

ИСТРАЖИВАЧИ ЦЕНТРА ЗА ФОТОНИКУ

	Име и презиме	Звање
1.	др Душан Арсеновић, <i>руководилац</i>	научни саветник
2.	др Марија Радмиловић-Рађеновић	научни саветник
3.	др Жељка Никитовић	научни саветник
4.	др Александар Крмпот	научни саветник
5.	др Драган Маркушев	научни саветник
6.	др Драгана Јовић Савић	научни саветник
7.	др Бранко Коларић	научни саветник
8.	др Дарко Васиљевић	научни саветник
9.	др Миливоје Ивковић	научни саветник
10.	др Зоран Грујић	виши научни сарадник
11.	др Михаило Рабасовић	виши научни сарадник
12.	др Станко Николић	виши научни сарадник
13.	др Светлана Савић-Шевић	виши научни сарадник
14.	др Бранка Мурић	виши научни сарадник
15.	др Ненад Сакан	виши научни сарадник
16.	др Владимир Дамљановић	виши научни сарадник
17.	др Александер Ковачевић	виши научни сарадник
18.	др Марко Николић	виши научни сарадник
19.	др Јелена Димитријевић	виши научни сарадник
20.	др Јадранка Васиљевић	научни сарадник
21.	др Никола Бошковић	научни сарадник
22.	Др Драган Лукић	научни сарадник
23.	др Даница Павловић	научни сарадник
24.	др Бојана Бокић	научни сарадник
25.	др Марина Лекић	научни сарадник
26.	др Биљана Станков	научни сарадник
27.	др Бранислав Салатић	научни сарадник
28.	др Драгана Маркушев	научни сарадник
29.	др Марица Поповић	научни сарадник
30.	др Милица Винић	истраживач сарадник
31.	Владимир Лазовић	истраживач сарадник
32.	Иван Радојчић	истраживач сарадник
33.	Душан Грујић	истраживач сарадник
34.	Михајло Радмиловић	истраживач сарадник
35.	Марија Ђурчић	истраживач сарадник
36.	Иван Трапарић	истраживач приправник
37.	Филип Крајинић	истраживач приправник
38.	Марта Букумира	истраживач приправник
39.	Јована Јелић	истраживач приправник
40.	Алекса Денчевски	истраживач приправник
41.	Миљана Пиљевић	истраживач приправник
42.	Александра Миленковић	истраживач приправник
43.	Исидора Влаовић	истраживач приправник
44.	Дамир Митић	истраживач приправник



ПРОГРАМ НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКОГ РАДА ЦЕНТРА ЗА ФОТОНИКУ

Фотоника је сматра једном од кључних технологија 21. века који је назван „век фотона“. Фотоника може да обезбеди лидерство у областима као што су биофотоника, производња нових материјала, комуникације, пренос информација, здравствена заштита и заштита животне средине. Пратећи најсавременије научноистраживачке трендове, истраживачи Центра за фотонику Института за физику у Београду се, између осталог, баве квантном и нелинеарном оптиком, биофотоником, биофизиком, фотонским материјалима, ласерском спектроскопијом и компјутерским симулацијама са применама у биомедицини. **Програм научноистраживачког рада Центра за фотонику део је Дугорочног програма научноистраживачког рада Института за физику, који је усвојен од стране Научног већа Института за физику, а који се базира на Стратегији научноистраживачког рада Републике Србије.** Основна начела на којима се заснива програм научно истраживачког рада Центра за фотонику су компетитивност и сарадња. Компетитивност се огледа у квалитету и атрактивности истраживања, као и у броју и квалитету објављених научних радова. Кроз међународну сарадњу, с једне стране, по казујемо атрактивност привлачења партнера за предложена истраживања, док са друге стране, одржавамо и даље повећавамо компетитивност истраживача Центра.

Научна продукција

У претходне четири године истраживачи Центра су били аутори **144** рада у међународним часописима. Узимајући у обзир да је, у поменутом периоду, Центар бројао 40 сарадника (од тога 30 у начном звању) заједно са докторантима, просечан број објављених радова годишње, од 2019. до 2022. године, је **0.9** по истраживачу, што је знатно више од просека научне заједнице у Србији, а што додатно указује на квалитет истраживања који се спроводи у Центру.

Научни пројекти и колаборације

Као први *Twinning* пројекат добијен у Институту за физику, првом националном институту Републике Србије, посебно истичемо добијање пројекта „*Twinning for excellence of the Serbian Research center for quantum biophotonics*“ који ће се, током наредне три године, реализовати у Центру за фотонику, је престижни

програм Европске уније који, у оквиру програма *Horizon Europe*, промовише изврсност у истраживању кроз умрежавање и обуку. Идеја је да се институција ојача кроз размену искуства и експертиза са водећим европским научним организацијама. Партнери Института за физику у Београду на овом пројекту су Универзитет „Фридрих Шилер“ у Јени, Италијански национални истраживачки савет (CNR) и Биолошки факултет Универзитета у Београду. Циљ пројекта је подизање изврсности и угледа Института за физику у свим научним, управљачким и административним аспектима релевантним за међународне истраживачке активности, док је коначни циљ успостављање квантног биофотоничког центра који ће пре свега карактерисати изврсност у науци.

Као један од центара изврсности Института за физику у Београду, Центар за фотонику је, такође, укључен у **SAIGE пројекат** - „**Serbia Accelerating Innovation and Growth Entrepreneurship Project**“, који се финансира и реализује кроз чврсто партнерство Републике Србије, Светске банке и Европске уније, са циљем додатног улагања у науку, технолошки развој, иновације и иновативно предузетништво.

Истраживачи Института за физику у Београду, института од националног значаја за Републику Србију, остварили су запажен успех освојањем чак седам пројеката који су одобрени за финансирање у оквиру програма „**Идеје**“, до сада највећег програма Фонда за науку који је покренут са циљем да финансира изврсну науку кроз пројекте који ће, у будућности имати утицаја на развој науке и истраживања. Од седам пројеката који се реализују у Институт за физику, руководиоци чак три пројекта су истраживачи Центра за фотонику. Такође, руководилац једног од четири пројекта, које су добили истраживачи из Института за физику, финансирана у оквиру програма „**Промис**“, је истраживач Центра за фотонику. Основни подаци о научноистраживачким пројектима финансираним од стране Фонда за науку Републике Србије, чији су руководиоци истраживачи Центра за фотонику, су дати у следећој табели.

