

Број 920-30
10.06 2024 год.
БЕОГРАД

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Филипа Крајинића.

Одлуком Наставно научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 920-29 од 14.5.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Филипа Крајинића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме “Квантна холографија за осликавање објекта у средној инфрацрвеној области спектра без детекције интерагујућих фотона” (енг. “*Quantum holography for object imaging in mid infrared spectrum with undetected photons*”).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Филип Крајинић је рођен 03.10.1997. године у Београду. Завршио је основну школу „Бора Станковић” у Београду као вуковац. Уписао је Четврту гимназију у Београду, коју је завршио са одличним успехом 2016. године. Исте године уписао је Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Дипломирао је на одсеку за Физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, 2020. године са просечном оценом 9,11. Дипломски рад, са називом „Холографско испитивање Фарадејевог ефекта”, је радио под менторством проф. др Пеђе Михаиловића и одбранио је у јулу 2020. године са оценом 10. Добитник је награде за најбољи дипломски рад на такмичењу ETF BAFA U.S.A. Мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу за Наноелектронику и фотонику, уписао је у октобру 2020. године. Положио је све испите са просечном оценом 10. Мастер рад, са називом „Мерење поларизације светлости помоћу дигиталне холографије са симетричним референтним сноповима”, је радио под менторством проф. др Пеђе Михаиловића и одбранио је у септембру 2021. године са оценом 10. У октобру 2021. године уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу за Наноелектронику и фотонику. Исте године 30. новембра на седници Научног већа Института за физику стиче звање истраживач приправник. Од 2. децембра 2021. године је запослен у Институту за физику универзитета у Београду, при лабораторији за квантну биофотонику. Положио је све предвиђене испите по наставном плану докторских студија са просечном оценом 10.

Током основних студија је био ангажован као студент демонстратор при извођењу лабораторијских вежби на предмету Практикум из конструисања електронских уређаја на одсеку за Физичку електронику.

У мају 2020. године је стекао сертификат *NI Certified LabVIEW Associate Developer* компаније *National Instruments* у трајању од две године.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

У октобру 2021. године уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, на модулу за Наноелектронику и фотонику. Исте године 30. новембра на седници Научног већа Института за физику стиче звање истраживач приправник. Од 2. децембра 2021. године је запослен у Институту за физику Универзитета у Београду, при лабораторији за квантну биофотонику. Током прве године докторских академских студија предмете које је кандидат слушао су Фуријеова оптика, Моделовање полупроводничких ласера, Оптиелектронске мерне методе и Пројектовање интегрисаних кола, док је током друге године слушао предмете Квантна оптика, Нелинеарна оптика и Оптичке особине полупроводничких хетероструктура. Положио је све предвиђене испите по наставном плану докторских студија са просечном оценом 10. Од октобра 2022. године кандидат је укључен на *Horizon Europe Twinning* пројекат, *BioQantSense, Twinning for excellence of the Serbian Research Center for quantum biophotonics*, финансирам од стране Еврокспе уније. На конференцији *16th Photonics Workshop 2023* има предавање као коаутор [2]. У априлу 2023. године је објављен рад [1]. У следећој години у јануару је прихваћен патент [4] од стране Завода за интелектуалну својину Републике Србије. У марту 2024. године држи предавање [3] на конференцији *17th Photonics Workshop 2024*. У априлу исте године подноси Захтев за пријаву теме докторске дисертације са насловом „Квантна холографија за осликавање објекта у средњој инфрацрвеној области спектра без детекције интерагујућих фотона“ (енгл. „*Quantum holography for object imaging in mid infrared spectrum with undetected photons*“), под менторством др Бранислава Јеленковића, научног саветника и дописног члана САНУ. 14. маја је прихваћен Захтев за пријаву теме докторске дисертације.

Радови у часописима са SCI листе:

- [1] P. Atanasijevic, D. Grujic, F. Krajinic, P. Mihailovic, and D. Pantelic, “Characterization of a bioderived imaging sensor based on a Morpho butterfly’s wing,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 159, p. 108919, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2022.108919.

Радови са међународних конференција:

- [2] P. Atanasijevic, F. Krajinic, P. Mihailovic, and D. Pantelic, “Thermoelectric temperature control of Morpho butterfly wings used for radiation sensing,” *16th Photonics Workshop*, 2023.
- [3] F. Krajinić, P. Atanasijevic, and P. Mihailovic, “Optical system for magnetic field spatial distribution measurement using digital holography,” *17th Photonics Workshop*, 2024.

