине за лептире *Morpho didius* и *Apatura*

Слика 4.17 приказује максимуме фазног профила за обе врсте узорака – лептира, израчунате за четири мерене таласне дужине. Потпуно различит фазни одговор потврђује утицај наноструктуре на пропацију електромагнетних таласа различитих таласних дужина кроз биофотонске структуре.

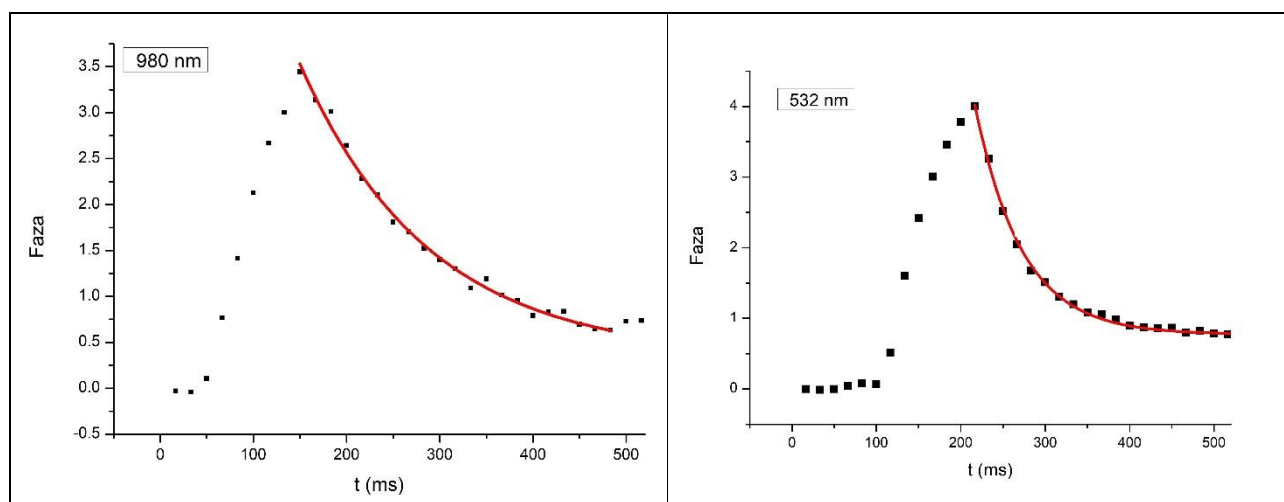


Слика 4.18 Дијаграм фазе за различите таласне дужине (лево) и максимуми фазног профила (десно) мерени на крилу модификованог лептира *Hebomoia glaucippe*

Слика 4.18 приказује фазни одговор код структура лептира, додатно модификованих честицама метала и металних оксида. Модификована крила ће бити подвргнута даљој анализи

због присуства метала/металних оксида унутар структуре, који додатно утичу на оптички одговор својом хемијском или плазмонском структуром (природом).

Као параметар који описује стабилност оптичког одговора, односно утицај деформације/релаксације система на фазу холографског одговора, а на основу анализе претходно добијених дијаграма, мерено је време релаксације. Релаксација фазе таласа у функцији времена је фитована експоненцијалном функцијом и за сваку таласну дужину добијени су графици временске зависности истог типа.



Слика 4.19 Фазни дијаграми чији су опадајући делови фитовани експоненцијалном функцијом (Aputura)

На сликама 4.19 и 4.20 су дати примери фитовања фазног дијаграма за две таласне дужине, док је упоредни приказ података добијених фитовањем аналогних дијаграма за четири таласне дужине, при анализи две врсте лептира, дат табеларно у наставку.

Табела 4.3 Табела израчунатих времена релаксације фазе

Таласна дужина [nm]	Aputura		Morpho didius	
	Време релаксације [ms]	Стандардна девијација [ms]	Време релаксације [ms]	Стандардна девијација [ms]
450	79	3	89	2
532	125	2	56	1
660	59	2	30	2
980	138	9	71	2

Уочава се релативно спора релаксација система. Како је у питању нанометарска структура, коефицијент еластичности се линеарно смањује са смањењем њених димензија. Узимајући у обзир време релаксације, можемо претпоставити да мерена релаксација представља збирни ефекат купловања разних наноосцилатора (наноструктура) са процесом хлађења. У механичком смислу, може се рећи да је предмет посматрања велики број осцилатора са различитим вредностима фазе у истом тренутку.

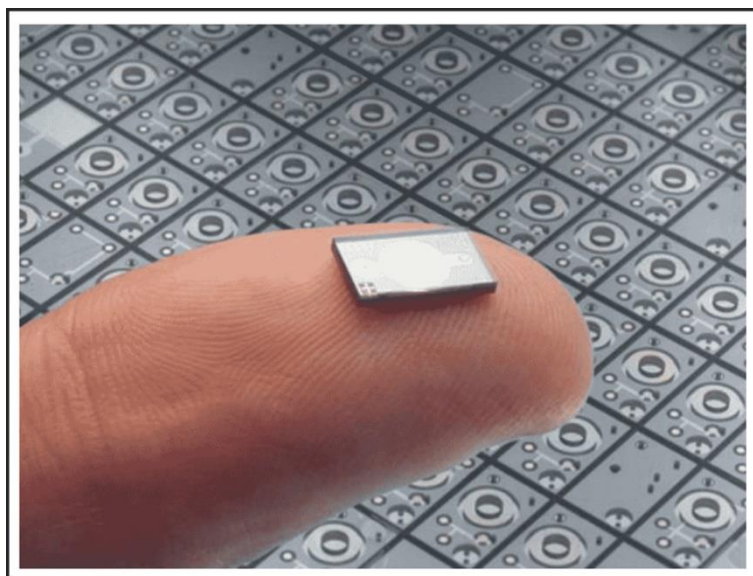
Финална анализа експерименталних резултата истиче суштину научног доприноса истраживања кандидата, односно разоткривање до сада непознатих карактеристика термофретског/фотофретског ефекта и значај његове примене у производњи нано система.

5. ДЕТЕКТОР – ОСВРТ ИЗ УГЛА МАШИНСТВА: МЕМС/НЕМС

5.1 МИКРО/НАНО ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧКИ СИСТЕМИ – МЕМС/НЕМС

5.1.1 УВОД У МЕМС/НЕМС И ЊИХОВ ЗНАЧАЈ

Нанотехнологија [51] је рођена пре 60 година, на годишњем састанку Америчког удружења физичара (American Physical Society) 1959. године, када је физичар Ричард Фејнмен (Richard Feynman 1918.-1988.) представио своје запажање о постојању нове области у физици [52]. Интеграцијом електричних и механичких својстава у уређај који се може конструисати у димензијама мањим од стотинак нанометара рађа се поље микро и нано електромеханичких система (слика 5.1).



Слика 5. 1 МЕМС/НЕМС

[53]

Ако погледамо из перспективе историје и пионира МЕМС технологије, први експериментални рад који је допринео пољу микро/нано система, био је рад америчког електро инжењера Харвија Натансона (Harvey Nathanson 1936.-2019.) [54]. Он развија транзистор са филтером пропусником опсега (band-pass device), са једноставном конзолном гредом која се сматра централним елементом. Временом технологија напредује и 1993. доктор Мотамеди (Doctor M. E. Motamedi) званично уводи појам МОЕМС-а (микро опто-електромеханички системи) [55]. Брзина прогреса на овом пољу је очигледна и о томе сведоче бројни научни радови објављени у последњих десет година [56] [57] [58]. Увођење појма МОЕМС значајно је у инжењерском смислу, док се у научном практично своди на исто као и МЕМС имајући у виду да се оптичка својства мењају у складу са смањењем димензија структуре.

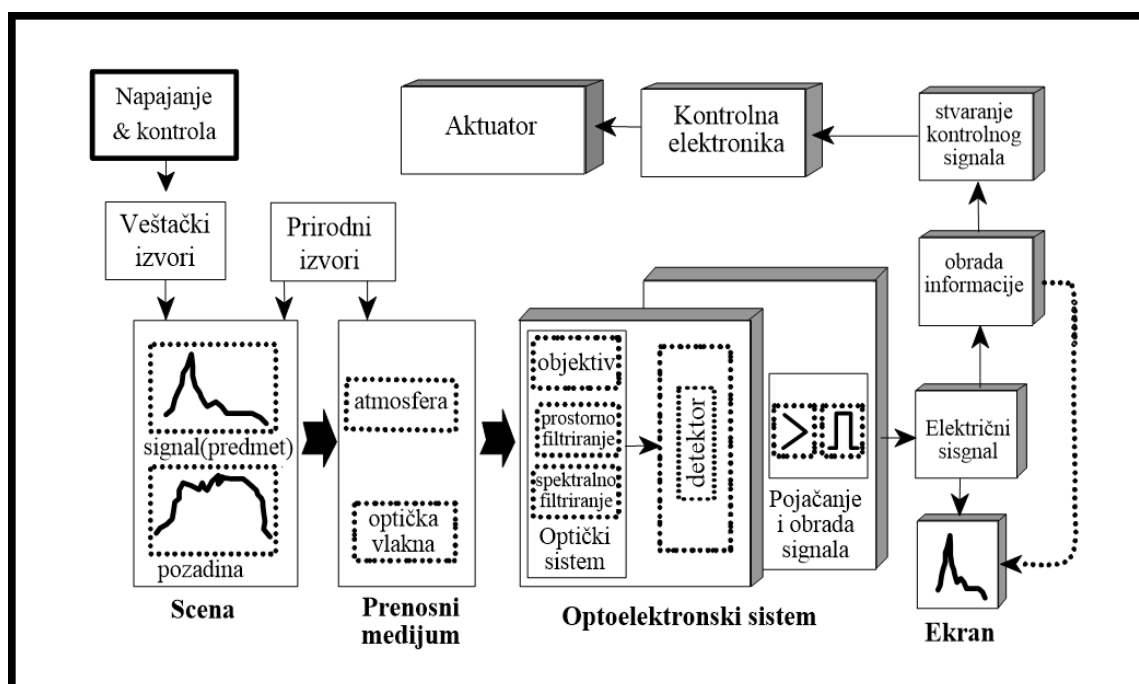
Уопштено говорећи, МЕМС/НЕМС се састоји од неколико компоненти које су у интеракцији са спољашњим стимулансима. Имајући у виду изузетно мале димензије оваквих уређаја, битно је уочити физичке релације и законитости на нано скали и повезати их са законитостима који важе на макро нивоима.

5.1.2 ДЕТЕКТОР КАО КОНКРЕТАН ПРИМЕР МЕМС/НЕМС

Предмет истраживања се односи на интеракцију светлости са материјалом, развој ИЦ детектора и њихову потенцијалну примену у војне сврхе. Са оптичког гледишта, разликују се три апроксимативна приступа:

- примена геометријске оптике у оквиру које се разматра објекат чије су димензије знатно веће од димензија таласне дужине светлости;
- примена таласне оптике, у случају када су таласне дужине електромагнетног зрачења реда величине карактеристичних димензија у структури узорка тј. материјала;
- примена квантне оптике, у оквиру које се разматра честична (фотонска) природа светлости при њеној интеракцији са материјалом.

У овој дисертацији се примењује апроксимација таласне оптике и феномен интерференције са циљем пројектовања термалног детектора.



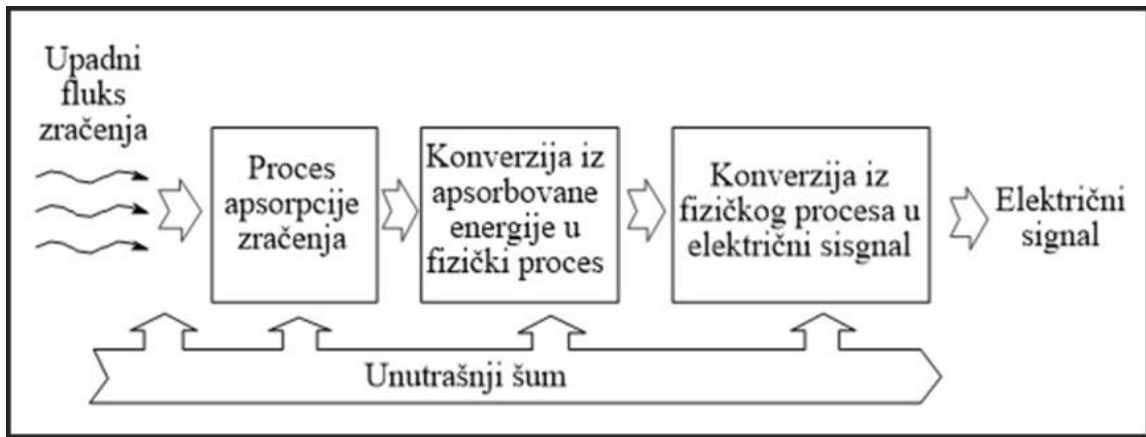
Слика 5. 2 Општи блок дијаграм оптоелектронског детекторског система

[3]

За практичну израду радиометарског детектора (слика 5.2) потребно је успешно применити три корака:

1. Анализирати интеракцију примењеног зрачења са материјалима који дају тражени ефекат
2. Проучити процесе који доводе до интеракције са спољашњом средином (нпр. околним медијумом) и претварају те интеракције у излазни сигнал који је најчешће у електричном облику
3. Препознати електрични сигнал генерисан зрачењем унутар ометања у окружењу у виду различитих шума.

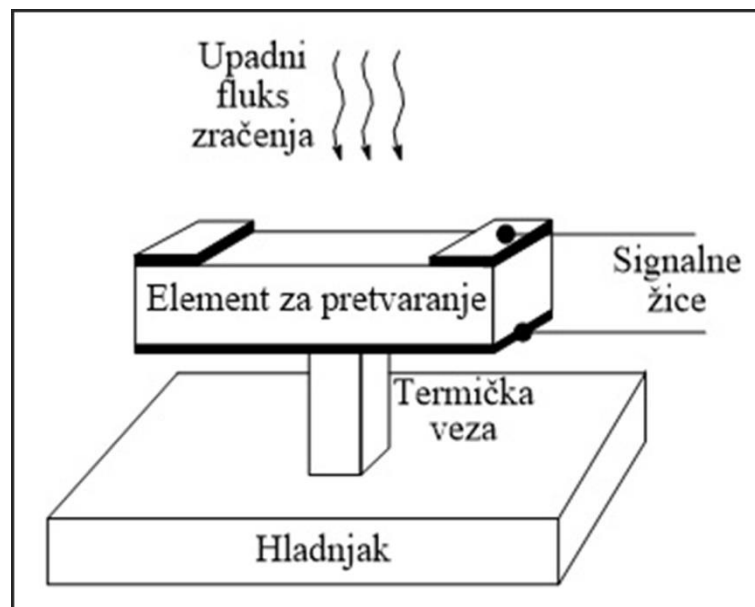
На слици 5.3 је дат шематски приказ процеса детекције зрачења.



Слика 5. 3 Шема детекције зрачења

[3]

Како се детекција базира на интеракцији електромагнетног зрачења са материјалом, издвајају се два најзначајнија вида ефеката који доминирају: термални и фотонски [3].



Слика 5. 4 Структура термалног детектора

[3]

Базични модел структуре термалног детектора дат је на слици 5.4. Детектор је представљен плочом која је повезана са хладњаком велике масе и великог термичког капацитета, и то таквог да му се температура практично не мења при размени мале количине топлоте. Детектор има топлотни капацитет H_C а топлотни губици услед процеса провођења топлоте кроз термалну везу изражени су преко коефицијента трансмисионих губитака топлоте G_T . Без упадног зрачења, детектор има температуру T хладњака. Процес апсорпције упадног зрачења повећава температуру детектора за ΔT . Пораст температуре се може наћи решавањем једначине топлотне равнотеже [59]. Све ознаке из следећих једначина појашњене су у табели 5.1:

$$\alpha \cdot W_e = H_C \frac{dT}{dt} + G_T \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

αW_e - апсорбована упадна снага која се састоји из две компоненте (константне и модуларне):

$$W_e = W_{e0} + W_{e\omega} \cdot \exp(j\omega t) \quad (5.2)$$

Пораст температуре је онда:

$$\Delta T = \frac{\alpha W_{e\omega}}{G_T + j\omega H_C} \cdot \exp(j\omega t) \quad (5.3)$$

Уколико је модуларни део упадне снаге степенаста функција, температурни пораст је експоненцијалан:

$$\Delta T(t) = \frac{\alpha W_{e\omega}}{G_T} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (5.4)$$

Где је $\tau = H_C / G_T$ време емисије.