Назив пројекта	Позив	Руководилац пројекта	Трајање пројекта
<i>Control and manipulation of light in complex photonic systems</i>	IDEAS	др Драгана Јовић Савић	2022-2024.
<i>Novel approach to laser induced breakdown spectroscopy diagnostics of fusion reactor plasma facing components</i>	IDEAS	др Миливоје Ивковић	2022-2024.
<i>Multiphysics Software Package for Simulation of Electrosurgical Procedures</i>	IDEAS	др Марија Радмиловић-Рађеновић	2022-2024.
<i>Hemoglobin-based spectroscopy and nonlinear imaging of erythrocytes and their membranes as emerging diagnostic tool</i>	PROMIS	др Александар Крмпот	2020-2022.

Центар за фотонику је изузетно ангажован на реализацији бројних међународних пројеката. Подаци о међународним пројектима, који су били актуелни у периоду 2019-2022. године, су наведени у табели која следи. Прва три пројекта, која су отпочела у поменутом периоду, још увек трају.

Назив пројекта	Тип пројекта	Руководилац пројекта	Трајање пројекта
<i>Twinning for excellence of the Serbian Research center for quantum biophotonics</i>	Horizon Europe project	др Душан Арсеновић	2022-2025.
<i>Heat transfer across biological systems: development in vivo photothermal diagnostic</i>	Cooperation between Institute for Nuclear Research, Dubna, and the Ministry of Science of the Republic of Serbia	др Марица Поповић	2022-2024.
<i>Vacuum breakdown characteristics of micrometric gaps between noble metal electrodes powered by direct-current and pulsed electric field</i>	Slovakia-Serbian bilateral project	др Марија Радмиловић-Рађеновић	2022-2023.
<i>Biological and bioinspired structures for multispectral surveillance</i>	NATO Emerging Security Challenges Division	др Даница Павловић	2019-2022.
<i>Imaging and time resolved spectroscopy of hemoglobin and red blood cells</i>	German - Serbian bilateral project	др Александар Крмпот	2020-2021.
<i>New polymer based materials and their applications in holography, biophotonics and sensors</i>	Belarus - Serbian bilateral project	др Дејан Пантелић, некадашњи члан	2020-2021.
<i>Hemoglobin-based nano-spectral non-linear imaging for future label-free medical diagnostics</i>	Slovenian - Serbian bilateral project	др Александар Крмпот	2020-2021.
<i>New photosensitive materials based on polymers and their applications in holography, biophotonics and sensors</i>	Belarus - Serbian bilateral project	др Дејан Пантелић, некадашњи члан	2019-2020.
<i>Mimetics of insects for sensing and security</i>	Projects between the Republic of Serbia and the People's Republic of China	др Дејан Пантелић, некадашњи члан	2018-2020.
<i>Study of biological micro- and nano-structures in the visible, infrared and terahertz range</i>	German - Serbian bilateral project	др Михаило Рабасовић	2018-2020.
<i>Nabavka opreme za merenje kvantnog prinosa fluorescentnih (bio)markera nove generacije koji se koriste u obeležavanju ćelija kancera i naprednim mikroskopskim tehnikama</i>	Filip Moris-Centar za razvoj lidersva, program PokreniNauku	др Михаило Рабасовић	2019-2019.
<i>5G-MultiScan Advanced Multi-Beam and Scanning Antennas for 5G and Radar Applications</i>	Serbia - Germany bilateral project	др Бранка Јокановић, некадашњи члан	2018-2019.

У претходном четворогодишњем периоду, осим бројних међународних пројеката, Центар за фотонику је, такође, био носилац више пројекта основних, интегрисаних и интердисциплинарних истраживања. У наредном периоду очекујемо учешће на пројектима, у оквиру будућих позива које ће расписивати Фонд за науку Републике Србије. Циљ нам је да у новом циклусу компетитивних пројеката наставимо успехе из претходног периода. Очекујемо да ће добијање нових међународних пројеката, као и успостављање колаборација са водећим институцијама у земљи и иностранству резултирати даљим, благим повећањем процената истраживач месеци који се реализују на пројектима које координира Центар. Гарант тога је квалитет свеукупног научноистраживачког рада у Центру.

Лабораторије Центра за фотонику

Програм научноистраживачког рада центра **Центар за фотонику** се састоји из јасно дефинисане целине у оквиру које функционише **осам лабораторија** које су опремљене за врхунска истраживања у фотоници и сродним областима:

- **Лабораторија за квантну биофотонику,**
- **Лабораторија за биофизику,**
- **Лабораторија за спектроскопију плазме и ласере,**
- **Лабораторија за фотоакустику,**
- **Лабораторија за нелинеарну фотонику,**
- **Лабораторија за биомедицинске симулације,**
- **Лабораторију за ласерску интеракцију са материјалима и ласере,**
- **Лабораторија за физику материјала под екстремним условима.**

Програм научноистраживачког рада Центра за фотонику за период од 2023. до 2027. године биће представљен по темама које се спроводе у оквиру одговарајућих лабораторија:

1. Лабораторија за квантну биофотонику

Руководилац: др Душан Арсеновић, научни саветник

1.1. Програм истраживања: Стиснута стања (Марија Ђурчић)

На теми “Стиснута стања”, урађена је оптимизација поставке за генерисање и мерење релативно амплитудски стиснуте светлости - постављен је нови систем за грејање хелије. Изведена је детаљна студија овог ефекта у функцији од различитих параметара система, снаге пробе и пумпе, једно-фотонског фреквенцијског помераја, дво-фотонског фреквенцијског помераја и температуре гаса у хелији. Рађено је на дизању експерименталне поставке за генерисање ЕИТ сигнала са високо побуђеним Ридберговим стањима на double-ladder шеми у пари калијума и њеној реализацији у лабораторији.

Циљеви за наредни период:

Планирана је имплементација новог метода за микроскопију, примена временски корелираних снопова добијених четвороталасним мешањем у пари калијума, за које је демонстрирано да генеришу релативно амплитудски стиснуту светлост.

Радиће се на поставци за Ридбергову физику у пари калијума и њеном унапређењу.

1.2. Програм истраживања: Четворталасно мешање моделима који описују простирање кохерентног зрачења кроз материјалне средине се баве (др Душан Арсеновић, др Жељка Никитовић, Марија Ђурчић)

Интеракција кохерентног зрачења са атомским парама је анализирана помоћу Максвел-Блохових једначина. Развијени су кодови за нумеричко решавање овог система уз укључење Доплеровог ефекта и релаксационих процеса. У њима су додати и ефекти који настају из квантног третирања електромагнетног поља, тзв. Ланжвенове једначине. Тиме су створени услови за теоријску анализу квантних ефеката као што је појава стиснутих стања под условима који обезбеђују четворталасно мешање кохерентног зрачења.

Циљеви за наредни период:

У наредном периоду ће се радити на анализи цепања пулса пробног ласера. Тражиће се услови и механизми који доводе до тога се правилан гаусовски профил пулса по времену деформише или цепа. Истраживаће се и резултат да, под неким параметрима, модел даје појачање у четворталасном мешању чак и када је пумпа на резонанци са атомским прелазом.

1.3. Програм истраживања: Закони одржања (др Душан Арсеновић, др Јелена Димитријевић)

Недавно започета тема је проналажење закона одржања Оптичких Блохових једначина (ОБЈ) зашта има веома мало примера у литератури. Рађено је и на методи за ефикасно нумеричко решавање система 3+1Д Максвел-Блохових једначина (МБЈ) што омогућује изучавање кохерентних ефеката приликом пропагације снопова са трансверзалним профилем, попут Лагер-Гаусовог снопа кроз гасовиту атомску средину и који се изводе у експериментима Центра за фотонику.

Циљеви за наредни период: Циљеви у наредном периоду представљају наставак скорашњег рада, добијање закона одржања за ОБЕ за систем од два нивоа са и без дегенерације, што одговара ситуацији када се атом налази у присуству магнетног поља. Такође ће се радити на добијању закона одржања МБЈ за једноставне атомске шеме и на примени добијених резултата на унапређивање метода решавања комплексних МБЕ у 2 или више димензија.

1.4. Програм истраживања: Сударни процеси у плазми (др Жељка Никитовић)

У одсуству експерименталних и теоријских резултата примењена је једноставна техника процене пресека и одвајања реактивних од еластичних судара (Denroh-Nambu theory). Техника Монте Карло симулације је примењена како би се израчунали транспортни параметри у ДС електричним пољима. За одређивање потпуног скупа пресека од велике важности је облик пресека за настајање комплекса. Он се углавном користи са фреквенцијом судара која не зависи од енергије и прорачунава се из средњег живота комплекса, мада бројна мерења овог пресека указују да оштро опадају са порастом енергије. У случају да им је време живота кратко, пресеци за настанак комплекса се повећавају са порастом

притиска услед стабилизације тројним сударима. По први пут је у литератури приказано одређивање транспортних параметара јона у индукваном поларизационом потенцијалу уз учешће егзотермних реакција асоцијације и реакција промене идентитета јона. Претходно су израчунати транспортни коефицијенти за расејање електронана CF₄ уз присуство CF₃, CF₂, CF, F₂ и F и укључени су у глобалне моделе. Дати су прорачуни у реалним смешама који се користе за плазма нагризање (Ag, CF₄, O₂). Гас BF₃ се употребљава у гасним детекторима термалних неутрона, а коришћен је и као замена за B₂H₆. BF₃ се користи за имплантацију јер је B допант р-типа код аморфних Si филмова који се употребљавају у изради соларних ћелија и интегрисаним колима.

Циљеви за наредни период:

Наставља се припрема пресека и за друге јоне H⁺, H₂⁺ у H₂. Потом следи израчунавање транспортних коефицијената. Припремљени су пресеци за Ag⁺ у CF₄ и израчунати су транспортни параметри. Рад је написан и финансиран. Планира се израчунавање пресека и транспортних коефицијената He⁺ у смеси He/CF₄, у међувремену рад је завршен и публикован крајем ове године. Наставља се рад на теми везаној за транспорт позитивних јона у засићеним угљоводонцима.

1.5. Програм истраживања: Електронске дисперзије дводимензионих материјала (др Владимир Дамљановић)

Нађене су све групе симетрије и тачке Брилуенових зона немагнетних дводимензионалних материјала које дају линеарне електронске дисперзије. Извршена је потпуна класификација свих могућих линеарних дисперзија које се јављају у тим материјалима. Резултати обухватају системе са и без спин-орбитне интеракције, као и са и без присуства симетрије при временској инверзији.

Циљеви за наредни период:

У наредном периоду планира се проширење резултата на све могуће типове дисперзија (не само линеарних) код немагнетних материјала симетричних при временској инверзији. Крајњи циљ је прављење атласа електронских дисперзија дводимензионалних материјала, који би био од користи истраживачима који се баве мерењем (ARPES) или нумеричким прорачунима зонских структура.

1.6. Програм истраживања: Магнетометрија (др Зоран Грујић)

Помоћу опреме добијене кроз донације Департмана за физику Универзитета у Фрибургу, Швајцарска постављен је експеримент за магнетометрију којим управља др Зоран Грујић и који учествује у кампањи мерења GNOME колаборације. Резултати још нису публиковани но познато је да су квалитетнији од већ објављених у часопису Nature Physics.

Циљеви за наредни период:

Циљеви у наредном периоду су допринос GNOME и nEDM колаборације у складу са расположивим ресурсима и наставак реализације FRAPOM пројекта.

1.7. Програм истраживања: Интеракција светлости са биофотонским структурама (др Бранко Коларић, др Дарко Васиљевић, др Бојана Бокић)

У претходне четири године урађена су истраживања из биофотонице - интеракција светлости у линеарном и нелинеарном режиму са биофотонским

структурама. Интерферометријско праћење фазних прелаза и динамике неравнотежних процеса. Проучавање радијационе динамике и еволуције ексцитованог стања помоћу линеарне и нелинеарне оптике и истраживање интеракције умрежених фотона са материјом.