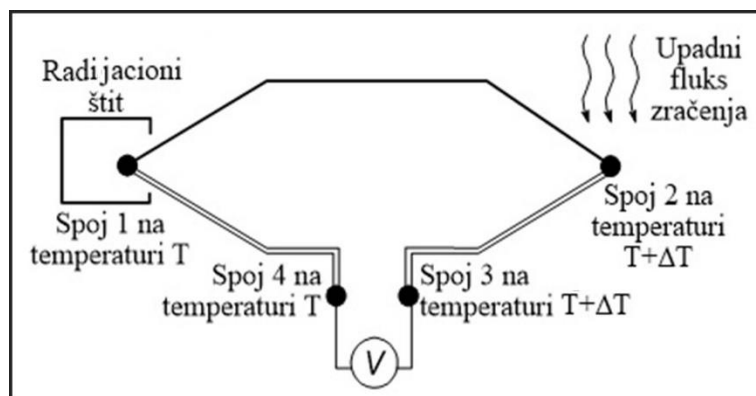
Када се утврди понашање пораста температуре у току времена, могућа је анализа осталих параметара термалних детектора.

Табела 5.1 Дефиниције параметара за једначине 5.1 до 5.4

ОЗНАКА	ЗНАЧЕЊЕ
α	Коефицијент апсорпције
W_e	Упадна снага зрачења
H_C	Топлотни капацитет детектора
ΔT	Пораст температуре услед апсорпције упадног зрачења
t	Време зрачења
G_T	Коефицијент трансмисионих губитака топлоте
W_{e0}	Константна компонента упадне снаге
$W_{e\omega}$	Модуларни део упадне снаге
j	Имагинарна јединица
ω	Кружна фреквенција
τ	Време емисије

Неки од најпознатијих термалних детектора, су термопар базиран на термоелектричном ефекту, болометар, базиран на болометарском ефекту и детектор базиран на пироелектричном ефекту [59].

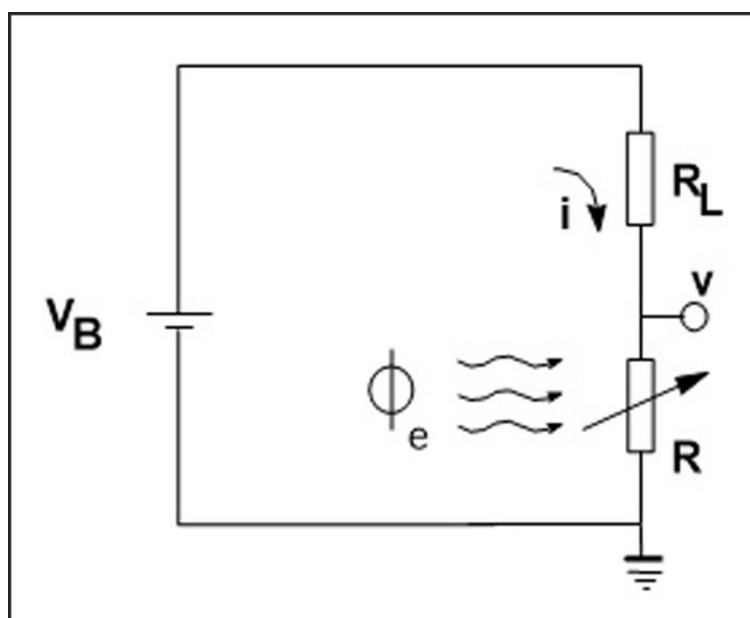
Термопарови су најстарији пројектовани детектори зрачења. Термоелектрични ефекат се базира на појави мале разлике потенцијала на слободном крају споја два проводника, а та разлика потенцијала зависи од разлике у температури топлијег и хладнијег споја метала [3]. Шема структуре термопара је дата на слици 5.5:



Слика 5. 5 Шема термопара

[3]

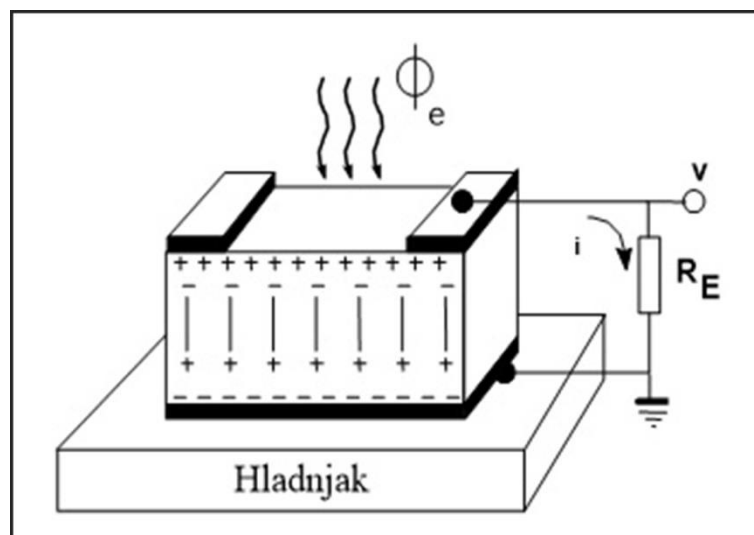
Болометри су детектори чији је основни елемент уска трака од зацрњеног материјала који има довољно велики температурни коефицијент отпора, тако да температурна промена услед апсорбованог зрачења изазива мерљиве промене у отпору [3]. Дата је шема електричног кола болометра на слици 5.6.



Слика 5. 6 Шема електричног кола болометра

[3]

Пироелектрични детектори се састоје од пироелектричног материјала (у виду плочице или филма) са металним електродама на супротним крајевима (Слика 5.7). Када се детектор загрева упадним зрачењем до температура мањих од тзв. Киријеве, мења се поларизација сразмерно температурној промени [3].



Слика 5. 7 Шема пироелектричног детектора

[3]

Фотонски ефекти се могу поделити на фотопроводне, фотонапонске, фотоелектромагнетне и фотоемисивне.

Од разних типова фотоемисионих детектора међу најистакнутијим су појачивачи слике који се састоје из три главна дела: фотокатоде, електростатичког сочива и електролуминесцентног екрана. Упадна светлост која пада на фотокатоду се посредно појачава на излазу, тако што се фотоелектрони који напуштају фотокатоду усмеравају и убрзавају под дејством електричног поља у циљу стварања секундарних електрона и тзв. контролисане електронске лавине која стиже до екрана, где сваки електрон узрокује стварање новог фотона [59].

Други значајан тип детектора базираних на фотонском ефекту су полупроводнички детектори описани детаљније у другом поглављу.

У теорији се разликују три врсте квантних детектора: фотопроводни детектори код којих се електрична проводност мења у зависности од промене интензитета упадног зрачења, фотодиоде које су ИЦ еквивалент за силицијумску фотоћелију и фотокapasитивни детектори који представљају ИЦ еквивалент за једну ћелију на „CCD“ детектору [3].

У почетку развоја производили су се као једноћелијски детектори, касније са технолошким напретком почиње се са производњом матричних детектора (Arrey detectors). Матрични детектор представља композицију у оквиру које се може налазити више милиона елементарних детектора субмикронских димензија. Резолуција стандардне нехлађене термовизије која се примењује у војне сврхе је 640x512 пиксела [60] (може се наћи и 1024x768 пиксела). Осетљивост матричног детектора директно зависи од броја елементарних детектора унутар њега [3].

Инфрацрвени детектори су, упрошћено речено, претварачи топлотног зрачења у мерљив облик. Примљену енергију преводје у слике које приказују енергетске разлике између објеката. Састоје се од полупроводника који су од фотосензитивних материјала и одређене електронске плочице која прима и реагује на ИЦ зрачење. Такође садрже веома мали број машинских елемената који постоје у сврху састављања и учвршћивања круцијалних елемената.

Конкретно, идеја овог истраживања је предлог за израду детектора од вештачких материјала, чије функционисање је базирано на фотофоретском ефекту, док је структура плочице која препознаје зрачење инспирисане наноструктуром лептировог крила.

5.2 МЕМС/НЕМС УРЕЂАЈИ У ПРОИЗВОДЊИ

5.2.1 ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА ЗА ИЗРАДУ МЕМС/НЕМС

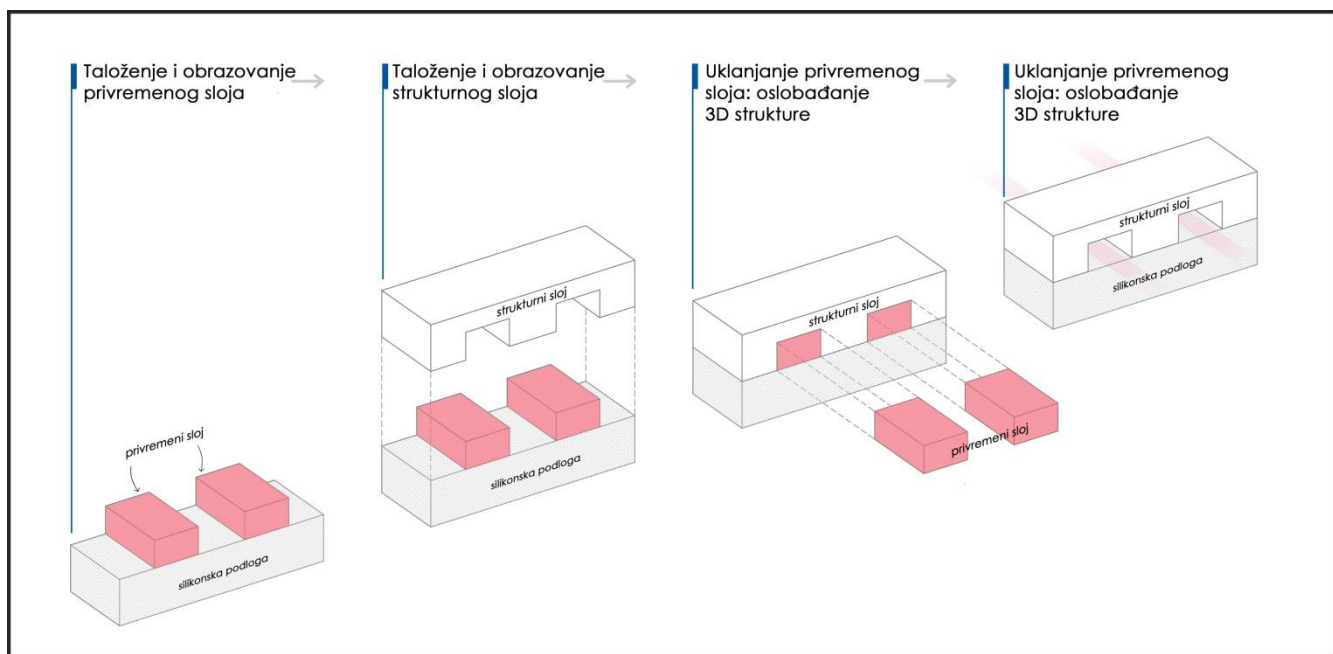
Процес производње увек почиње адекватним избором материјала, па се наставља обрадом до коначне контроле функционалности финалног производа [51].

До сада су различити материјали коришћени за производњу МЕМС/НЕМС, док се стандардни производни поступак данашњице своди на употребу и обраду полимера и силикона [61]. Полимери су јефтинији материјали и за МЕМС/НЕМС се углавном користе проводни полимери. Проводни полимери су органски полимери који проводе електричну енергију и за развој различитих типова биосензора [61] најчешће се користе полианилин (PANI), полипирол (PPy) и политиофен (PT) [62]. Више детаља о коришћеним материјалима за развој МЕМСа је дато у раду [63].

Поред разних техника за производњу микро- и нано-система издвајају се три главне методе: запреминска микрообrada, површинска микрообrada и бризгајуће пресовање.

Запреминска микрообrada укључује поступак делимичног уклањања подручја материјала, од једноставног издубљивања до готово потпуног растварања. Постоји влажна и сува метода ове обраде.

Супротно претходној, површинска микрообrada се користи за израду конструкција на површини силикона, коришћењем литографске методе (Слика 5.8). На слици је описана литографија као уобичајен и једноставан микромашински процес. Описани су кораци у којима се најпре излива привремени слој, преко ког се поставља структурни. Након одређеног временског периода, привремени слој се уклања и ослобађа се тродимензионална микроструктура. Ово се врши надоградњом слојева, а за сложеније структуре се уводи фузијско везивање. Фузијско везивање силиконом се односи на директно везивање плочице на плочицу и користи се за спајање подлога. То значи да се укључује стварање везе силикон-кисеоник-силикон између две плоче са ослобађањем молекула воде. Површине лепљења морају бити изузетно глатке. Силикон се може везати за стакло анодним поступком везивања, коришћењем поља ниских температура.



Слика 5. 8 Принцип литографије

[51]

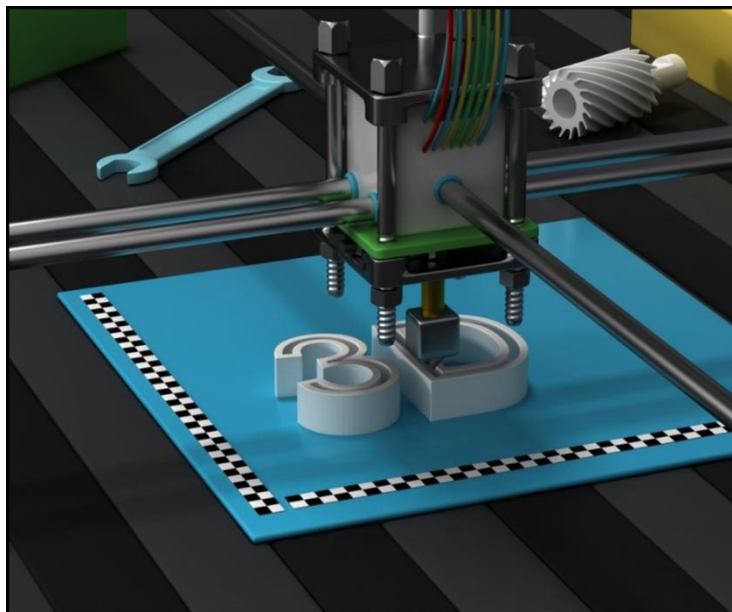
Трећа метода обраде се односи на бризгајуће пресовање или утискивање са циљем реплицирања микроструктура у металу из ливених делова. Најатрактивнија од ових метода је „LIGA“ која се односи на литографију, галванизацију и калупирање.

У раду [64] приказани су различити поступци примене ласерске нанолитографије. Производња силиконских наноструктура је претрпела недостатак одговарајуће производне технологије, па је сваки корак ка развоју нових или унапређењу постојећих технологији од изузетног значаја.

Нова перспектива у адитивном инжењерингу препознаје се у тродимензионалној (3Д) штампи, процесу у ком се материјал ставља под компјутерску контролу у циљу стварања 3Д објекта. Савремени произвођачи се специјализују у 3Д микро и нано штампи [65], и постоје многи примери у роботизи, микроскопији и спектроскопији. У потрази за финијим својствима веће осетљивости све већу примену проналази силикон.

Кључно је проучити сложеност, варијабилност и специфичност природних структура и оптимизовати их микроманипулацијом, како би се добио коначни склоп који би се могао користити за одређена истраживања. Велика примена у бионаукама има битан значај за човечанство.

5.2.2 ТРОДИМЕНЗИОНАЛА ШТАМПА (АДИТИВНИ ИНЖЕЊЕРИНГ)



Слика 5. 9 Тродимензионална штампа

[66]

Тродимензионална штампа (слика 5.9) је производни процес за производњу сложених 3Д делова директно из компјутерских модела, без коришћења додатних алата. Делови настају слојевитим поступком штампе. Према новијим стандардима, технологије 3Д штампања се групишу у седам типова и то су: млазно везивање, истискивање материјала, усмерено таложење енергије, млазно таложење материјала, фузија прашкастих слојева, ламинирање плоча и фотополимеризација. Не постоји одређење које машине или технологије су боље, јер свака за себе има циљану примену [67].

Млазно везивање [67]

У питању је брз, једноставан и релативно јефтин поступак израде у којем се честице праха спајају селективним таложењем течног везивног средства. Млазно хемијско везивно средство се примењује на распршеном праху и тако се формирају слојеви. Примена ове технологије се може користити са различитим материјалима, као што су метали, песак, полимери, хибрид и керамика, док неки од њих не захтевају додатну обраду. Овом технологијом је могуће штампати производе већих димензија.

Истискивање материјала [67]

Ово је технологија која пружа могућност штампања више материјала у више боја и то пластике, хране или живих ћелија. Веома је распрострањена примена захваљујући ниским трошковима. Први пример ове технологије је моделовање топљеним таложењем и ту се углавном користе полимери. Принцип ове технологије се заснива на загревању термопластике до полутечног стања и таложења ултрафиних зрнаца дуж пута истискивања. По потреби, постоји могућност да 3Д штампач привремено депонује уклониви материјал.

Усмерено таложење енергије [67]

Ова технологија је сложенији поступак тродимензионалног штампања и најчешће се користи за поправке или наношење додатног материјала на постојећим компонентама. Предност је веома добар квалитет производа који се постиже због високог степена контроле структуре зрна. Овај поступак је сличан истискивању материјала, са разликом да се млазница

може кретати у више праваца. Материјали погодни за овај тип су керамика и полимери, али углавном се користе метални материјали. Као подврста ове технологије истиче се привлачна технологија у настајању, ласерско таложeње, изузетно прецизна и скалабилна.