Циљеви за наредни период:

У наредном периоду планиран је развој молекуларног извора појединачних и уплетених фотона, термодинамичко и оптичко испитивање биофотонских структура и утицај њихове топологије на пренос топлоте и светлости, проучавање динамике ексцитованог стања и у режиму јаких интеракција ради развоја нових криптографских тагова. Вршиће се и проучавање динамике ексцитованог стања проузрокованог абсорпцијом више фотона, умреженог фотона или структурираним фотонима, затим магнетофоника и оптичко проучавање еволуције магнетних домена као и проучавање оптичких особина нестехиометријских једињења.

1.8. Програм истраживања: Холографски генерисане структуре у фотоосетљивом биополимеру (др Светлана Савић-Шевић, др Бранка Мурић, др Марина Лекић, Филип Крајинић)

У фотоосетљивом биополимеру (pullulan), холографски су генерисане сложене, вишеслојне, структуре које се одликују случајно распоређеним нано-стубићима у слојевима ваздуха. Проучаван је утицај таквих структура на фотонски процеп (област таласних дужина у којима се светлост не простире кроз структуру). Показано је да овакав метаматеријал има велики негативан коефицијент термалног ширења, а ефекат је детаљно проучен и објашњен. Коришћено је директно ласерско исцртавање за генерисање микрооптских, микромеханичких и микрофлуидних структура. Развијене су модификације софтвера које омогућавају бољу контролу померања ласерског снопа, његовог интензитета и времена озрачавања. Користећи дигиталну холографску интерферометрију уз праћење температурне промене термалном камером, испитивана је полимеризација денталних композита, користећи оптичке фибере. Овим радом завршен је експериментални део докторске дисертације Евгенија Новте са Медицинског факултета у Новом Саду. У сарадњи са Стоматолошким факултетом у Београду, испитивана је трансмитивност композита за зрачење новог типа денталне лампе са четири различите таласне дужине: љубичасте, плаве, црвене и инфра црвене. Желели смо да утврдимо каква побољшања нуди нови тип лампе у односу на досадашње са највише две таласне дужине.

Циљеви за наредни период:

Циљеви у наредном периоду су финализација експеримента, обраде резултата и писање рада, везано за нову денталну лампу, прављење и испитивање нових фотоосетљивих материјала погодних за директно ласерско исписивање користећи постојећи уређај у лабораторији. Побољшање резолуције и брзине уређаја за директно ласерско исписивање. Генерисање сочива, чипова, микроканала, сензора користећи дати уређај. Проучавање ултразвучне абсорпције крила јапанског свиленог мољца, *Antheraea uatamai*, помоћу акустичне холографије.

1.9. Детекција инфрацрвеног зрачења путем дигиталне холографске интерферометрије (др Бранислав Салатић, др Даница Павловић, Душан Грујић, Филип Крајинић)

У претходном периоду је дизајниран систем којим је могуће детектовати зрачење из невидљивог дела спектра. Систем је базиран на холографији као детекционој техници, а микронске биофотонске структуре се користе као детекциони елементи. Термални ефекти појачавају се дејством фотофоретских сила, што омогућује лакшу детекцију (праг детекције постаје значајно нижи него код стандардних термалних камера). Резултати су објављени у неколико међународних часописа. Будући да је систем универзалан, на њему је могуће снимати и истраживати појаве и објекте различитих карактеристика, једино ограничење је њихова величина која не може бити већа од пар кубних сантиметара.

Поред тога, унапређен је и систем за директно ласерско уписивање. Он се користи за генерисање нано и микро структура на фото-осетљивим материјалима. Карактерише се прецизним померањем у три осе, које се остварује коришћењем X-Y стола и пиезоелектрика задуженим за померање дуж аксијалне осе. Исцртаване су наноструктурисне биомиметске структуре у комбинацији са ласерском холографском литографијом. Фотофоретске особине тако генерисаних елемената су тестиране применом дигиталне холографске интерферометрије.

Циљеви за наредни период:

На уређају за детекцију невидљивог (инфрацрвеног) зрачења планирано је да се користи постојећа камера која подржава снимање са 180 снимака у секунди, како би се боље истражили брзи процеси у материјалима биолошког порекла. Радиће се и на смањивању габарита саме холографске апаратуре. Као детекциони елементи, користће се структуре које су генерисане системом за директно ласерско уписивање. Биће испитано дејство присуства карбонских нано-туба на осетљивост мерења. Софтвери ће бити унапређени у циљу боље, лакше и брже обраде снимљених холографских интерферограма, те прецизнијег позиционирања узорака и материјала у систему за директно ласерско уписивање. Биће коришћен систем за микроманипулацију честицама, како би добили уређени нивои детекционих елемената. Новонабављени систем за микродиспенсинг (микродистрибуцију флуида) ће бити употребљен за контролисану употребу минијатурних флуидних каљица, као елемената лабораторије на чипу.

Наставиће се истраживања у области квантне холографије и осликавања у оквиру недавно започетог Twinning пројекта са партнерима из Италије и Немачке. Планира се конструкција квантног уређаја и његова примена у микроскопском осликавању биолошких структура (ћелија и ткива).

1.10. Биофотоника и биомиметика (др Светлана Савић-Шевић, др Даница Павловић, др Бранислав Салатић, др Владимир Лазовић, Душан Грујић)

У досадашњим истраживањима коришћене су најсавременије микроскопске, спектроскопске и ласерске технике, за анализу и карактеризацију биолошких

материјала, структура, ћелија и ткива. У претходном периоду група је имала неколико истраживачких тема и остварила већи број сарадњи.

Проучаване су фотонске кутикуларне структура и структурна обојеност инсеката анализом морфолошких и оптичких карактеристика, физичких механизма који доводе до специфичних оптичких ефеката као и утврђивањем њихове улоге у биологији и екологији испитиваних врста. Део истраживања је усмерен на анализу улоге кутикуларних структура инсеката у инфрацрвеном (ИЦ) делу спектра, у циљу утврђивања размене топлоте инсеката са околином.

Проучавана је и објашњена структурна и пигментна обојеност мољца *Jordanita globulariae*. Показано је да конкавна, вишеслојна микро-огледала на крилима дају карактеристично обојење инсекта.

У истраживањима су коришћена електронска, оптичка као и нелинеарна флуоресцентна микроскопија за анализу морфолошких хитинских структура инсеката од значаја у таксономији. Сва поменута истраживања допринела су како на пољу биофотонике, где су откривене неке нове оптичке структуре, механизми продукције структурне обојености и потенцијални начини манипулације светлошћу, тако и на пољу ентомологије и екологије инсеката. Један од резултата ових истраживања је и откриће потпуно нових врста инсеката за науку и регион.

Осим фундаменталног значаја, наведена истраживања имају високу применљивост у области биомиметике и биоматеријала. Директним коришћењем или прављењем аналога, овакве структуре имају значајну улогу у технологији заштите докумената, производњи ИЦ детектора и различитих биосензора, војној индустрији или соларној енергетици. Реализована су два међународна пројекта са Републиком Немачком (институт DESY, Хамбург) и Народном Републиком Кином (Ђиао Тонг Универзитет у Шангају).

У периоду од 2020-2022 реализован је и ПРОМИС пројекат, који се бавио осликавањем хемоглобина у еритроцитима нелинеарном флуоресцентном микроскопијом. Циљ истраживања је било разумевање биолошке основе различитих поремећаја на нивоу еритроцита. Чланови лабораторије су тренутно ангажовани на два актуелна међународна пројекта: NATO „Science for Peace“ у сарадњи са Институтом за физику у Згребу, Хрватска и на међународном TWINNING пројекту у сарадњи са Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Италија и Friedrich Schiller University Jena, Немачка.

Циљеви за наредни период:

Група планира да настави започета истраживања у области биомиметике и биоматеријала испитивањем могућности директног коришћења или модификације природних биоматеријала (попут свиле свилене бубе и паукова, хитина и хитозана) који су од нарочитог значаја јер су нетоксични, биокомпатибилни и не загађују животну средину. Очекивани резултати су на пољу примене биоматеријала и имају изузетан значај у биомедицини, отварајући могућности за иновације нових био-уређаја попут

биоласера, микроскопичива, оптичких сензора, итд Лабораторија је конкурисала са два предлога пројекта на позиву Фонда за науку – ПРИЗМА.

У сарадњи са ИМГГИ наставиће се истраживање утицаја Алфа-1 антитрипсина на регенерацију репног пераја ембриона зебрице (*Danio rerio*). Анализира се формирање колагена коришћењем другог хармоника, нелинеарном флуоресцентном микроскопијом.

1.11. Програм истраживања: Динамика нелинеарних система (др Станко Николић)

У протеклом периоду смо се бавили проблемима из теоријске нелинеарне оптике и динамике нелинеарних система решавајући аналитички и нумерички нелинеарну Шредингерову једначину (НЛШЈ), као и друге једначине из проширене породице НЛШЈ. Радио је на изучавању различитих класа решења поменутих система, као што су Ахмедијеви бридери, Перегрин солитони и Кузњецов-Ма солитони. Циљ је проникнути у модулатиону нестабилност наведених једначина и пронаћи узроке за настанак циновских таласа у оптичким влакнима и на отвореном мору чије је постојање експериментално потврђено крајем двадесетог века. План у наредном периоду јесте даље проучавање оваквих система коришћењем других аналитичких метода и налажење услова за добијање жељених класа решења коришћењем метода машинског учења и дубоких неуралних мрежа. Др Николић је такође радио и на проблемима масивно паралелне флуоресцентне корелационе спектроскопије у којој се микроскопски узорак озрачује матрицом ласерских снопова. У експерименту се детектује флуоресценција из сваког фокалног елемента и потом мере фотонски одброји. Коришћењем методе аутокорелационе и кроскорелационе анализе, из ове велике базе података могу се израчунати дводимензионалне расподеле концентрација флуоресцентних молекула и дифузионих времена.

Циљеви за наредни период:

Планови за унапређење овог експеримента, који се изводи у сарадњи са Каролинска институтом у Стокхолму, јесте израда програма који извршавају нумеричке процедуре фитовања и користе дубоке неуралне мреже за даљу анализу података.

2. Лабораторија за биофизику

Руководилац: др Александар Крмпот, научни саветник

2.1. Програм истраживања: Испитивање фото(био)хемијских особина хемоглобина и осликавање необележених еритроцита (из BioPhysLab: Михајло Радмиловић, др Александар Крмпот, др Михаило Рабасовић; из других лабораторија: др Станко Николић, др Даница Павловић)

Извршена су спектроскопска и фотохемијска истраживања флуоресценције фотопродукта насталог у интеракцији хемоглобина и ултракратких ласерских импулса. Флуоресцентни фотопродукт је искоришћен за осликавање еритроцита без обележавања помоћу двофотонски побуђене флуоресценције као и за

директно ласерско исписивање микроструктура на слоју хемоглобина које остају флуоресцентне и након неколико месеци.

Циљеви за наредни период:

Даље испитивање фото(био)хемијских особина хемоглобина помоћу спектроскопије видљивој и THz области и развој метода за осликавање необележених еритроцита помоћу двофотонски побуђене флуоресценције у циљу дијагностике и превенције болести као и искоришћавања оптадне животињске крви за производњу носача за циљану испоруку лекова у људском организму. У оквиру ових истраживања очекује се одбрана једне докторске дисертације (Михајло Радмловић, студент биофотонике при БУ) као резултати конкурса за пројекат на позив из билатералне научне сарадње са Немачком код Министарства надлежног за науку.

2.2. Програм истраживања: Развој нових биомаркера заснованих на наночестицама ап конвертора (up converters) (из BioPhysLab: Миљана Пиљевић, др Михаило Рабасовић, др Александар Крмпот; из других лабораторија: др Марко Николић)

Развијене су ап конверторске наночестице и испитане су њихове флуоресцентне особине у условима дво- и једно-фотонске побуде у блиској инфрацрвеној области. Обележене су ћелије из културе и извршено је осликавање помоћу ласерске скенирајуће микроскопије.

Циљеви за наредни период:

Планирана је примена раувијених ап конверторских наночестица за дијагностику канцера и фотодинамичку терапију и њихова карактеризација помоћу техника нелинеарне оптичке микроскопије. Такође, планирана је и примена истих честица за осликавање помоћу супер резолуционе микроскопије која се развија у оквиру исте лабораторије. У оквиру ових истраживања очекују се резултати конкурса за пројекат из позива ПРИМЗМА код Фонда за науку.