Млазно таложeње материјала [67]

Млазно таложeње материјала представља технологију селективног депоновања градивног материјала по принципу кап по кап. Глава штампача испушта капљице фотоосетљивог материјала који се по слојевима учвршћује под дејством УВ зрачења. Овим поступком се добијају производи веома глатких површина и прецизних димензија. Спектар материјала који су примењиви за коришћење ове технологије су полимери, керамика, композити, биолошки и хибридни материјали.

Фузија прашкастих слојева [67]

Ова метода користи електронски зрак, или ласер за топлeње, или спајање прашкастих материјала. Она укључује:

- технику топлeња електронског снопа, која појачава извор енергије да загреје материјал;
- технику селективног синтеровања када се користи термални отисак главе штампача за топлeње термопластичног праха у циљу добијања 3Д објекта;
- технику селективног ласерског синтеровања, која представља технику високе прецизности а користи ласер велике снаге за синтеровање полимерних прахова.

Ламинирање плоча [67]

Ламинирање плоча је поступак 3Д штампе у којем се листови материјала везују у циљу производње дела објекта. Предности ове методе су добијање отисака у пуном колору, релативно ниска цена, једноставност приликом руковања и могућност рециклирања материјала. Ултразвучна адитивна производња је иновативна процесна технологија, која се заснива на спајању слојева коришћењем ултразвучне методе.

Фотополимеризација [67]

Фотополимеризација је често коришћена технологија која ради на принципу интеракције светлости са фотореактивним полимерима. Као резултат интеракције светлости долази до очвршћавања фотореактивних полимера. Представник ових технологија је „Digital Light Processing“ што представља микроелектромеханичку технологију која користи дигитална микроогледала за приказ визуелних информација. „DLP“ је процес сличан стереолитографији која ради са фотополимерима, са главном разликом у извору светлости. „DLP“ користи конвенционалнији извор светлости као што је лучна лампа. Важни параметри ове методе се огледају у времену излагања, снази нападања и таласној дужини упадне светлости. Ова метода је погодна за израду високо квалитетних структура за МЕМС/НЕМС уређаје.

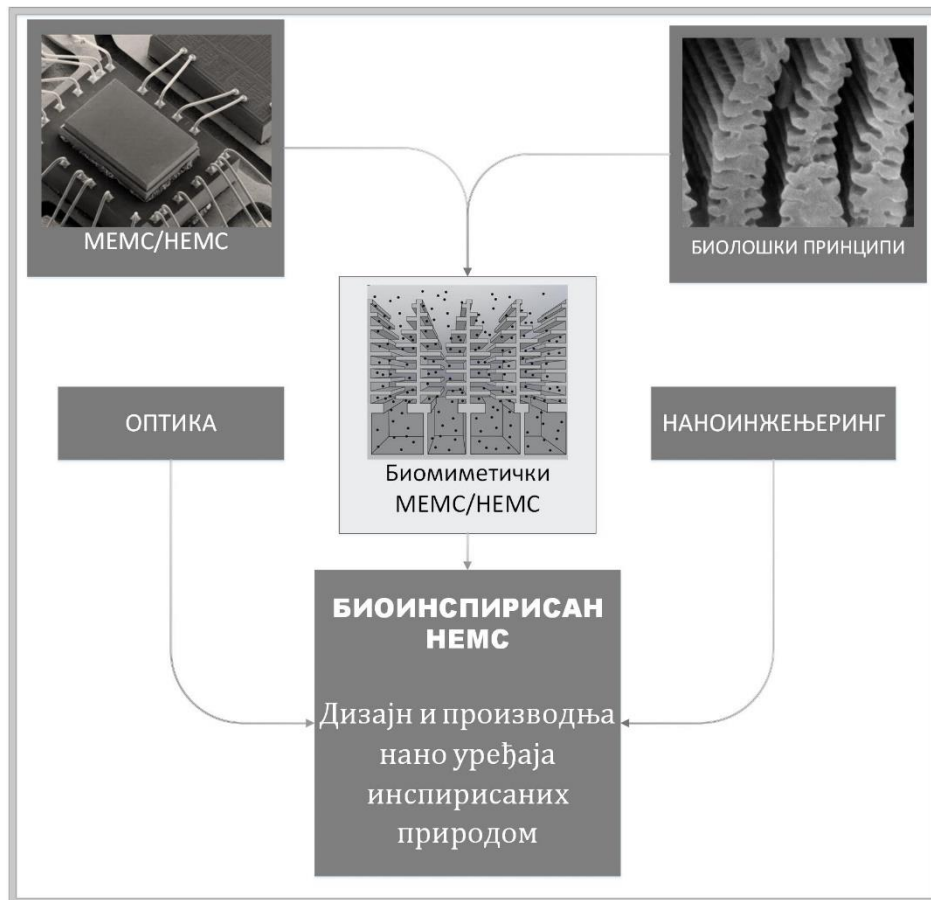
Зависно од изабраног материјала, предвиђених димензија и потребног квалитета финалног производа, избор технологије производње је важна етапа за добијање коначног решења за процес производње.

5.3 БИОИНСПИРИСАНИ НЕМС – ПРЕДНОСТИ ПРОНАЛАСКА ИНСПИРАЦИЈЕ У ПРИРОДИ

У данашње време, на свим пољима, технологије се суочавају са константном потребом минимализовања направа, као императива за смањење потрошње енергије и смањење употребе материјала. Овакву технолошку револуцију у стопу прати наука. Угледајући се на

обрасце природе, наука тражи одржива решења за свакодневне људске изазове. Од виталног је значаја искористити биомиметичке концепте за развој напредних био-инспирисаних уређаја за различите примене. Потенцијали биомиметичких концепата за дизајн будућих наноуређаја посебно су обрађени у раду [51].

Биоинспирисани уређаји су наноуређаји са структуром и функцијама дизајнираним да опонашају примере из света природе. Биомиметика се заснива на опонашању биолошких принципа и образаца као рецепту за креирање нових материјала и структура и њихово интегрисање у функционалне уређаје. Функционалност ових уређаја такође се ослања на комбиновану снагу оптике и наноинжењеринга. Слика 5.10 приказује синергију између наноинжењеринга, оптике и биомиметике, која ствара ново поље биоинспирисаног НЕМС-а [51].



Слика 5.10 Биоинспирисан НЕМС

[51]

О важности ове идеје говоре бројни радови и истраживања на тему производње нано система као и материјала погодних за нано примену. У последње две деценије акценат је стављен управо на биоинспирисана решења, почев од једноставних као када је препозната функција длаке код живих организама и иста опонашана зарад функционалности неких направа [51].

Значајна врста MEMS/HEMCS уређаја је биомедицински MEMS/HEMCS или биоMEMS/биоHEMCS. БиоMEMS/БиоHEMCS се односи на уређаје развијене за биомедицинску и медицинску примену. Потенцијал за примену MEMS/HEMCS у медицини је практично неограничен. Тренутно постоји много НЕМС апликација у биологији и биомедицини, као и у

фармацији, а самим тим биоинспирисани НЕМС може играти кључну улогу у лечењу или превенцији болести [51].

Посебно занимљив приступ и употреба биоструктура су описани јединственим примером управљања топлотним зрачењем биофотонским структурама лептира [68] [69]. Такође, истраживање које су описали Грујић и др. [45], указало је да се интересантан механизам термофорезе/фотофорезе унутар биофотонских структура може искористити за детекцију топлотног зрачења. Овај сложен функционални однос између биолошких образаца и њихових функција је управо искоришћен за истраживање које је предмет ове дисертације. За развој различитих биолошких и биомиметских сензора, значајна је интеракција МЕМС/НЕМС поља са биолошким структурама и њиховим електричним, динамичким и оптичким својствима [51].

У овом поглављу је акценат стављен на оријентацију ка светским технологијама у правцу пројектовања МЕМС/НЕМС и цео преглед је обухваћен у оквиру НАТО пројекта [70] у ком је праћена светска литература и развој ових система.

6. ПРИМЕНА У ВОЈНОЈ ТЕХНИЦИ

Кључни фактори борбене спремности осликавају се у могућности ефикасног извиђања, осматрања и откривања присуства непријатељских снага, лаког нишањења и праћења циљева, добре оријентације кретања и маневра, као и мале вероватноће изненађења [71]. У ноћним и условима смањене видљивости, извођење борбених дејстава је знатно отежано, па се из тих разлога родио интерес за развој техничких средстава који превазилазе ова ограничења. Најзначајнију улогу за те сврхе имају оптоелектронски уређаји који се могу поделити на активне и пасивне.

Активни оптоелектронски уређаји за своје функционисање користе вештачке изворе зрачења, невидљиве за голо око, али препознатљиве адекватним детекторима. Пасивни уређаји користе постојеће изворе светлости из природе, слабо видљиве или невидљиве голим оком (месец, звезде и сл.). Сопствено топлотно зрачење употребљава се код детекције објеката термовизијским уређајима.

Термовизија је новија научно-техничка област, која се бави проучавањем топлотног зрачења које се користи за прикупљање, обраду и приказ информација о објектима односно сцени (сцена је посматрана целина која обухвата објекат и његову околину). Термовизијски системи су комплексни оптоелектронски системи, који као основну сензорску јединицу користе термовизијске уређаје, односно детекторе који трансформишу енергију ИЦ зрачења у електричне сигнале. Систем који даје могућност визуелног приказа расподеле зрачења овог типа, назива се термовизијска камера.

Ратови који су се одигравали у свету у периоду након другог светског рата сведоче о предностима ноћних борбених дејстава и примене уређаја који функционишу ноћу. Пример је Заливски рат који се практично у потпуности одиграо ноћу, захваљујући могућности коришћења термовизије. На нашим просторима у време НАТО бомбардовања, доминирала су ноћна дејства уз употребу термовизијских нишана у спрези са прецизно вођеним ласерским пројектиlima. У овом конкретном случају, рељеф и незгодни временски услови су доста отежавали примену термовизије [72].

У развоју термовизијских система разликују се четири генерације. Нулта генерација је најједноставнија и примењује се код мерних уређаја за бесконтактно мерење температуре, и није од великог значаја за војне примене. Прва генерација ових уређаја има најчешћу војну примену и користи детекторе састављене из више елемената. У другој генерацији се користе матрични детектори, и та генерација има карактеристике прве али уз знатно смањене габарите. Трећа генерација се базира на сложеној технологији која користи фокалне матрице детектора, али још увек се не примењује довољно због релативно високе цене и појединих тешкоћа везаних за развој. Међутим, за војне сврхе веома је погодна, и у уређајима за осматрање и нишањење малог домета представља конкуренцију пасивним справама са појачавачима слике.

На почетку развоја утврђена су три основна концепта термовизијских уређаја, чија је војна примена дата у табели 6.1 [72]:

Табела 6.1 Упоредни приказ основних концепата термовизијских уређаја

КОНЦЕПТ	САД (Common modules – CM)	Велика Британија (Thermal Imaging Common Modules – TICM)	Француска (Systeme modulaire Thermique – SMT)
ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ	<ul style="list-style-type: none"> - Линијски детектори са 60, 120 или 180 детекторских елемената - Паралелно скенирање - ЛЕД екран 	<ul style="list-style-type: none"> - Линијски детектори са 4 или 8 елемената - Редно паралелно скенирање - Минијатурна катодна цев 	<ul style="list-style-type: none"> - Матрица фотодиода - Редно-паралелно скенирање - Минијатурни монитор
ПРИМЕНА	<ul style="list-style-type: none"> - Детектори са 60 елемената: осматрачки/нишански уређаји у системима противоклопних (ПО) ракета домета 2 до 3 km и за оклопна возила или ноћну пилотажу хеликоптера - Детектори са 120 елемената: осматрачки /нишански комплети тенкова или система за вођење ПО ракета наоружаног хеликоптера - Детектори са 180 елемената: ншански системи на авионима или осматрачки /нишански системи на броду намењени за против –авионску (ПА) или противракетну одбрану 	<ul style="list-style-type: none"> - Разликују се три класе по сложености уређаја: <ul style="list-style-type: none"> ТСИМ 1 – „Ручни“ за осматрање /нишањење у системима за вођење ПО ракета домета ТСИМ 2 – „Преносни“ или „превозни“, ншански осматрачки системи вођених ПО ракета великог домета и осматрачки /нишански системи борбених возила (4 елемента) ТСИМ 3 – Жиростабилисане платформе у оквиру осматрачких/нишанских борбених возила, хеликоптера и бродова (8 елемената) 	<ul style="list-style-type: none"> - Примена као код CM и TICM уређаја

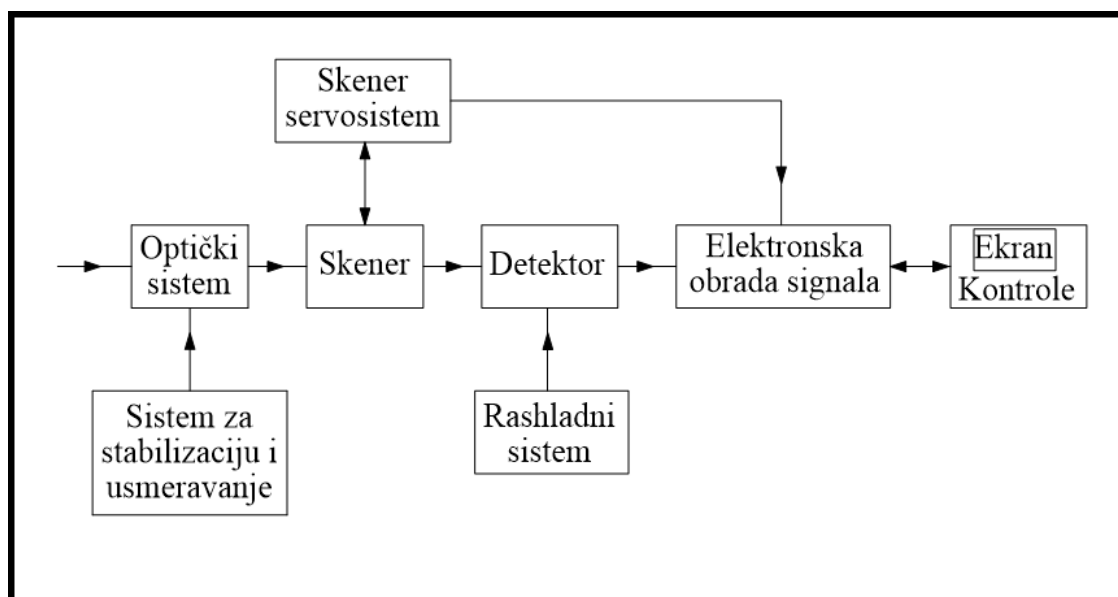
Поред ових, основних концепата, термовизијски системи се развијају и у другим земљама Европе, Азије и Африке, али се не уклапају у систем заједничких модула, него се базирају на сопственим технолошким могућностима. Упркос томе, компаније из других

делова света се све више окрећу сертификавању према америчким и европским стандардима [73] [74].

Термовизија, иако развијена због војних потреба, има широку примену и у цивилне сврхе, а на тај начин су се развој ове технологије и његови трошкови комплетно исплатили.

6.1 СТРУКТУРА ТЕРМОВИЗИЈСКИХ УРЕЂАЈА

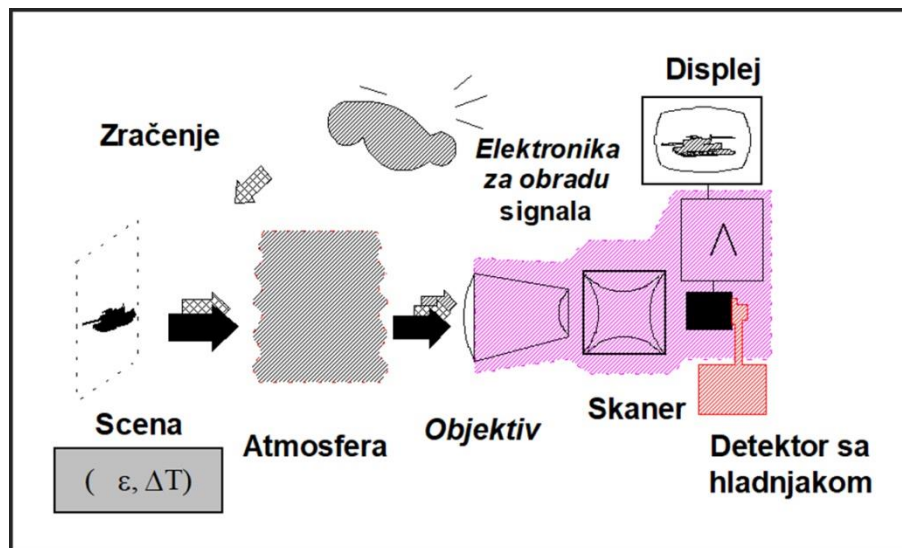
- Термовизијски уређај (слика 6.1) се састоји из наведених основних компоненти [3]:
- Оптички систем
- Скенер
- Детектор
- Расхладни систем
- Блок електронике
- Екран са контролама



Слика 6.1 Блок шема термовизијског уређаја

[3]

Енергија ИЦ зрачења се простире кроз атмосферу и визуелизацијом топлотног контраста, насталог од сопственог зрачења тела и других природних извора, се генерише термовизијска слика која се дефинише као ИЦ сигнатура (отисак) сцене. Сигнатура претставља просторну расподелу радијансе сцене која се може детектовати ИЦ сензором [75]. Дата је блок шема функционисања термовизијских уређаја (слика 6.2), а у наставку и опис свих елемената који учествују у формирању слике [72].