2.3. Програм истраживања: *In vivo* осликавање и ћелијска хирургија кончастих гљива (из BioPhysLab: Марта Букумира, др Михаило Рабасовић, др Александар Крмпот; из других лабораторија: др Станко Николић, др Светлана Савић Шевић)

Извршено је осликавање необележених хифа гљиве *phycomyces blakesleeanus* у условима стреса помоћу микроскопије на трећем хармонику (Third Harmonic Generation microscopy), извршена је анализа слика напредним техникама (Image Correlation Spectroscopy) на основу чега је урађена квантификација липидних капи као показатеља промена у метаболизму липида. Такође, успешно је извршена и нано хирургија ћелијског зида, а даље су кроз хируршки рез урађена електрофизиолошких испитивања.

Циљеви за наредни период:

У даљем истраживању циљ је максимално експлоатисати успостављени протокол за ћелијску нано хирургију и окарактерисати што више јонских канала на плазмемембрани кончастих гљива, посебно оних које су од интереса у екологији. У том циљу ће бити изграђена јединствена апаратура на којој ће се радити и

осликавање са хириргијом и електрофизиоошка испитивања чиме би се решио главни уочени проблем у досадашњим истраживањима, превелико време између хирургије и електрофизиолошког мерења која су рађена на две одвојене апаратуре. У оквиру ових истраживања очеује се одбрана две докторске дисертације (Тања Пајић, студент биофотонике при БУ и Марта Букумира, студент Биофизике при БУ) као и резултати конкурса за пројекат из позива ЗЕЛЕНИ код Фонда за науку.

2.4. Програм истраживања: Примена микроскопије на другом хармонику (Second Harmonic Generation microscopy) за квантификацију неуређености влакна колагена у ткиву хуманог колона гљива (др Михаило Рабасовић, др Александар Крмпот)

Примењена је поларизационо зависна SHG микроскопија за осликавање колагена у хистопатолошким узорцима ткива хуманог колона. Уређеност влакан колагена је квантификована помоћу анализе добијених слика напредним техникама заснованим на Фуријеовој трансформацији. Уређеност колагенских влакана у ткиву хуманог колона је рађена са циљем ране дијагностике рака дебелог црева. Добијени резултати су били саставни део докторске дисертације Сање Деспотовић, одбрањене на Медицинском факултету Универзитета у Београду.

Циљеви за наредни период:

У даљем истраживању ће бити експлоатисана иста техника са проширењем на канцер ректума како би се установле прецизније дозе зрачења код пацијента на лечењу. Истраживања ће бити саставни део докторске дисертације Катарине Ерић, Медицински факултет, Београд.

2.5. Програм истраживања: Примена нелинеарних оптичких техника на осликавање зубног ткива (др Михаило Рабасовић, др Александар Крмпот)

Кобинацијом двофотонски побуђене флуоресцентне SHG микроскопије окарактерисана је дубина продирања зубних испуна у дентинске тубуле након третмана плазмом. Такође, обе врсте микроскопије су коришћене за карактеризацију механичких особина дентинског ткива, у комбинацији са Брилуеновом спектроскопијом.

Циљеви за наредни период:

У даљем истраживању ће се испитивати могућност примене фемтосекундних ласера за аблацију денталног ткива захваћеног каријесом као и осликавање након третмана. Истраживања ће се вршити као део пројекта из позива ПРИМЗМА код Фонда за науку.

2.6. Програм истраживања: Развој супер резолуционе микроскопије помоћу структурисаног осветљавања (structured illumination microscopy) (Алекса Денчевски, др Михаило Рабасовић, др Александар Крмпот)

Започет је развој прве прве супер резолуционе технике микроскопског осликавања код нас. Урађен је развој концепта, припрема неопходне техничке документације и набавка компоненти. Уређена су неопходна мерења и тестирања у току развоја. Направљене су дифракционе решетке помоћу микрофиломовања што затхева значајно нижа средства него за набавку комерцијално доступних.

Циљеви за наредни период:

Циљ је успоставити функционалну технику и експерименталну апаратуру која ће се касније користити у релевантним биолошким истраживањима, махом на узорцима који се припремају за конфокалну микроскопију. Првенстено ће техника бити коришћена за развој и карактеризацију ап конветорских обележивача описаних под 1.2. За почетак се планира рад у линераном режиму што побољшава резолуцију тачно два пута у односу на дифракционо ограничене технике, а касније и у нелинеарном режиму који омогућава још већа побољшања резолуције. Поменута истраживања ће бити саставни део докторске дисертације Алексе Денчевског, студент Биофизике при БУ.

2.7. Програм истраживања: Развој временски разложене квантитативне микроскопске методе засноване на флуоресцентној корелационој спектроскопији (Fluorescence correlation spectroscopy) (Јована Јелић, др Михаило Рабасовић, др Александар Крмпот)

Започет је развој флуоресцентне корелационе спектроскопије као прве методе са осетљивошћу на нивоу једног молекула (single molecule sensitivity) код нас за мерење броја молекула и њихових дифузионих особина. Урађен је развој концепта, припрема неопходне техничке документације и набавка компоненти. Уређена су неопходна мерења и тестирања у току развоја. Добијене су прве аутокорелационе криве.

Циљеви за наредни период:

Циљ је успоставити функционалну технику и експерименталну апаратуру која ће се касније користити у релевантним биолошким истраживањима. Из прва ће се мерити концентрација и дифузија обележених молекула у растоврима, да би се касније прешло на живе ћелије. У првој фази се планира надоградња за детекцију помоћу два детектора што ће додатно повећати временску резолуцију и могућност мерења изразито кратких временских процеса као што су карактеристична времена ротације молекула и разгруписавање фотона (photon anti-bunching) као основне особине извора светлости. У другој фази се планира увођење снопа уз фемтосекундног ласера што ће обезбедити могућност за мерења времена живота побуђених стања флуоресцентних молекула тзв Fluorescence Life Time Imaging –FLIM. Поменута истраживања ће бити саставни део докторске дисертације Јоване Јелић, студент Биофизике при БУ.