Слика 6. 2 Шема функционисања термовизијског уређаја

[72]

6.1.1 ЗРАЧЕЊЕ

Слика на термовизијском уређају се формира на основу топлотног контраста у равни циља, односно разлике у радијанси елемената сцене (циља и позадине). Топлотни контраст се може изразити преко разлике еквивалентних температура циља (T_C) и позадине (T_p) [76]:

$$\Delta T = T_C - T_p \quad (6.1)$$

Еквивалентна температура одговара температури апсолутно црног тела, површине једнаке површини објекта и радијансе зрачења једнаке радијанси објекта.

Сигнатуре циља и позадине, односно информације о топлотном контрасту, резултат су детаљних и сложених испитивања и неретко се третирају као војна тајна.

6.1.2 ДЕГРАДАЦИЈА СИГНАЛА

Могућности термовизије и домета уређаја поприлично зависе од стања атмосфере и губитака енергије унутар ње [72]. Ове врсте атмосферских утицаја [77] [78] су претежно проучаване везано за ласерске системе, али се комплетни подаци могу применити и за термовизијске уређаје. Средња вредност деградационог утицаја атмосферске модулације се може представити ефективном „MTF“ атмосфером. „MTF“ (Modulation Transfer Function) или модулативна преносна функција представља меру могућности да се расподела контраста која постоји у сцени трансформише у расподелу контраста на слици. Помоћу ове функције оцењује се могућност препознавања и разлагања детаља на слици у присуству шума, што генерално представља проблем који се често среће и ефикасно решава применом оптоелектронских уређаја.

6.1.3 ОПТИЧКИ СИСТЕМ

Оптички систем [72] служи као медијум за усмеравање сакупљене енергије на кључне елементе термовизијског уређаја. Сама конструкција оптике зависи од конкретне намене и користе се релативно скупи материјали описани у наставку. Оптичке особине ових материјала су зависне од опсега радних температура па је за оптимизацију система важно компензовати утицај температуре на положај равни слике објектива. Такође се мора обратити пажња на одговарајућу израду антирефлексних слојева, због рефлексивних губитака који настају услед коришћења материјала са високим индексом преламања. С обзиром на мекоћу одређених оптичких материјала који се користе за израду оптичких елемената у термовизији,

подразумевају се тврди заштитни слојеви. Оптички систем је важна карика у ланцу елемената термовизијског система, и од њега зависи укупан квалитет термовизијске слике. За анализу квалитета оптичких система највише се анализирају следеће важне величине:

- *Апертура* као улазни отвор кроз који зрачење улази у оптички систем
- *Фокус* или жижа за изоштравање слике у циљу добијања најјасније слике прилагођене оку посматрача
- *Лик* или слика коју формира оптички систем сакупљањем електромагнетног зрачења
- *Видно поље*, највећи конус који обухвата простор испред улазне пупиле кроз који се преноси зрачење и формира слика
- *Тренутно видно поље*, видно поље код ког зрачење које се преноси пада на појединачни детекторски елемент. Представља основни показатељ просторне резолуције термовизијског уређаја
- *Нишанска линија* или замишљена линија посматрања
- „*f*“ је број који мери количину енергије оптичког зрачења које се може сакупити оптичким системом и представља се као однос жижне даљине и пречника улазне пупиле

6.1.3.1. Оптички материјали

Оптички материјали [79] који се користе у изради оптичких елемената за термовизијске уређаје су специјални материјали иако се неретко мисли да су у питању обична стакла. За израду тих материјала битно је да се узму у обзир:

1. Термална својства – При апсорпцији ИЦ зрачења, примљена енергија се трансформише у унутрашњу енергију, услед чега расте температура тела. Стога се морају узети у обзир коефицијент термалног ширења и температурни градијент индекса преламања материјала. На пример, германијум има висок градијент индекса што може погоршати оптичке перформансе ако се користи у термички испарљивом окружењу.
2. Трансмисија – ИЦ материјали, који су транспарентни за таласне дужине ИЦ зрачења, обично непрозирни у видљивом спектру, док су материјали транспарентни у видљивом спектру најчешће непрозирни у ИЦ спектру, тачније, они постижу близу 0% трансмисије у тим областима таласних дужина.
3. Индекс преламања – ИЦ материјали варирају у погледу индекса преламања много више него материјали за видљиви спектар.

Обично стакло (кречно) има веома малу транспарентност за ИЦ зрачење, посебно за таласне дужине изнад 1 μ m, и спада у релативно тврђе материјале.

У следећој табели дати су материјали који се користе за примену код ИЦ зрачења:

Табела 6.2 ИЦ материјали

Област зрачења	Материјал
120nm-6 μ m	Магнезијум флуорид (MgF ₂)
150nm-5 μ m	Сафир
180nm-8 μ m	Калцијум флуорид (CaF ₂)
1.2 μ m-6 μ m	Силикон (Si)
2 μ m-16 μ m	Германијум (Ge)
600nm-16 μ m	Цинк селенид (ZnSe), Талијум бромјодид(KRS-T)

Поред наведених материјала за области блиског и краткоталасног ИЦ зрачења користе се и цинк сулфид (ZnS) и дијамант.

Када се обичном стаклу дода германијум, оно постаје прозачно за ИЦ зрачење. Германијум и германијум-диоксид су транспарентни у ИЦ опсегу таласних дужина, па се најчешће користе за детекцију и мерење ИЦ зрачења, а германијум се нарочито користи за предњу оптику у термовизијским камерама које раде у опсегу од 8-14 μ m. Како је за истраживање у овој дисертацији управо овај опсег деловања од највећег интереса, битно је напоменути да се у области термовизије користе специфични материјали новијих генерација: германијум, калцијум-флуорид, кристални силицијум (c-Si), халкогенидно стакло и сл. Тврдоћа и индекс рефракције се код ових материјала разликују од једног до другог.

Табела 6.3 приказује упоредни приказ својстава ИЦ материјала:

Табела 6.3 Упоредни приказ својстава ИЦ материјала

МАТЕРИЈАЛ	СВОЈСТВА И ПРИМЕНА
Калцијум флуорид(CaF ₂)	Ниска апсорпција, висока хомогеност индекса преламања (хомогеност индекса је мера за означавање одступања у индексу преламања у појединачним деловима стакла) Користи се у спектроскопији, код полупроводника и хлађених термалних уређаја
Топљени силикон (FS)	Низак коефицијент термалног ширења и одлична трансмисија у ИЦ области Користи се у интерферометрији, спектроскопији и код ласера
Германијум (Ge)	Висок индекс преламања, одлична трансмисија у вишим опсезима таласних дужина, велика тврдоћа Користи се за термовизију
Магнезијум флуорид (MgF ₂)	Висок коефицијент термалног ширења, низак индекс преламања, добра трансмисија у нижим опсезима Користи се код сочива и поларизатора који не подразумевају анти-рефлексне слојеве
Стакло N-BK7 по Schott-y	Јефтин материјал, применљив само у видљивом и блиском ИЦ опсегу Користи се у микроскопији и индустријским применама
Калијум бромид(KBr)	Добра отпорност на механичке ударе, растворљив у води, велики опсег трансмисије Користи се за ИЦ спектроскопију са Фуријеовом трансформацијом
Сафир	Веома издржљив и са добром трансмисијом у ИЦ области Користи се за ИЦ ласерске системе и спектроскопију
Силикон (Si)	Јефтин и лак материјал Користи се у спектроскопији и ласерским системима средњег ИЦ опсега
Натријум хлорид(NaCl)	Растворљив у води, јефтин, добре трансмисије у ИЦ области, осетљив на механичке ударе Користи се за ИЦ спектроскопију са Фуријеовом трансформацијом

Цинк селенид (ZnSe)	Ниске апсорпције, добра отпорност на механичке ударе Користи се за CO ₂ ласерске системе и термовизију
Цинк сулфид (ZnS)	Одлична трансмисија у свим спектрима, тврђи и хемијски отпорнији од ZnSe Користи се за термовизију

6.1.4 СКЕНЕР

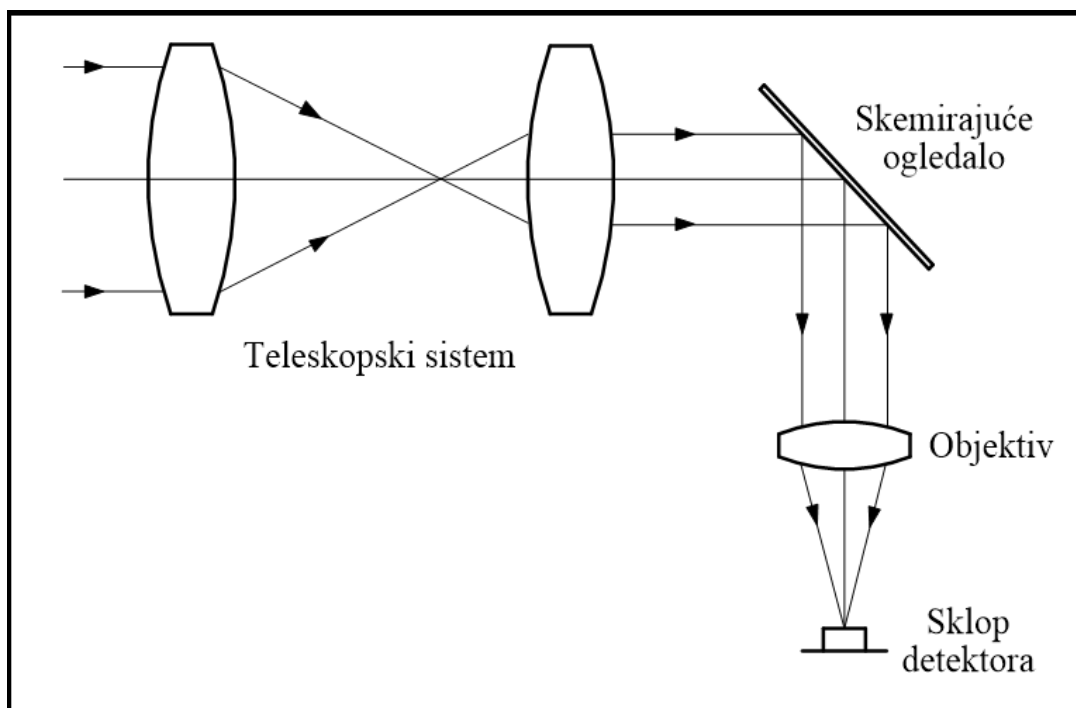
Оптомеханички скенер [72] има улогу да изврши просторну анализу расподеле ИЦ контраста и да пренесе енергију зрачења на детектор из једног дела простора (тренутно видно поље). Састоји се из две компоненте, подскопа за скенирање по вертикали и по хоризонтали. Конструкција овог склопа се у највећем броју случајева заснива на обртним рефлексионим или рефракционим елементима.

Када се говори о квалитету скенера, следећи појмови се разматрају као најзначајнији:

- *Учестаност слика (frame rate)*, која представља број слика у јединици времена. Трајање скенирања једне слике се односи на време које протекне од момента скенирања прве тачке у видном пољу до следећег проласка кроз ту тачку.
- *Ефикасност скенера*, која представља однос времена активног формирања сигнала и времена скенирања у току једног циклуса скенирања. Укупна ефикасност скенирања се односи на производ ефикасности по хоризонтали и вертикали.
- *Пиксел (pixel)*, који је основни елемент слике и односи се на најмањи ограничени простор у равни слике у коме се формира фотоелектрични сигнал. Углавном се узима у обзир као активна површина једног детекторског елемента и његове угаоне димензије се изједначавају са тренутним видним пољем које дефинише минималну резолуцију ћелије на циљу.
- *Формат слике*, чије се димензије дефинишу бројем елемената слике дуж хоризонталне и вертикалне осе слике
- *Време прелета детектора (dwell time)*, које се односи на време утрошено на формирање једног пиксела и највише зависи од структуре детектора
- *Брзина скенирања*, дефинисана као однос угаоне димензије пиксела и времена прелета детектора
- *Уметање (interlace)*, техника скенирања слагањем узастопних циклуса скенирања који су просторно померени у циљу добијања појединачне слике, фрејма. Користи се за добијање боље хомогености слике.

За војну примену често се користе скенери са ротирајућим огледалским површинама (фацетама). За детаље конструкције и захтеве квалитета скенера дефинишу се параметри који се односе на функцију, квалитет и стабилност фацета.

Зависно од типа оптичког система и начина спреге са скенером постоји скенирање у простору предмета и скенирање у простору лика (слика 6.3) које се у пракси показало као ефикасније.



Слика 6.3 Шема термовизијског уређаја са скенирањем у простору лика

[3]

6.1.5 ДЕТЕКТОР

Као што се може закључити из досадашњег излагања, детектор представља есенцијални елемент сваког термовизијског уређаја [72]. За војне термовизијске уређаје и подразумеване спектралне опсеге, детектори најчешће бивају хлађени, односно садрже расхладни систем.

За конструкцију детектора за војну примену, од значаја је поменути следеће параметре:

- *Сигнал детектора*, напонски код фотоотпорника или струјни код фотодиода, који зависи од напона напајања, учестаности сигнала, таласне дужине, ирадијансе на површини и активне површине детектора.

- *Одзивност*, однос величине сигнала и упадног флукса зрачења. У односу на начин приказа упадног флукса разликују се спектрална одзивност и одзивност на зрачење црног тела, док се у односу на приказ сигнала дефинишу напонска и струјна одзивност.

- *Шум* као средња вредност квадрата вредности напона свих извора шума. Дефинише се и однос сигнал-шум, као и снага еквивалентна шуму (Noise Equivalent Power) у односу на начин изражавања упадног флукса.

- *Детективност*, вредност реципрочна вредности снаге еквивалентне шуму и води се као мера квалитета детектора. Представља основни елемент анализе и прорачуна карактеристика термовизијских уређаја.

- *Снага еквивалентна шуму*, флукс упадног зрачења потребан да се произведе сигнал једнак укупном шуму детектора, однос сигнал/шум [3]

6.1.6 СИСТЕМ ЗА ХЛАЂЕЊЕ

У употреби су различити системи за хлађење и то [80]: микрохладњаци који користе чист гас високог притиска, расхладне машине са затвореним циклусом, директни контакт и термоелектрични хладњаци. Анализа и поређење наведених система говори о претежно доброј

поузданости, различитим габаритима и тежинама, животном веку као и другачијим комплексностима система. У новије време и са развојем нових технологија, нови приступ расхладним системима се подразумева.

6.1.7 ЕЛЕКТРОНСКА ОБРАДА СИГНАЛА

У комбинацији са функцијом оптомеханичког скенера, електронском обрадом формира се видео сигнал и то у две етапе, најпре са циљем да се добије облик погодан за визуелни приказ а затим са формирањем за добијање побољшаног квалитета и могућности за употребу [72].

6.1.8 ЕКРАН

За коначан визуелни приказ обрађеног сигнала најчешће се користе LED екрани, LED са позадинским осветљењем или чак OLED (organic LED) који су постали прилично приступачни последњих година.

Како би се добио одговарајућ квалитет слике, употребљава се комплексна електроника за конверзију формата скенирања, а начин приказа зависи од пројектних захтева и предвиђене цене пројектованог уређаја.

6.2 РЕЗОЛУЦИЈА ТЕРМОВИЗИЈСКИХ СИСТЕМА

Када се дефинишу оперативни захтеви за термовизијски уређај, основни задатак је одређивање домета за задовољење одговарајуће визуелне перцепције циља. Овако одређен критеријум, у комбинацији са захтеваним видним пољима, резултује захтевом за тренутно видно поље, тачније граничну резолуцију уређаја [72].

6.2.1 ПРОСТОРНА РЕЗОЛУЦИЈА

Просторна резолуција се односи на разлучивање детаља у слици и квантификује се преко могућности разлучивања дефинисаних периодичних структура у слици. У те сврхе, уведена су три основна нивоа перцепције:

- Детекција – могућност утврђивања присуства неког објекта у сцени, уз евентуално одређивање оријентације
- Препознавање – могућност препознавања типа објекта у сцени, по облику или детаљима (човек, тенк, авион)
- Идентификација – могућност одређивања тачне врсте у оквиру типа објекта (врста хеликоптера, авиона, тенка).