3. Лабораторија за спектроскопију плазме и ласере

Руководилац: др Миливоје Ивковић, научни саветник

Програм истраживања (др Миливоје Ивковић, др Ненад Сакан, др Биљана Станков, др Милица Винић, Иван Трапарић):

Принцип интерферометрије сопственог мешања сигнала ласерске диоде настављен је и испробан на случају ласерски индуковане плазме. Усавршен је и метод прорачуна оптичких карактеристика густих неидеалних плазми. Рад на теорији Штаркових проширења је настављен у сарадњи са Астрономском опсерваторијом у Београду и резултати су приказани у два рада публикована у

часопису International Astronomy and astrophysics Research Journal. Експериментално су проучавани облици спектралних линија берилијума, елемената од важности за фузиона истраживања. Мерења су вршена применом метода оптичке емисионе спектроскопије ласерски произведене плазме добијене интеракцијом ласерског зрачења са метом сачињеном од ВеО.

Обрађени су подаци добијени анализом уља применом спектроскопије ласерски индукованог пробоја. Ово представља наставак истраживања интеракције ласерског зрачења са танким филмовима уља ради дијагностиковања њиховог састава и побољшања детекције примеса, спроведеног у сарадњи са колегама из ЕНЕА Фраскати, Рим.

Циљеви за наредни период:

У плану је могућа сарадња у области наношења танких слојева ласером, као и дејства ласера велике енергије са материјом. Сарадња започета 2021. године са истраживачима са Физичког факултета је резултовала радом објављеним у часопису Neural Computing and Applications (NCAA) са импакт фактором 5.6. У наредном периоду планиран је даљи рад на овој теми. Такође, у оквиру докторске дисертације кандидата Ивана Трапарића рад ће бити проширен на анализу спектра ласерски индукованих плазми.

4. Лабораторија за фотоакустику

Руководилац: др Драган Маркушев, научни саветник

Програм истраживања (др Драган Маркушев, др Драган Лукић, др Драгана Маркушев, др Марица Поповић):

У претходном периоду развијани су теоријски и експериментални методи термалне карактеризације силицијума n-типа фотоакустиком. Развој је био базиран на класичним теоријским моделима, потпомогнут вештачким неуронским мрежама у оквирима надгледаног машинског учења.

Детаљном анализом класичних теоријских модела уочени су нови феномени тј. карактеристични обрасци понашања температурних расподела на површинама и унутар силицијума под дејством слободних носилаца (електрона и шипљина). Као последица тога фотоакустички сигнали и њихове компоненте добијају карактеристичне облике у фреквентном домену на основу којих се може лако препознати и успоставити граница између тзв. дебелих и танких узорака силицијума. Испоставља се да је поменута граница директно пропорционална дифузионој дужини слободних носилаца у силицијуму.

Применом вештачких неуронских мрежа у оквирима надгледаног машинског учења постигнуто је: а) побољшање и убрзање већ постојеће процедуре чишћења и корекције мерног сигнала услед утицаја коришћених инструмента у експерименту; б) побољшање и убрзање обраде коригованих сигнала у циљу прецизне и поуздане карактеризације испитиваног узорка; в) успостављање методологије провере валидности теоријског модела и експерименталне поставке. Извршена су и основна мерења и анализа двослојних узорака супстрат (силицијум) + танак филм (Fe_2O_3) и успостављене су границе детекције танких

филмова у домену неколико стотина нанометара уз препознавање морфологије самог филма.

Циљеви за наредни период:

У наредном периоду наставиће се са анализом класичних теоријских модела фотоакустике развојем нових метода карактеризације материјала (како полупроводника тако и метала) базираних на анализи свих компоненти, а посебно термоеластичне компоненте фотоакустичког сигнала, успостављањем електроакустичких аналогичности фотоакустике и пасивних RC и RLC филтера. Анализираће се и двослојни узорци класичним методама потпомогнутим неуронским мрежама са циљем померања границе детекције танких филмова ка домену од неколико десетина нанометара. Радиће се на успостављању методологије помоћу неуронских мрежа којом би се ускладио експериментални процес чишћења мерног сигнала и његове обраде у оквирима карактеризацији материјала. Истовремено ће се радити на применама неких алгоритама ненадгледаног машинског учења са циљем смањења броја експерименталних тачака и убрзања процеса фотоакустичких мерења. Посебна пажња биће усмерена на примену фотоакустике и машинског учења у настави у оквирима академских и струковних студија.

5. Лабораторија за нелинеарну фотонику

Руководилац: др Драгана Јовић Савић, научни саветник

Програм истраживања (др Драгана Јовић Савић, др Јадранка Васиљевић, Исидора Влаовић, Дамир Митић):

Истраживања су базирана на креирање различитих врста апериодичних супер решетки коришћењем технике мултипликације Матијеових зрака, а у циљу изучавања пропагације и локализације светлости у таквим решеткама у фоторефрактивним срединама као и потенцијалних примена. У претходном периоду, у оквиру сарадње са групом за Нелинеарну фотонику, Института за примењену физику, Универзитета у Минстеру, Немачка, показано је да поједине врсте Матијеових зрака у нелинеарном режиму могу произвести самоиндуковану дискретну дифракцију и то уз постепени прелаз из једнодимензионалног ка дводимензионалном систему. Резултати су публиковани у часопису *Optics Letters* 44, 1592 - 1595, (2019), као и у децембарском издању *OPTICS & PHOTONICS NEWS DECEMBER 2019*, 52 (2019).

Осим тога, креиране су различите врсте апериодичних супер решетки коришћењем технике мултипликације Матијеових зрака, а у циљу изучавања пропагације и локализације светлости у њима као и налажења потенцијалних примена. Исто тако разматран је и утицај нелинеарности на формирање одговарајућих структура, као и на локализацију светлости у оваквим условима. Резултати су публиковани у *Applied Physics Letters* 117, 041102-1 (2020).

У претходном периоду урађене су различите методе за креирање неуређених апериодичних фотонских решетки, а у циљу изучавања пропагације и локализације светлости у њима као и налажења потенцијалних примена.

Резултати су публиковани у Optics Letters 47, 702 (2022) и Optics Express 30, 7210 (2022).

Циљеви за наредни период:

Теоријско и експериментално истраживање недифрагујућих зрака као и њихове међусобне интеракције у фоторефрактивним материјалима, са посебним акцентом на потенцијалну примену ових зрака за прављење фотонских решетки. Пошто се очекује формирање детерминистичких апериодичних фотонских структура, у њима би се изучавало простирање и локализација светлости. Истраживање у наредном периоду би обухватило простирање комплексних недифрагујућих и непараксијалних убрзавајућих зрака, њихову интеракцију у разним срединама, примене за оптичке твизере као и генерисање комплексних фотоничних структура са различитим класама ових зрака или овако здружених зрака. Такође, изучавало би се простирање и локализација светлости у оваквим решеткама, као и вортексна стања у оваквим фотонским структурама. За потребе тог истраживања биће формиран код у неком од програмских језика (Фортран, MATLAB) како би омогућили формирање већег броја комплексних фотонских решетки које би даље испитивали. Такође циљ је и експериментално реализовати значајне нумеричке резултате.

6. Лабораторија за биомедицинске симулације

Руководилац: др Марија Радмиловић-Рађеновић, научни саветник

Програм истраживања (др Марија Радмиловић-Рађеновић, др Никола Бошковић):

Истраживања у лабораторији за биомедицинске симулације су посвећена развоју нумеричких модела базираних на методи коначних елемената који би се примењивали у биомедицини. Услед сложености модела и расположивих рачунарских ресурса већина постојећих нумеричких прорачуна заснива се на коришћењу дводимензионалних оносиметричних модела што је често далеко од стварности, указујући на важност постојања тродимензионалних модела. Развили смо тродимензионални модел за одређивање оптималних услова који обезбеђују минимално оштећење биолошког ткива током микроталасне аблације. Као резултат ових истраживања публиковано је 5 радова у водећим међународним часописима од којих издвајамо два рада у часопису Cancers са импакт фактором 6.575 и један у часопису Biomedicines са импакт фактором 6.081.

Циљеви за наредни период:

У току је развој методологије за решавање једначине преноса топлоте у временском домену, као и Хелмхолцове једначине за електромагнетно поље, које се користе за моделовање процеса који се одвијају у ткиву током микроталасне аблације, третмана који је веома значајан за отклањање тумора. Наиме, показало се да за сваки тумор, понаособ, постоје оптимални параметри (улазна снага, време аблације, итд.) који би омогућили што ефикаснији аблативни третман, уз

отклањање целокупног туморалног ткива и минимално оштећење здравог ткива. Имајући у виду да се развој модела ткива применом методе коначних елемената одвија у више корака, укључујући дефинисање геометрије, постављање граничних услова, генерисање мреже, итд.

Осим микроталасне аблације, у плану је моделовање других модалитета електрохируршке процедуре као што су радиофреквентна аблација и дијатермија како би софтверски пакет био комплетиран. Један од важнијих циљева је развој софтверског пакета који ће бити једноставан за употребу и корисницима који не познају методологију моделовања као што су хирурзи,

7. Лабораторију за ласерску интеракцију са материјалима и ласере

Руководилац: др Александер Ковачевић, виши научни сарадник

Програм истраживања (др Александер Ковачевић, Бранислав Салатић):

У циљу истраживања процеса који се догађају приликом интеракције ултракратких снопова са материјалима, обављени су експерименти где су вишеслојни танки метални филмови подвргнути фемтосекундним сноповима разних таласних дужина. За узорке састављене од пет двослоја алуминијума и титана је установљено је да се појављују две врсте паралелних структура, једне у виду надоградње на површину, и друге, у виду аблативних јама.

Урађена је и микроскопија помоћу микроскопа атомских сила (ен. atomic force microscope, AFM). На том микроскопу је измерена струја кроз узорак и установљено да структуре у виду надоградње имају повећану отпорност у односу на околину која није била под интеракцијом фемтосекундног снопа. Наметнуо се закључак да су структуре у виду надоградње оксиди, првенствено алуминијума. Обе врсте структура зависе од правца поларизације упадног снопа; једне су паралелне са правцем, а друге су ортогоналне на правац.

Обављана су истраживања и теоријска разматрања интеракције ултракратких ласерских импулса са танким вишеслојним материјалима у разним експерименталним условима, као и фотонске структуре и термални ефекти на различитим материјалима изазвани деловањем ласерског зрачења, коришћењем методе коначних елемената (FEM). Истраживања су била кроз сарадњу са колегама из Института за нуклеарне науке „Винча“ и Технолошко-металуршког факултета у Београду. Материјали који су коришћени у узорцима су били вишеслојни танки филмови титанијума и цирконијума.

Циљеви за наредни период:

Вршиће се експерименти интеракције ултракратких ласерских снопова са танким слојевима металних филмова под различитим условима узорка и амбијента, да би се видео њихов утицај на настајање ласерски индукованих периодичних структура. Обављаће се спектроскопија генерације другог хармоника на биолошким материјалима.

Поред експерименталног рада интензивно ће се радити и на теоријском моделу базираног на ФЕМ, који описује интеракцију ултракратких ласерских снопова са вишеслојним системима. Утицај ласерски генерисаних наноструктура на биолошке микроорганизме ће се истраживати експериментално са становишта примене у медицини. Вршиће се експерименти пропагације ласерских снопова (континуални, ултракратки) кроз суспензије биолошких и неорганичких материјала и истраживања у оквиру биофотонице и вештачке интелигенције: зависност ефикасности модела биолошког визуелног система од архитектуре неуронске мреже која му је придодата ради обраде сигнала. У оквиру овог истраживања је предвиђено истраживање на тему конструисања оптоелектронске неуронске мреже.

8. Лабораторија за физику материјала под екстремним условима

Руководилац: др Марко Николић, виши научни сарадник

Програм истраживања (др Марко Николић):

У претходном периоду рађено је на луминесцентних материјала допираних јонима Ретких земаља. Рађена је карактеризација материјала оптичким мерењима. Испитивање луминесцентних температурских сензора на бази Ретких земаља. Примена ових материјала у биолошким узоцима. Испитивање понашања материјала допираних јонима Ретких земаља на високим притисцима. Испитивање карактеристика луминесцентних материјала који раде као ул-конвертори(up-convertor).

Циљеви за наредни период:

У наредном периоду радиће се на добијању наночестица допираних јонима Ретких земаља. Добијање трансlucentних и транспарентних керамика синтерованем добијених нанопрахова на високој температури. Карактеризација материјала мерења транспарентности, мерења луминесцентних спектра. Испитивање оптичких особина на високом притиску и високим температурама. Испитивање могућности примене добијених материјала: за сензоре притиска и температуре базиране на промени луминесценције, за нове ласерске материјале, као и за добијање танких филмова методом ласерске депозиције.