Постоји неколико метода које се користе за одређивање домета детекције, препознавања и идентификације неког уређаја. Најстарији и најчешће коришћен метод је Џонсонов критеријум (Johnson criteria). Овај критеријум је у употреби још од 1958. године и базира се на мерењу могућности детекције/препознавања/идентификације на основу претпостављене резолуције. Тачније, у оквиру ове методе, одређен је број периодичних линијских парова на критичној димензији циља, који обезбеђује везу са нивоом визуелне перцепције. Као најкомплетнија и најпоузданија верзија, последњих година, користи се најновији „ТТР“ модел (Targeting Task Performance model) [81]. Вредности за номиналне статичке домете код термовизијских система за све наведене нивое перцепције дефинисани су у оквиру НАТО стандарда [82].

Основна функција која се употребљава да се изрази просторна резолуција је модулативна преносна функција (Modulation Transfer Function), која осликава трансформацију расподеле контраста у сцени у расподелу контраста у слици. Укупна преносна функција уређаја, MTF, се изражава као производ преносних функција подклопова:

$$MTF = H_o^D(f^*) \cdot H_o^G(f^*) \cdot H_{det}^P(f^*) \cdot H_{det}^t(f^*) \cdot H_{el}(f^*) \cdot H_{dis}(f^*) \cdot H_{oko}(f^*) \quad (6.2)$$

$H_o^D(f^*)$ – дифракциона преносна функција објектива

$H_o^G(f^*)$ – модулациона преносна функција објектива

$H_{det}^P(f^*)$ – преносна функција детектора као просторног филтера у процесу скенирања

$H_{det}^t(f^*)$ – преносна функција детектора као временског филтера због коначне вредности временске константе одзива

$H_{el}(f^*)$ – преносна функција електронике

$H_{dis}(f^*)$ – преносна функција дисплеја

$H_{oko}(f^*)$ – преносна карактеристика ока посматрача

$H_{vib}(f^*)$ - за случај да је уређај монтиран на возилу које производи вибрације мора се узети у обзир и преносна функција вибрација

6.2.2 ТЕМПЕРАТУРНА РЕЗОЛУЦИЈА ТЕРМОВИЗИЈСКИХ УРЕЂАЈА

Температурна резолуција термовизијских уређаја дефинише се различитим параметрима који карактеришу зависност температурне разлике од конструкционих карактеристика уређаја:

- Noise Equivalent Temperature Difference – температурна разлика еквивалентна шуму [83]

NETD представља температурну разлику на објекту или разлику у температури објекта и позадине на тест слици, потребну да амплитуда сигнала детектора буде једнака средњој квадратној вредности шума.

$$NETD = \frac{\pi \sqrt{A_d \Delta f_n}}{\omega \cdot A_0 \cdot \int_0^\infty \frac{\partial M_{e\lambda}}{\partial T} \cdot D_\lambda^*(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6.3)$$

A_d – површина детекторског елемента

Δf_n – пропусни опсег за шум

ω – просторни угао тренутног видног поља

A_0 – површина објектива

$M_{e\lambda}$ – спектрална екситанса фотона

T – просторна расподела температуре

$D_\lambda^*(\lambda)$ – специфична детективност

$\tau_0(\lambda)$ – трансмисија оптичког система

$\tau_a(\lambda)$ – трансмисија атмосфере

- Minimum Resolvable Temperature (MRT/MRTD) –

Минимална разлика у температури између топлих и хладних поља на тест слици са четири линијска пара, на којој посматрач може да разлаже образац. Вредност MRTD је у функцији просторне фреквенције обрасца и зависи од оријентације тест слике [84] и израчунава се из израза:

$$MRT(f^*) = (S/N)_{min}^{PREP} \cdot \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \cdot \frac{NETD}{MTF_s(f^*)} \cdot \left(\frac{\alpha_v \cdot v_{sc} \cdot Q(f^*)}{(\Delta f_n) \cdot F_R \cdot t_{IO} \cdot \eta_{preklap}} \right)^{1/2} \quad (6.4)$$

$(S/N)_{min}$ – однос сигнал-шум

$MTF_s(f^*)$ - модуларна преносна функција за задату просторну учестаност

t_{IO} – време интеграције ока

α_v – димензије тренутног видног поља по вертикали

v_{sc} – брзина скенирања

F_R – Учестаност слика

$Q(f^*)$ - утицај преносних функција

$\eta_{preklap}$ – фактор преклапања линија

- Minimum Detectable Temperature – минимална температура која се може детектовати

MDT представља разлику између тест циља и униформне позадине:

$$MDT(f^*) = (S/N)_{min}^{Det} \cdot \frac{NETD}{A_C \cdot Q_A} \cdot \left(\frac{\alpha_v \cdot v_{sc}}{(\Delta f_n) \cdot F_R \cdot t_{IO} \cdot \eta_{preklap}} \right)^{1/2} \cdot (Q_{Wx} \cdot Q_{Wy})^{1/2} \quad (6.5)$$

Q_A, Q_{Wx}, Q_{Wy} – конволуциони интеграл преноса сигнала

A_C – угаона димензија површине тест циља

6.3 КАРАКТЕРИСТИКЕ ТЕРМОВИЗИЈСКИХ УРЕЂАЈА

Када се ради о војним системима, информације нису увек доступне или могу бити непотпуне. Говорећи о основним карактеристикама, дефинишу се намена, конфигурација, маса и габарити система [72].

Функционалне карактеристике представљају важне параметре за могућности употребе система и односе се на: домете за детекцију и препознавање циља, аутономности електричног напајања и расхладног система, времена потребна за експлоатацију уређаја, преласка на радни режим, промену видног поља, замену резервоара флуида за хлађење, замену извора напајања, индикаторе исправности, команде за управљање и подешавање, конекторе и посебне додатке, погодност за руковање и безбедност при употреби.

За процену погодности употребе уређаја, као и за контролу квалитета израде која се врши у лабораторијским условима, дефинишу се мерљиви параметри који се могу поделити на оптичке, оптоелектронске, електронске и електричне карактеристике термовизијских уређаја.

Што се тиче електронских карактеристика, дефинише се пропусни опсег за шум и пропусни опсег електронског система. У оквиру електричних карактеристика се проналазе вредности за номинални напон напајања са толеранцијама, максимално дозвољена потрошња електричне енергије и отпорност изолације каблова и конектора. У наставку ће детаљније бити дефинисане оптичке и оптоелектронске карактеристике.

6.3.1 ОПТИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Оптичке карактеристике система се могу дефинисати кроз оптичке карактеристике његових подсистема: кроз оптичке системе објектива, дисплеја и окулара, као и оптомеханичког склопа – скенера.

Оптички подсистеми дефинишу спектрално подручје рада, односно спектрални опсег осетљивости детектора или целог термовизијског система. Управо у оквиру спектралног опсега налазе се и захтеви за квалитет антирефлексних слојева. Важно је дефинисати базичне параметре као што су увећање, угао видног поља и тренутно видно поље и минимална даљина фокусирања (минимална удаљеност од циља код које се фокусирањем може добити оштра слика). У погледу трансмитивности оптичког система узимају се у обзир карактеристике окулар дисплеја. За уређаје са два или више видних поља сагледава се подешеност видних поља у смислу концентричности и паралелности.

Карактеристике скенера обухватају познавање ефикасности скенирања, податке о учестаности слика и поља, као и факторе уметања поља и преклапања линија који се односе на број генерисаних поља и преклопљених линија услед формирања слике.

6.3.2 ОПТОЕЛЕКТРОНСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

Оптоелектронске карактеристике дефинишу квалитет трансформације ИЦ зрачења у видљиву слику, па из тих разлога представљају кључне параметре термовизијских уређаја. Добро дефинисане карактеристике омогућавају једноставну лабораторијску контролу.

Прва група карактеристика односи се на просторну и температурну резолуцију које су претходно дефинисане: MTF, NETD, MRT, MDT. Ови параметри се, као и сви оптички могу испитивати класично лабораторијски, али се све чешће користе ефикасни, комплексни системи за компјутерско одређивање.

Друга група обухвата параметре трансформације оптичког сигнала. Преносна функција сигнала (Signal Transfer Function - SiTF) је однос луминанције дисплеја и радијансе ИЦ тест извора [85]. SiTF се може представити преко појединачних параметара изведених из ове функције и лаких за мерење:

- Улазни динамички опсег, као опсег температура циља са познатом температуром позадине, за који се добија јасна слика
- Динамички опсег луминанције дисплеја, који дефинише могућност регулације сјаја уз задати контраст и температуру тест слике
- Динамички опсег регулације контраста, која се врши при задатом сјају екрана и температури тест слике

Трећа група дефинише карактеристике дисплеја кроз број нивоа сиве боје која се мора разликовати на дисплеју и опсег дозвољене луминанције дисплеја.

Четврта група се бави квалитетом слике и узима у обзир униформност система. Дефинишу се особине слике као што су дисторзија (ниво геометријског кривљења слике при ивицама), униформност (дозвољени ниво нехомогености луминанције) и оријентација (толеранције за дозвољено одступање оријентације слике). Такође се даје мера брзине реакције система на јаке ИЦ сигнале на улазу и одређују се толеранције за појаву репа на дисплеју.

Поред груписаних карактеристика потребно је дефинисати облик и толеранције кончанице, толеранције положаја у слици и димензије. Алфа нумеричке поруке су још један параметар који мора бити прописан положајем, бојом и садржајем.

Укратко, постоји велики број различитих фактора који утичу на процес формирања слике и квалитета слике термалног уређаја.

Табела 6.4 Фактори утицаја на процес формирања слике термовизијског уређаја [75]

ПОСМАТРАЧ	ЕКРАН	ТЕРМАЛНИ УРЕЂАЈ	ПЛАТФОРМА	АТМОСФЕРА	ЦИЉ
-Тренинг	- Величина	-Тип	-Угао	- Видљивост	- Тип
-Мотивација	- Боја	-Угао видног	посматрања	- Облачност	- Величина
-Искусство	- Резолуција	поља	-Вибрације	-Положај сунца	- Облик
-Период осматрања	-Брзина одговора	-Спектрални опсег	окоLINE	- Домет	- Камуфлажа
-Припрема	-Амбијентално осветљење	-Резолуција	-Брзина	- Апсорпција	- Рефлективност
-Стрес	- Удаљеност	-Динамички опсег	-Време изложености	- Влажност	-Температура
-Оптерећеност задацима		-Осетљивост	циља	- Турбуленције	окоLINE
-Умор		-Мод	- Посада		- Контраст
-Старост		функционисања	-Могућност контролисања		- Кретање
-Интелигенција		-Шум			
-Вид		-Дифракција			

6.4 ТЕРМОВИЗИЈСКИ УРЕЂАЈИ У ВОЈНИМ СИСТЕМИМА

Имајући у виду потребе војних система за деловање у ноћним условима отежане видљивости, значајно је постојање термовизијских уређаја који успешно испуњавају тешке захтеве. Кључна примена у војним системима односи се на детекцију непријатеља у условима слабе видљивости.

6.4.1 ПРИМЕНА ТЕРМОВИЗИЈЕ У КОПНЕНИМ ВОЈСКАМА (НАТО ПАКТ И ВОЈСКА СРБИЈЕ)

Примена термовизије у системима управљања ватром код борбених возила као што је тенк, је од великог значаја, и налази се у улози осматрачко-нишанског сензора [72]. Предвиђа се неопходна модернизација свих борбених возила термовизијским системима [86].

Код примене у нишанско-осматрачким системима вођених противоклопних ракета, у употреби су уређаји са уским и широким видним пољем. Типични домети за ове системе су, за детекцију приближно четири километра, а за препознавање три километра. Ови домети су дефинисани техничким критеријумом за коришћење код земљаних и благо уздигнутих циљева у НАТО стандарду [82].

У пешадијском наоружању примена је до скоро била ограничена због цене и габарита термовизијског осматрачког система (слика 6.4), док су савремени уређаји, својом величином, у потпуности прилагођени могућностима војника пешадије а цена је доведена до релативно прихватљиве у односу на остатак наоружања. Компанија „Телеоптик-Жироскопи“ производи уређаје изузетних перформанси, мале масе и димензија (Слика 6.5).



Слика 6. 4 Термовизијски уређај за пешадијско наоружање са краја 20. века

[72]



Слика 6. 5 Термовизијски нишан NT-75

[87]

6.4.2 ПРИМЕНА ТЕРМОВИЗИЈЕ У РАТНОМ ВАЗДУХОПЛОВСТВУ (РВ) И ПРОТИВВАЗДУШНОЈ ОДБРАНИ (ПВО)

Примена у ратном ваздухопловству се најчешће односи на системе за ноћну пилотажу и осматрачко-нишанске комплете у авијацији и код хеликоптера. У авијацији ове уређаје користе системи који подржавају коришћење вођених авиобомби и ракета ваздух-земља, док наоружани хеликоптери користе системе за вођење противоклопних ракета. Домети за детекцију и препознавање циљева су у распону од приближно пет километара за хеликоптере до неколико десетина километара за авионе [72]. У оквиру пројектовања савремених система веома се често имплементирају термовизијски уређаји за асистенцију приликом слетања [88].

Говорећи о модерним технологијама у авијацији, интересно је осврнути се на авионе пете генерације. Иако није финално дефинисана, пета генерација авиона се користи у контексту модерних војних операција. Карактеристике које одвајају авионе претходних генерација од најсавременије генерације се односе на постизање следећих перформанси [89]:

- Мултиспектралне, слабо уочљиве карактеристике дизајна (Low Observable „LO“), као што су радар, ИЦ сензори и визуелни алати за препознавање ситуације. LO се односи на појам тзв., невидљивих летелица, код којих је умањена рефлектована енергија радара, те самим тим, смањена „видљивост“ истих [90]. Ово се постиже уклањањем спољних сензорских и других јединица, посебном конструкцијом тела летелице, као и материјалима од којих је иста израђена или којима је прекривена [91].
- Самозаштита и ометање могућности радара

Имајући у виду могућност да непријатељске снаге делују авионима пете генерације, тзв. невидљивим авионима, управо се ова карактеристика „невидљивости“ може избећи имплементацијом одговарајућих термовизијских уређаја на своје платформе. **Како се радарска детекција путем електромагнетних таласа рефлектованих од летелице може избећи специјалним дизајном који се примењује код најновије генерације летелица, од велике су користи могућности препознавања термалног отиска коришћењем термовизије.**

Правац развоја пете генерације летелица је инспирисан идејом максимизирања параметара за потребе напада и могућности преживљавања у случају одбране. За постизање ефикасне интеграције, уклапа се функционисање више сензорских система за спајање података и умрежено, дигитално презентовање истих пилоту у стварном времену. На овај начин, пилот има тачну оперативну слику у моменту дејства, као и могућност преузимања података за анализу након мисије [89]. За овако савршене системе, сувишно је истицати неопходност стандардизације у правцу употребе термовизије. Тенденција ка савременијим авио-системима осетна је широм света. Поред познатог „F-22 Raptor“ авиона за ваздух-ваздух дејство, значајан пример западне летелице пете генерације је авион „F-35 Joint Strike Fighter“. F-35 између осталог користи и електро-оптички систем који се упарује са кацигом и омогућава пилоту панорамско осматрање ситуације [91]. Што се тиче других делова света, источни представници авиона пете генерације су кинески „J-20“ са НАТО ознаком „Black Eagle“ [92] и руски „Sukhoi PAK-FA“ [93].

За системе будућности и следећих генерација, је такође веома корисно и предвиђа се неопходно коришћење термовизијских уређаја. Немачко министарство одбране одобрило је буџет за нови војни хеликоптер „NH90 Sea Tiger“ који производе компаније „Airbus“ коорпорације [94]. Идеално решење за овакав систем је имплементација термовизијске осматрачке платформе [95]. Још један добар пример за увођење савремених термовизијских система је борбени ваздухопловни систем будућности „FCAS“ који развијају Француска, Немачка и Шпанија. Овај систем укључује пројектовање футуристичке сензорске архитектуре и сазревање повезаних сензорских технологија [96]. Озбиљан напредак у авио-технологијама захтева да се испрате промене и у другим технолошким правцима. Како се термовизија суочава са великим напретком, њена имплементација на овом пољу је подразумевана.

У оквиру ПВО, термовизија се користи у системима вођених ракета са потребним великим дометима за детекцију циља (слика 6.6) и термовизијски уређаји имају улогу додатних сензора. Термовизија се такође примењује у осматрачко-нишанским уређајима (слика 6.7) унутар система самонавођених ракета, или у системима управљања ватром као нишански сензор. Код ових система, ПВО топова, домет за детекцију је десатак километара.



Слика 6. 6 Видљиви (плава фотографија) и термовизијски (црне слике) изглед ваздушног циља

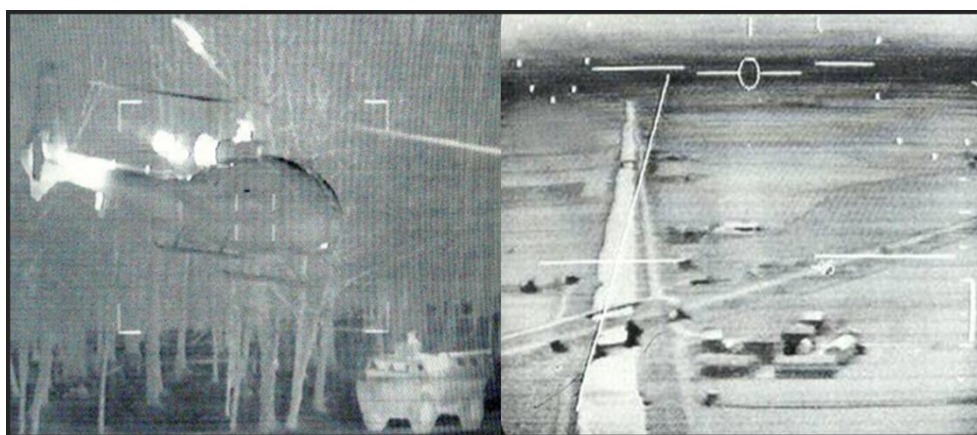
[72]



Слика 6. 7 Мултисензорска платформа за осматрање ваздушног простора у Војсци Србије

[72]

Слика 6.8 је практичан пример на ком је приказан топлотни одзив објекта, који не би могао да се идентификује у лошим условима без примене термалне камере.

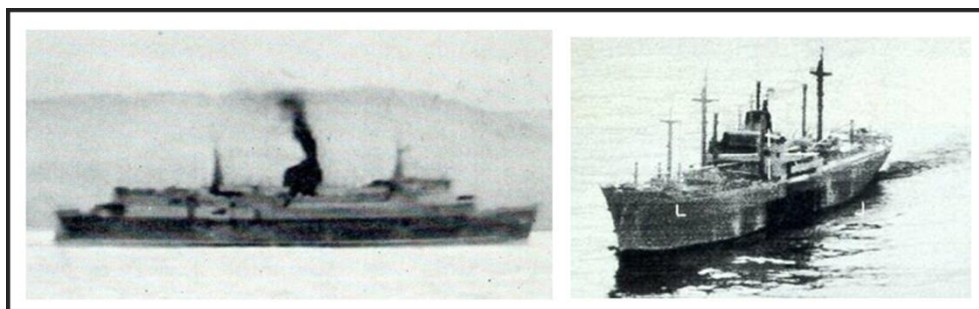


Слика 6. 8 Термовизијске слике генерисане из ваздухопловног термовизијског уређаја

[72]

6.4.3 РАТНА МОРНАРИЦА

Као и у другим видовима оружаних снага, у ратној морнарици је најзначајнија употреба термовизије у системима ПВО и противракетне заштите пловила, као и у оквиру система за управљање ватром обалских топова (слика 6.9). Домети за детекцију циља су по неколико десетина километара [72].



Слика 6. 9 Термовизијска слика (лево) и класична фотографија (десно) поморских циљева [72]

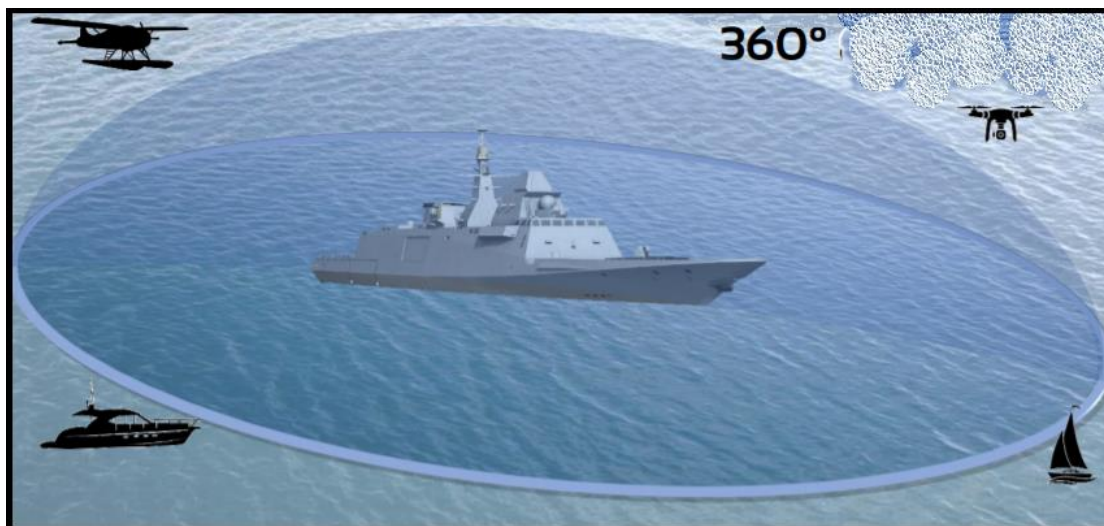
Значајне светске морнарице имплементирају савремене платформе различитих параметара, зависно од потребе и услова коришћења. Као пример произвођача морнаричких, електро-оптичких ИЦ система за цивилну и војну примену може се поменути канадска компанија „Current Scientific Corporation“. На слици 6.10 приказано је више различитих модела осматрачких уређаја, различитих углова видног поља, са нехлађеним термалним детекторима.



Слика 6. 10 Различити модели бродских осматрачких платформи са нехлађеним термалним детекторима

[97]

У складу са развојем технолошких могућности и актуелним потребама, ова канадска компанија развија веома атрактиван уређај за панорамско надгледање, са хлађеним детектором (слика 6.11).



Слика 6. 11 Шема панорамског осматрања уређаја са хлађеним детектором NN8485-360

[97]

Оно што би могао бити занимљив изазов на пољу термалних камера је усавршавање у правцу подводног коришћења. Како је развој подморница у складу са напредовањем у другим технолошким областима [98], интеграција са савременим осматрачким системима термовизије чини заокружен војни систем.

Да би се термални уређај сматрао квалитетним потребно је да има могућност разоткривања циља на одговарајућем нивоу, тачније, уређај мора имати такву резолуцију и осетљивост да остварује следеће перформансе [75]:

- Детекција специфичних (подразумеваних) домета
- Разликовање циља од околних објеката на сцени (камења, дрвећа и сл.)
- Разликовање циља од околних ометајућих температурних присуства (животиње)
- Постизање доброг контраста и разликовања детаља на великим дometима
- Разликовање детаља везаних за циљ
- Разликовање понашања циља
- Разликовање пријатеља од непријатеља

Карактеристике и квалитет термовизијске слике обезбеђују адекватну примену термовизијских уређаја у комбинацији са другим оптоелектронским сензорима, што је један од важнијих критеријума за војну употребу. Параметри уређаја се конкретно дефинишу и на тај начин се успостављају услови за евалуацију употребљивости и функционалности истих, са циљем ефикасног дефинисања тактичко техничких захтева (ТТЗ). Процењени критеријуми и предвиђени поступци се морају поштовати приликом дефинисања ТТЗ.

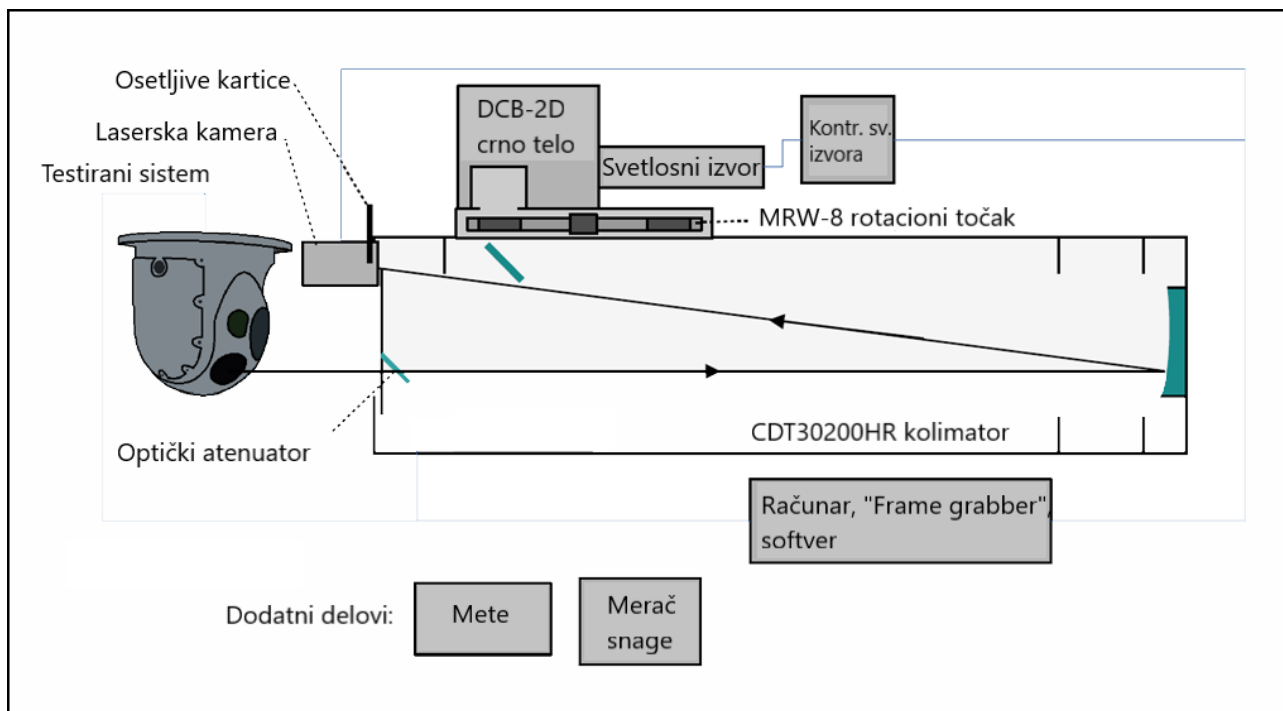
6.4.4 ТЕЛЕОПТИК-ЖИРОСКОПИ

Кандидат Марина Симовић-Павловић је запослена у компанији Телеоптик-Жироскопи [87] на радном месту под називом: водећи конструктор машинства. У оквиру редовних послова које обавља, укључена је у рад оптичке лабораторије акредитоване за мерење оптичких параметара код Акредитационог тела Србије. Развој савремених система и изазови производње деликатних производа као што су термовизијски уређаји, може се навести као главна мотивација кандидата да отпочне истраживање на тему која је предмет дисертације.

Компанија „Телеоптик-Жироскопи“, иако по својој делатности представља фабрику електро-опто- механике у оквиру наменске индустрије, не посустаје у смислу освајања нових технологија и научног развоја и даје подршку инжењерима да напредују у том правцу. У

складу са могућностима, опрема се модернизује и даје се предност новим решењима за унапређење тактичко-техничких карактеристика и квалитета производне линије. Један од примера је иновација у погледу површинске заштите у виду примене нанотехнологије, односно машина за поступак наношења нано заштите на широком спектру материјала.

Говорећи о модернизацији фабрике и ангажману кандидата, и напомињући да су нишанске справе један од најважнијих производа ове компаније, истиче се моменат набавке и примене MS-300 система за испитивање електро-оптичких мултисензорских надзорних (осматрачких) система који се користе за осматрање великих домета, ваздушних, поморских и копнених циљева, са оптичким апертурама до 300mm. Између осталог, на овом систему су тестирани термовизијски нишански уређаји NT-60 и NT-75 (Слика 6.12).



Слика 6.12 Блок дијаграм система за тестирање „MS300“

[87]

У оквиру овог система се могу мерити до сада познати параметри: MRTD, MTF, SiTF, NETD, резолуција, ТВ и геометријска дисторзија, угао видног поља и фокус. Поред наведених, могу се тестирати и друге, не тако често коришћене, карактеристике уређаја као што су:

- MDTD – минимална температура разлагања коју око може да детектује
- TOD – минимална температура разлагања на којој се може одредити оријентација троугласте мете
- MRC – минимални разлажући контраст
- FPN – фиксни образац шума
- NEI – осветљење еквивалентно шуму

Такође се могу вршити „Boresight“ мерења. У питању је метода визуелног равнања осовине цилиндра цеви оружја у сврху лакшег поготка циља.

Велике могућности оваквог система, значајна су предност једне компаније на нашим просторима. Након оптимизованих и тестираних уређаја, пројектованих и произведених у фабрици „Телеоптик-Жироскопи“, производ постаје конкурентан иностраним технологијама.

Примена термовизијских уређаја у различитим сферама, посебно у војне сврхе од великог је значаја за конкретизацију истраживања у оквиру ове дисертације. У војном смислу, предности термовизије имају две главне улоге. Прва се односи на повећање безбедности војске која користи поменуте системе, док друга обухвата јачање ефикасности и борбене спремности. Дакле, термовизија представља перфектан пример примене ИЦ детектора и у пракси је од изузетне вредности.

Поглавље које се бави војном применом се уско односи на примену потенцијалног система – радиометарског детектора у термовизији, као и генералну примену термовизијских уређаја у свету. **Ова теза би могла да представља тачку покретања стандардизације употребе термовизијских система базирану на искуствима великих светских војски. У том смислу, могућност имплементације нових сазнања проистеклих из овог истраживања у термовизијским системима за војну намену представља кључни практични допринос истраживања кандидата.** На крају је дат осврт на примену знања кандидата у компанији „Телеоптик-Жироскопи“, који представља везу са искуством стеченим на истраживању у оквиру пројеката на Институту за физику у Београду.

7. ИНЖЕЊЕРСКА ПРИМЕНА

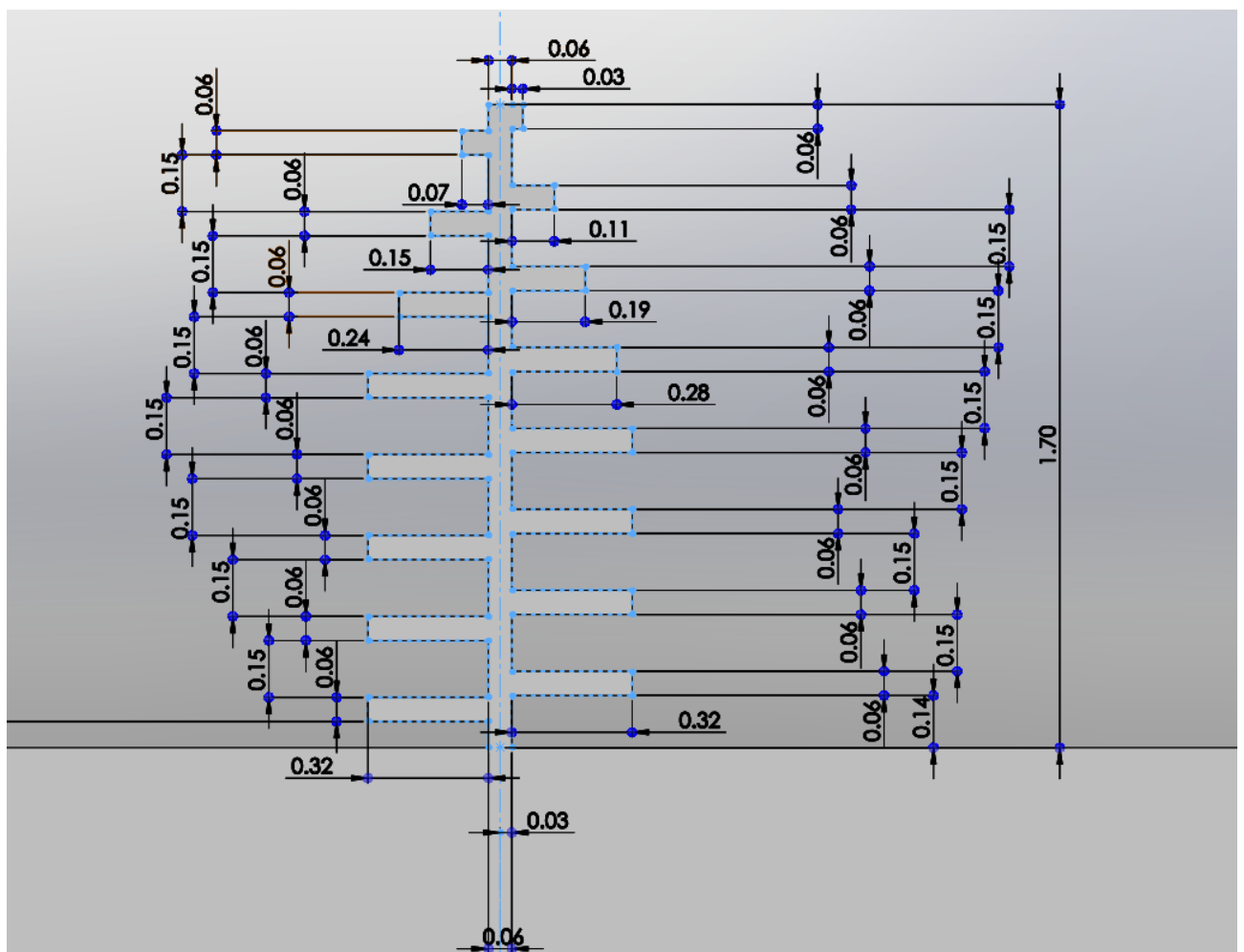
Преферирани правци експлоатације научних сазнања из четвртог поглавља се могу представити у следећих 6 главних примера конкретне инжењерске примене:

1. Праћење и надгледање простора (бојног поља у војној примени);
2. Детекција опасних материја и неексплодираних мина;
3. Значајно смањење броја лажних аларма због мултиспектралног посматрања;
4. Побољшана детекција, препознавање и идентификација објеката;
5. Контрола граница, кријумчарења људи и недозвољене трговине људима;
6. Сузбијање експанзије заразних болести прецизном контролом температуре људи.

Финално, предложена је израда узорка који структурно одговара неком од испитиваних узорака од вештачких материјала приближних карактеристика (полимера). Планирано је испитивање израђених вештачких узорака на исти начин и њихово усавршавање у правцу фабрикације и комерцијализације, односно у смислу практичне примене.

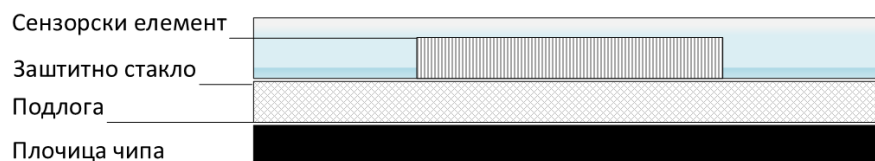
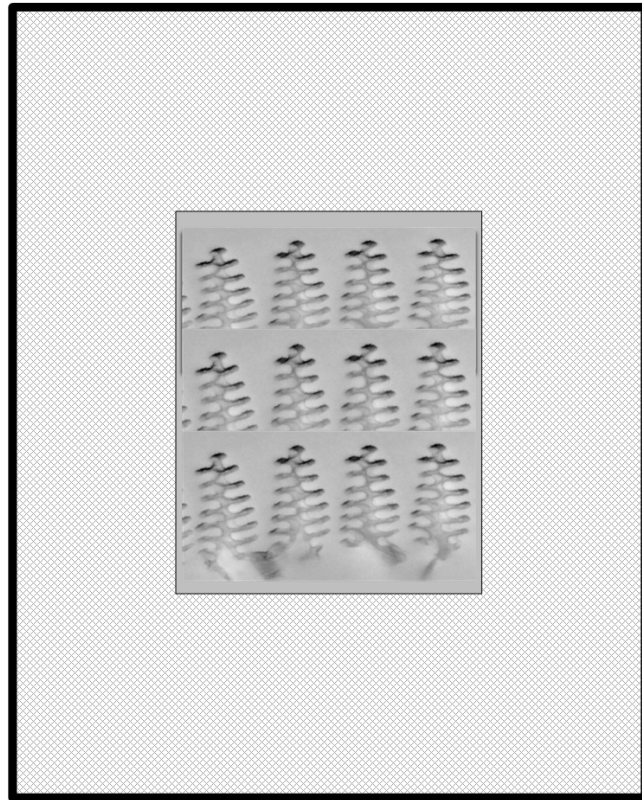
7.1 КОНСТРУКТИВНА ДОКУМЕНТАЦИЈА

На основу инжењерског приступа и премеравања делова од интереса, израђен је пробни конструктивни цртеж елемената структуре типа „јелкице“ који је приказан на слици 4.20. На основу њега је у даљем току пројекта планирана израда прототипа сензорских делова детектора.



Слика 7.1 Конструктивни цртеж димензионисане јелкице (све мере су дате у микрометрима)

Сензорски елементи израђени према претходом цртежу, интегришу се у један сензорски елемент који садржи одређен број појединачних структура типа „јелкица“. Овај број може бити дефинисан тек у фази прототипског испитивања. Потребно је испитати могућности слагања у једнодимензионалну, дводимензионалну и тродимензионалну структуру у смислу редова и слојева. Овако интегрисан сензор се наноси на детекторски чип (слика 7.2). Осим у приказаној на слици, чип би се радио и у варијанти без заштитног стакла. Након тестирања би се утврдило оптимално решење.



Слика 7.2 Идејни цртеж детекторског чипа

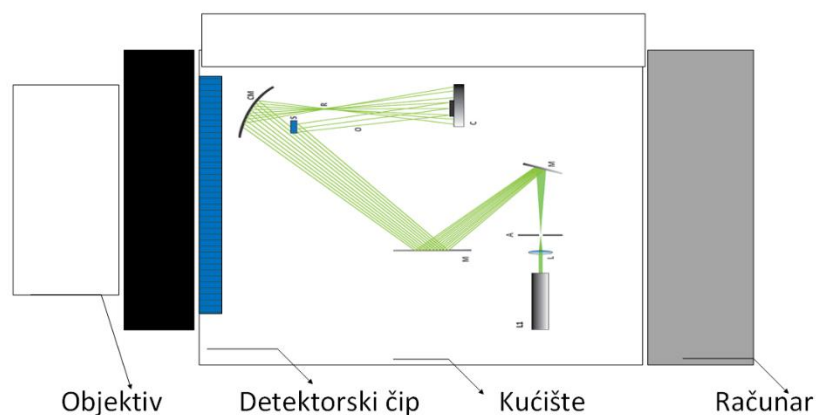
Питање димензија самог чипа се решава у моменту када је одређена коначна технолошка документација израде самог сензорног елемента као и чипа, односно технологија наношења карактеристичних структура типа „јелкица“ на подлогу детекторског чипа.

У коначном склопу би се осим детекторског чипа, налазило кућиште са оптимизованим холографским системом, мали рачунар за обраду података и монитор за приказ истих. Такође од додатних елемената предвиђен је и подсклоп објектива који садржи објектив и прирубницу за објектив. Комплетирана саставница главних елемената склопа детектора дата је у табели 7.1.

Табела 7.1 Табела - саставница елемената склопа детектора

СКЛОП ДЕТЕКТОРА	Делови	Ком.
1.1 Подсклоп објектива		1
	1.1.1 Објектив	1
	1.1.2 Прирубница објектива	1
1.2 Детекторски чип		1
1.3 Кућиште		1
1.4 Подсклоп рачунара		1
	1.4.1 Рачунар	1
	1.4.2 Монитор	1

Као коначни предлог конструктивне документације дата је шема детектора.



Слика 7.3 Шема предложеног детектора

У кућиште, одмах иза детекторског чипа, инсталира се модификовани холографски систем - интерферометар. Тачна конфигурација система се закључује након испитивања неколико могућности.

Израда према конструктивној документацији не представља изазов након што се добију резултати у смислу интеграције детекторског чипа.

7.2 ТЕХНОЛОШКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

Технолошка документација биће израђена у складу са одабраном методом фабрикације и избором материјала.

За израду сензорног елемента, вештачке структуре типа „јелкица“ предвиђена је технологија тродимензионалног штампања. Као логично решење за нормирање материјала јавља се нека врста полимера, имајући у виду природну структуру лептировог крила. Полимер у варијанти полазног материјала нема одређену форму, него се јавља у виду праха, раствора, гранулата и сл. Најпре се врши „претходна“ обрада обликовања из које настаје одређен полуфабрикат који се даље обликује класичним поступцима обликовања.

За све остале делове детектора (осим стакала) бирају се нерђајући материјали, нпр. прохроми. Ови делови подлежу класичној обради метала поступно по израђеним технологијама за сваки део посебно:

1. Обрада резањем: стругање, глодање, резање, бушење и брушење;
2. Обрада спајањем: заваривање и различити типови лепљења;
3. Површинска обрада: поступци бојења и лакирања и завршна заштитна обрада.

Када су сви делови израђени и исконтролисани у димензионом смислу, приступа се монтажи подсклопова и склопова према технологији монтаже.

Последњи корак је контрола финалног производа. Контрола се спроводи кроз различита тестирања према претходно утврђеном пропису о квалитету производа. Најпре се испитују оптичке карактеристике, као и основне електро-механичке функције, и на овај начин се оцењује функционалност производа. Финално се спроводе испитивања издржљивости као што су отпорности на вибрације и влагу, температурна и издржљивост у различитим временским условима итд.

Комплетну конструктивну и технолошку документацију, као и пропис о квалитету производа формирају машински инжењери, а сама израда и монтажа делова врши се у фабричким условима. Контролна испитивања се спроводи у оптичкој и физичкој лабораторији одабране институције.

8. ЗАКЉУЧАК

У складу са савременим војним технологијама, а са аспекта оптике, препозната је потреба за проналажењем нових механизма ИЦ детекције. У том смислу, идентификован је термофоретски ефекат као интересантан и од потенцијалног значаја и приступљено је проучавању истог.

Темељним теоретским истраживањем, пронађена је веза између биофотонских структура и термофоретског ефекта. Тачније, анализа је указала да су биофотонске структуре идеалне за истраживање истог, а да природа овог ефекта изискује методу која комбинује оптику и механику. Овакве методе се једино препознају као интерферометријске, те је изабрана холографија као метода од великог значаја за праћење оптомеханичких појава, односно за праћење механичких деформација на нано скали.

У оквиру истраживања посвећеног овој дисертацији, први пут је установљен главни параметар утицаја на јачину термофоретског ефекта као и важност и могућност примене у области биомиметике [51]. Овакво откриће представља значајан научни допринос дисертације. У овом правцу постоји и практични допринос, јер управо термофоретски ефекат и биомиметика имају велики значај у конструкцији и производњи бројних МЕМС/НЕМС, па и конкретно самог радиометарског детектора.

Такође је симбиоза научног и практичног доприноса рада представљена и у смислу разоткривања ширине примене холографске методе испитивања, као што је испитивање биофотонских структура али и осцилаторних хемијских реакција [47] [99].

Главни аспект практичног доприноса огледа се у могућој имплементацији проучаваног ефекта у МЕМС/НЕМС, односно његовој примени конкретно код војних система.

Есенција ове тезе је у изучавању недовољно истраженог феномена фотофоретског ефекта уз помоћ методе холографске интерферометрије, на основу ког је предложено потенцијално решење за радиометарски детектор базиран на биолошким структурама МЕМС/НЕМС, које може бити од великог значаја за примену у области војног машинства, односно система наоружања.

Од изузетне важности је напоменути да ова теза отвара потенцијалне нове области за изучавање на пољу машинства, као што је оптомеханика наносистема.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] He, Y., Deng, B., Wang, H., Cheng, L., Zhou, K., Cai, S., & Ciampa, F., "Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: a review," *Infrared Physics & Technology*, vol. 116, p. 103754, 2021.
- [2] Osman, A. H., Adzis, Z., Arief, Y. Z., & Muhamad, N. A., "Investigation on Equipment Failure Mode and Causes Using Infra-Red Thermovision Camera Images for High Voltage Electrical Connection," *Applied Mechanics and Materials, Vol. 818. Trans Tech Publications Ltd*, pp. 86-90, 2016.
- [3] Vasiljević, D., *Optički uređaji i optoelektronika*, Beograd: Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2005.
- [4] Herschel, W., "XIV. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, no. 90, pp. 284-292, 1800.
- [5] Barr, E. S., "Historical survey of the early development of the infrared spectral region," *American Journal of physics*, vol. 28, no. 1, pp. 42-54, 1960.
- [6] Barr, E. S., "The infrared pioneers—II. Macedonio melloni," *Infrared physics*, vol. 2, no. 2, pp. 67-74, 1962.
- [7] "Istituto tecnico tecnologico Montani, Muse virtuale ITT Montani," [Online]. Available: Istitutomontani.gov.it/museovirtuale/doppio_copo73/.
- [8] Rogalski, A., "History of infrared detectors," *Opto-Electronics Review*, vol. 20, no. 3, pp. 279-308, 2012.
- [9] Bieszczad, G., & Kastek, M., "Measurement of thermal behavior of detector array surface with the use of microscopic thermal camera," *Meteorology and measurement systems*, vol. 18, no. 4, pp. 679-690, 2011.
- [10] Smith, W., "Effect of light on selenium during the passage of an electric current," *SPIE MILESTONE SERIES MS, 56*, pp. 3-3, 1992.
- [11] Hertz, H., "Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electriche Entladung," *Annalen der Physik*, vol. 267, no. 8, pp. 983-1000, 1887.
- [12] Elster, J., & Geitel, H., "Ueber die Entladung negativ electriche Körper durch das Sonnen-und Tageslicht," *Annalen der Physik*, vol. 274, no. 12, pp. 497-514, 1889.
- [13] Klassen, S., "The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom," *Science & Education*, vol. 20, no. 7-8, pp. 719-731, 2009.
- [14] Planck, M., "On the law of distribution of energy in the normal spectrum," *Annalen der physik*, vol. 4, no. 553, p. 1, 1901.
- [15] Case, T. W., "Notes on the change of resistance of certain substances in light," *Physical Review*, vol. 9, no. 4, p. 305, 1917.

- [16] Lawson, W. D., Nielsen, S., Putley, E. H., & Young, A. S., "Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 9, no. 3-4, pp. 325-329, 1959.
- [17] Cashman, R. J., "Film-type infrared photoconductors," *Proceedings of the IRE*, vol. 47, no. 9, pp. 1471-1475, 1959.
- [18] Plyler, E. K., "Commemorative issue with extensive material on Coblenz's scientific work," *Applied Optics*, November 1963, vol. 2, no. 11, p. 1089, 1963.
- [19] Soref, R. A., "Extrinsic ir photoconductivity of Si doped with B, Al, Ga, P, As, or Sb," *Journal of Applied Physics*, vol. 38, no. 13, pp. 5201-5209, 1967.
- [20] Boyle, W. S., & Smith, G. E "Charge coupled semiconductor devices," *Bell System Technical Journal*, vol. 49, no. 4, pp. 587-593, 1970.
- [21] Shepherd, F. D., & Yang, A. C., "Silicon Schottky retinas for infrared imaging," *International Electron Devices Meeting Tech. Dig.*, pp. 310-313, 1973.
- [22] Ketsdever, A., Gimelshein, N., Gimelshein, S., & Selden, N., "Radiometric phenomena: from 19th to 21st century," *Vacuum*, vol. 86, pp. 1644-1662, 2012.
- [23] Barber, P., *Optical effects associated with small particles*, Singapore: World Scientific, 1988.
- [24] Karniadakis, G., Beskok, A., & Aluru, N., *Microflows and nanoflows: Fundamentals and simulation*, New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- [25] Passian, A., Warmack, R. J., Ferrel, T. L., & Thundat, T., "Thermal transpiration at the microscale: a crookes cantilever," *Physical review letters*, vol. 90, no. 12, p. 124503, 2003.
- [26] Ehrenhaft, F., "Photophoresis and its interpretation by electric and magnetic ions," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 233, no. 3, pp. 235-256, 1942.
- [27] Passian, A., Wig, A., Meriaudeau, F., Ferrel, T. L., & Thundat, T., "Knudsen forces on microcantilevers," *Journal of applied physics*, vol. 92, no. 10, pp. 6326-6333, 2002.
- [28] Tehranian, S., Giovane, F., Blum, J., Xu, Y., & Gustafson, B., "Photophoresis of micrometer-sized particles in the free-molecular regime," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, pp. 1649-1657, 2001.
- [29] Horvath, H., "Photophoresis - A forgotten force?," *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 31, pp. 181-199, 2014.
- [30] Potyrailo, R. A., Ghiradella, H., Vertiatchikh, A., Dovidenko, K., Counoyer, J. R., & Olson, E., "Morpho butterfly wing scales demonstrate highly selective vapour response," *Nature photonics*, vol. 1, no. 2, pp. 123-128, 2007.
- [31] Franceschetti, G., & Riccio, D., *Scattering, natural surfaces and fractals*, Elsevier, 2007.
- [32] [Online]. Available: pngkey.com.

- [33] Gabor, D., "A new microscopic principle," *Nature*, vol. 161, pp. 777-778, 1948.
- [34] Gabor, D., "Microscopy by reconstructed wave-fronts," *Proceedings of the Royal Society of London; Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 197.1051, pp. 454-487, 1949.
- [35] Newton, I., "A letter of Mr. Isaac Newton, Professor of mathematics in the University of Cambridge; Containing his new theory about light and colors: sent by the author to the publisher from Cambridge, Febr.6. 1671/72; In order to be communicated to the R. Society," *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, vol. 6, no. 80, pp. 3075-3087, 1972.
- [36] Schawlow, A. L., & Townes, C. H., "Infrared and optical masers," *Physical Review*, vol. 112, no. 6, p. 1940, 1958.
- [37] Maiman, T. H., "Optical and microwave-optical experiments in ruby," *Physical Review Letters*, vol. 4, no. 11, p. 564, 1960.
- [38] [Online]. Available: pixabay.com.
- [39] Vidač, L., "Diplomski rad: Holografija," *Prirodno-matematički fakultet*, Novi Sad, 1973.
- [40] Pedrini, G., Osten, W., & Gusev, M. E., "High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement," *Applied optics*, vol. 45, no. 15, pp. 3456-3462, 2006.
- [41] Françon, M., *Holographie*, New York: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1972.
- [42] "Creative Commons Atributions," [Online]. Available: <https://creativecommons.org/>.
- [43] Ostrovsky, Y. I., Shchepinov, V. P., & Yakovlev, V. V., "Holographic interferometry," in *Holographic interferometry in experimental mechanics*, Berlin, Heidelberg, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 60, Springer, 1991.
- [44] Kreis, T., *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*, Weinheim: John Wiley & Sons, 2006.
- [45] Grujić, D., Vasiljević, D., Pantelić, D., Tomić, Lj., Stamenković, Z., & Jelenković, B., "Infrared camera on the butterfly's wing," *Optics express*, vol. 26, no. 11, pp. 14143-14158, 2018.
- [46] Pantelić, D., Grujić, D., & Vasiljević, D., "Single-beam, dual-view digital holographic interferometry for biomechanical strain measurements of biological objects," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 19, no. 12, p. 127005, 2014.
- [47] Simovic-Pavlovic, M., Pagnacco, M. C., Grujic, D., Bokic, B., Vasiljevic, D., Mouchet, S., Verbiest, T., & Kolaric, B., "Uncovering hidden dynamics of natural photonic structures using Holographic imaging," *Journal of Visualized Experiments*, e63676, 2022.
- [48] Shimobaba, T., & Ito, T., *Computer holography acceleration algorithms and hardware implementations*, CRC press, 2019.

- [49] Shimobaba, T., Weng, J., Sakurai, T., Okada, N., Nishitsuji, T., Takada, N., Shiraki, A., Masuda, N., & Ito, T., "Computational wave optics library for C++: CWO++ library," *Computer physics communications*, vol. 183, pp. 1124-1138, 2012.
- [50] Muffoletto, R. P., Tyler, J. M., & Tohline, J. E., "Shifted Fresnel diffraction for computational holography," *Optical Express*, vol. 15, pp. 5631-5640, 2007.
- [51] Simovic-Pavlovic, M., Bokic, B., Vasiljevic, D., & Kolaric, B., "Bioinspired NEMS - Prospective of collaboration with nature," *MDPI - Applied Sciences*, vol. 12, no. 905, 2022.
- [52] Feynman, R. P., "Plenty of room at the bottom," in *Presentation to American Physical Society*, 1959.
- [53] "Internet of things agenda," [Online]. Available: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/>.
- [54] Nathanson, H. C., & Wickstrom, R. A., "A resonant gate silicon surface transistor with high bandpass properties," *Applied Physics Letters*, vol. 7, no. 4, p. 84, 1965.
- [55] Motamedi, M. E., "Micro-Opto-Electro-Mechanical systems," *Optical Engineering*, vol. 33, no. 11, pp. 3505-3517, 1994.
- [56] Wagoner, P. S., & Craighead, H. G., "Micro- and nanomechanical sensors for environmental, chemical, and biological detection," *Lab on a Chip*, vol. 7, pp. 1238-1255, 2007.
- [57] Rinaldi, A., Licoccia, S., & Traversa, E., "Nanomechanics for MEMS: a structural design perspective," *Nanoscale*, vol. 3, pp. 811-824, 2011.
- [58] Zougagh, M., & Rios, A., "Micro-electromechanical sensors in the analytical field," *Analyst*, vol. 134, pp. 1274-1290, 2009.
- [59] Livada, B., Infrared detectors - characteristics and testing, Lecture notes.
- [60] Breiter, R., Ihle, T., Wendler, J., Ruhlich, I., & Ziegler, J., "Next generation cooled long range thermal sights with minimum size, weight and power," *Infrared Technology and Applications XXXIX. International Society for Optics and Photonics*, vol. 8704, p. 87040p, 2013.
- [61] Jaeger, R. C., Introduction to microelectronic fabrication, 2nd ed., New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [62] Nambiar, S., & Yeow, J. T. W., "Conductive polymer-based and bioelectronics," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1825-1832, 2011.
- [63] Mamilla, V. R., & Chakradhar, K. S., "Machining for electro mechanical systems (MEMS)," *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1170-1177, 2014.
- [64] Malek, C. G. K., "Laser processing for bio-microfluidics applications (part II)," *Anal Bioanal Chem*, pp. 1362-1369, 2006.

- [65] Chen, Y. P., & Yang, M. D., "Micro-scale manufacture of 3D printing," *Applied mechanics and materials*, Vols. 670-671, pp. 936-941, 2014.
- [66] "LMD 3D printing market," [Online].
- [67] Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R., "An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286-1296, 2019.
- [68] Pris, A. D., Utturkar, Y., Surman, C., Morris, W. G., Vert, A., Zalyubovskiy, S., Deng, T., Ghiradella, H. T., & Potyrailo, R. A., "Towards high-speed imaging of infrared photons with bio-inspired nanoarchitectures," *Nature Photonics*, vol. 6, pp. 195-200, 2012.
- [69] Zhang, F., Shen, Q., Shi, X., Li, S., Wang, W., Luo, Z., He, G., Zhang, P., Tao, P., Song, C., Zhang, W., Zhang, D., Deng, T., & Shang, W., "Infrared detection based on localized modification of Morpho butterfly wings," *Advanced Materials*, vol. 27, pp. 1077-1082, 2015.
- [70] NATO - Partnership for peace: Biological and bioinspired structures for multispectral surveillance, 2018.-2021.
- [71] Livada, B., & Babić, V., "Noćne optoelektronske sprave sa pojačivačima slike," *Vojnotehnički glasnik1992*, vol. 1, pp. 18-35.
- [72] Livada, B., "Vojne primene termovizije," Kumulativna naučnotehnička informacija, Vojnotehnički institut, Beograd, vol. 10, 2000.
- [73] "OPGAL," [Online]. Available: <https://www.opgal.com/defense-solutions/>.
- [74] "OPTIX," [Online]. Available: <https://www.optixco.com/>.
- [75] Perić, D., Livada, B., Perić, M., & Vujić, S., "Thermal imager range: Predictions, expectations, and reality," *Sensors*, vol. 19, p. 3313, 2019.
- [76] Lloyd, J. M., Thermal imaging systems, New York: Plenum press, 1975.
- [77] Hsing, T. R., & Poularikas, A. D., "The change of resolution of electro-optical systems due to atmosphere effects," *Proc. SPIE*, vol. 305, pp. 268-273, 1981.
- [78] Chaudhary, V., & Abhilasha, V. C., "Literature review: Mitigation of atmospheric turbulence impact on long distance imaging system with various methods," *International Journal of Science and Research*, vol. 3, no. 12, pp. 2227-2231, 2014.
- [79] "Schott optical glass pocket catalog," 2014. [Online]. Available: https://www.schott.com/advanced_optics.
- [80] Horn, S. B., "Cryogenic cooling options for forward looking infrared (FLIR)," *Proceedings SPIE*, vol. 245, no. Cryogenically cooled sensor technology, pp. 101-107, 1980.

- [81] Barela, J., Kastek, M., Firmanty, K., & Trzaskawka, P., "Determining the range parameters of observation thermal cameras on the basis of laboratory measurements," *Proceedings of SPIE*, vol. 8896, pp. 889610-1, 2013.
- [82] STANAG No.4347, NATO; MAS.
- [83] Ratches, J. A., Lawson, R. W., Obert, P. L., Bergemann, R. J., Cassidy, T. W., & Swenson, M. J., "Night Vision Laboratory Static Performance Model for Thermal Viewing Systems," NTIS AD-A011 212, U. S. Army Electronics Command, Night Vision Laboratory, 1975.
- [84] STANAG No. 4349, NATO; MAS.
- [85] Kopeika, N. S., Kogan, I., Israeli, R., & Dinstain, I., "Prediction of image propagation quality through the atmosphere: the dependance of atmospheric modulation transfer function on weather," *Optical Engineering*, vol. 29, no. 12, pp. 1427-1438, 1990.
- [86] Dura, M., "Polish thermal vision systems for the T-72 main battle tank," 2018. [Online]. Available: <https://defence24.com/armed-forces/land/polish-thermal-vision-systems-for-the-t-72-main-battle-tank>.
- [87] "TELEOPTIK-ŽIROSKOPI," [Online]. Available: <http://ziroskopi.rs/>.
- [88] Sosonowski, T., Madura, H., Bieszyzad, G., & Kastek, M., "Thermovision system for aircraft landing," *Measurement Automation Monitoring*, vol. 61, no. 06, pp. 180-183, 2015.
- [89] Harrigian, J., & Marosko, M., "Fifth generation air combat: maintaining the joint force advantage," in *Mitchell Institute for Aerospace Studies*, Arlington, 2016.
- [90] Lt. Gen. D. Deptula, Maj. Gen. L. Stutzreim, & H. Penney, "AIRFORCE magazine: The case for fifth-generation and NGAD airpower," 2019. [Online]. Available: <https://www.airforcemag.com/article/the-case-for-fifth-generation-and-ngad-airpower/>.
- [91] Jones, S., "THE CONVERSATION: The F-35 JSF: What is a fifth-generation fighter aircraft," 2014. [Online]. Available: <https://theconversation.com/the-f-35-jsf-what-is-a-fifth-generation-fighter-aircraft-26088>.
- [92] Khan, A. A., "China's stealth jet startles America," *Defence Journal*, vol. 15, no. 1, p. 2:50, 2011.
- [93] Martinic, G., "Jet fighter aircraft - five 'generations' later, and still counting," *Naval Engineers Journal*, 2015.
- [94] AIRBUS, "AIRBUS," [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en>.
- [95] Fiorenza, N., "JANES: German parliament approves funding for new frigate helicopter, tank ammunition upgraded torpedoes and IT," 2020. [Online]. Available: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/german-parliament-approves-funding-for-new-frigate-helicopter-tank-ammunition-upgraded-torpedoes-and-it>.

- [96] Jennings, G., "JANES: FCAS progresses with award of sensor contract," 2020. [Online]. Available: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/fcas-progresses-with-award-of-sensor-contact>.
- [97] "Current Scientific Corporation," [Online]. Available: <https://www.currentcorp.com/>.
- [98] Grevatt, J., "JANES: Naval group opens manila office in pursuit of submarine deal," 2020. [Online]. Available: <https://www.janes.com/defence-news/news-detail/naval-group-opens-manila-office-in-pursuit-of-submarine-deal>.
- [99] M. C. Pagnacco, J. P. Maksimovic, M. Dakovic, B. Bokic, S. R. Mouchet, T. Verbiest, Y. Caudano, & B. Kolaric, "Spontaneous Symmetry Breaking: The Case of Crazy Clock and Beyond," *Symmetry*, vol. 14, no. 413, 2022 .

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Марина Симовић-Павловић је рођена 09.01.1987. године у Београду. Основну школу “Стефан Немања” завршила је 2002. године, а затим завршава гимназију 2006. Исте године уписује Основне академске студије на Машинском факултету у Београду. У току основних студија, опредељује се за смер системи наоружања. 2011. године уписује Мастер академске студије на модулу Системи наоружања, где дипломира уз завршни (мастер) рад под насловом: “Пројектовање дневне нишанске справе за војника пешадије” са оценом 10. Стиче звање Дипломирани инжењер машинства – Мастер. Након студија, у априлу 2013. године, почиње да ради у фабрици оружја Телеоптик-Жироскопи. На радном месту, водећи конструктор машинства, сусреће се са различитим пројектима из области, као што су ракетни систем „Алас“, велики број оптичких направа, нишанских справа, и других производних јединица. У фабрици заокружује знање пролазећи кроз све фазе производње, од конструкције до испитивања и контроле. Године 2016. уписује Докторске академске студије на Машинском факултету у Београду, на смеру Системи наоружања, са научно-истраживачком оријентацијом ка оптичким системима. Године 2017., као студент докторских студија, почиње да сарађује на пројекту ОИ171038 – Холографске методе генерисања специфичних таласних фронтава за ефикасну контролу квантних кохерентних ефеката у интеракцији атома и ласера које финансира МПНТР у оквиру Института за физику Универзитета у Београду. У периоду од октобра 2019. године до октобра 2022. године, кандидат је ангажована на међународном пројекту „*Biological and bioinspired structures for multispectral surveillance*“, финансираном са стране *NATO SPS (NATO Science for Peace and Security)*. Кандидат Марина Симовић-Павловић се у току докторских студија и писања дисертације на свом радном месту у компанији „Телеоптик-Жироскопи“, бавила испитивањем различитих нишанских справа, посебно тестирањем и оптимизацијом термовизијских уређаја. У исто време, у оквиру НАТО пројекта, бавила се истраживањем на тему ИЦ детектора базираних на биолошким структурама.

Тренутно је члан истраживачког тима на пројекту „*Patterning by Casimir Forces: From Chaos to Complex Patterns of Life*“ одобреном за финансирање од стране „Office of Naval Research“, који је планиран да траје у периоду од 2022. године до 2025. године.

Радећи у фабрици у комбинацији са учествовањем на пројектима на Институту за физику, кандидат се додатно образује у смислу привредног окружења и користи прилику да примени знања и вештине стечене приликом слушања предмета ОМНИР (Организација и Методе Научно Истраживачког Рада).

На конференцији „The Seventh International School and Conference on Photonics“ представља се радом „Measuring temperature changes of butterfly wing through deformation: a holographic approach“, у ком презентује примену холографске методе на биофотонским структурама која ће се показати као метода од великог значаја за различита испитивања. У раду "Bioinspired NEMS—Prospective of Collaboration with Nature" објављеном у часопису „Applied Sciences“, кандидат је са осталим ауторима детаљно дискутовала на тему наномеханичких система инспирисаним решењима из природе. Важност холографије и могућности примене ове методе описане су у раду „Uncovering hidden dynamics at the nanoscale: Holographic study“, у часопису „Journal of Visualized Experiments“ у ком је кандидат такође први аутор.

Активно се служи енглеским и руским језиком, као и софтверским пакетима: MATLAB, AutoCad, SolidWorks, LaTeX, OriginLab, ImageJ.

Оснивач је хуманитарног удружења за помоћ у едукацији и образовању деце и младих из угрожених група.

Удата је и има троје деце.

Списак објављених радова кандидата:

Категорија М20

1. **Simovic-Pavlovic, Marina**, Bojana Bokic, Darko Vasiljevic, and Branko Kolaric.: "Bioinspired NEMS—Prospective of Collaboration with Nature" *Applied Sciences* 12, no. 2: 905, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12020905> (M22)
2. **Simovic-Pavlovic, M.**, Pagnacco, M. C., Grujic, D., Bokic, B., Vasiljevic, D., Mouchet, S., Verbiest, T., Kolaric, B.: Uncovering Hidden Dynamics of Natural Photonic Structures using Holographic Imaging, *Journal of Visualized Experiments*, e63676, 2022. <https://w.jove.com/t/63676/uncovering-hidden-dynamics-natural-photonic-structures-using> (M23)

Категорија М30

1. **Marina Simovic-Pavlovic**, Dusan Grujic, Petar Atanasijevic, Darko Vasiljevic, Branko Kolaric, Dejan Pantelic: Measuring temperature changes of butterfly wing through deformation: a holographic approach, The Seventh International School and Conference on Photonics, SASA, Belgrade, Serbia, 26 August-30 august 2019, p.127 (M34)

Категорија М50

1. Redjimi A., Knezevic D., Savic K., Jovanovic N., **Simovic M.**, Vasiljevic D.: Noise equivalent temperature difference model for thermal imagers, calculation and analysis, *Scientific Technical Review*, vol.64 (2014), 42-49 (M52)

Категорија М60

1. Darko Vasiljevic, Dusan Grujic, **Marina Simovic**, Dejan Pantelic: Mechanical effects of photophoresis on nanometer scale structures, Jedanaesta radionica fotonike, Kopaonik, Srbija, 11.-14.03.2018., p.20 (M64)

Име и презиме аутора: Марина Симовић Павловић

Број индекса: 26/2016

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Радиоетарски детектор базиран на биолошким структурама-МЕМС/НЕМС

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Марина Симовић Павловић

У Београду, _____

Образац 6.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Марина Симовић Павловић

Број индекса 26/2016

Студијски програм Докторске студије

Наслов рада: Радиометарски детектор базиран на биолошким структурама-МЕМС/НЕМС

Ментор: др Дејан М. Мицковић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет

Ментор: др Дарко М. Васиљевић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за физику

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Марина Симовић Павловић

У Београду, _____

Образац 7.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Радиометарски детектор базиран на биолошким структурама-МЕМС/НЕМС

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Марина Симовић Павловић

У Београду, _____