Патенти:

- [4] П. Атанасијевић, Ф. Крајинић, and П. Михаиловић, “Сензор за мерење магнетског поља одређивањем Фарадејевог ефекта помоћу дигиталне холографије.” 2024, [Online]. Available: <https://reg.zis.gov.rs/patreg/?t=p>.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада и оствареног искуства види се да је Филип Крајинић школован у области оптике, квантне механике и фотонских

компоненти и система. Имајући у виду и раније школовање, експериментални рад којим се бавио као и награду за најбољи дипломски рад сматрамо да је Филип Крајинић способан кандидат за рад на предложеној теми докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања предложене докторске дисертације је реализација функционалног оптичког система који ће имати улогу квантног холографског микроскопа за осликавање узорака у инфрацрвеном делу спектра. Осликавање узорака ће се постићи техникама осликавања помоћу недетектујућих фотона (*Imaging with Undetected Photons*). Техника омогућава осветљавање узорка фотонима у инфрацрвеном делу спектра, а детектовање корисне информације фотонима у видљивом или блиском инфрацрвеном делу спектра. Применом техника дигиталне холографије реконструисаће се амплитудна и фазна слика узорка од интереса. Поставка нелинеарног холографског микроскопа биће карактеризована.

Оптичка микроскопија и спектроскопија представљају важан алат у различитим дисциплинама, почевши од фундаменталних истраживања у физици, биологији, хемији, па до апликативних истраживања у медицини, ветерини, инжињерству, екологији... Инфрацрвени део спектра је од нарочитог интереса јер се у истом могу регистровати апсорпциони спектри карактеристични за идентификацију већине молекула, такозван *fingerprint* регион [1]-[5]. Упркос великој потражњи извора и детектора у инфрацрвеном делу спектра, њихова реализација је могућа али не представљају идеална решења. Такви уређаји захтевају сложене системе фабрикације, криогено хлађење, имају високу цену, а перформансе су им далеко лошије од стандардних комерцијалних уређаја који раде у видљивом и блиском инфрацрвеном делу спектра, поготово ако је потребно да се ради илуминација узорка са веома ниским снагама тако да не дође до оштећења узорка. *Mandel* и његова група [6], а касније и *Zeilinger* са својом групом [7], су експериментално демонстрирали технику формирања слике узорка у који је осветљен фотонима једне таласне дужине, детекцијом фотона друге таласне дужине који нису интераговали са узорком. Такозвана техника квантног осликавања помоћу недетектујућих фотона (*Quantum Imaging with Undetected Photons*) у којој се нелинеарним ефектом другог реда спонтане параметријске конверзија (*Spontaneous Parametric Down-Conversion*) од једног фотона пумпе може креирати недегенерисан пар фотона две различите таласне дужине, такав да један фотон, често назван ајдлер (*idler*) или проба, интерагује са узорком, а на другом фотону, често названим сигналим, се врши детекција. Фотони у генерисаном пару поседују просторну и временску корелацију, и увезани су по импулсу и енергији. Предност овакве технике је у томе што се може проширити спектрални опсег за посматрање узорака у инфрацрвеном делу спектра, а такође искористити веома развијена технологија детектора у видљивом или блиском инфрацрвеном делу спектра. Овај резултат је отворио врата ка даљем истраживању у области квантног осликавања широког поља применом кристала *ppKTP* (*periodically poled potassium titanyl phosphate*) ради осликавања узорка на таласној дужини 3.7 μm [8], на 910 nm [9], на подесивој таласној дужини од 3.4 μm до 4.3 μm [10], применом кристала *ppLN* (*periodically poled lithium niobate*) ради осликавања узорка на таласној дужини 1.55 μm [11], на подесивој таласној дужини од 1.45 μm до 2.16 μm [12], сканирајућих квантних микроскопа применом кристала *ppKTP* ради осликавања узорка на таласној дужини 1.345 μm [13], квантне спектроскопије применом кристала *LN* (*lithium niobate*) ради мерења спектра у опсегу од 4.1 μm до 4.24 μm [14], применом кристала *ppLN* ради мерења спектра у терахерцном опсегу [15], оптичке кохерентне томографије [16]. Претходно споменута истраживања су ограничена на спектрални опсег испод 5 μm услед велике апсорпције ајдлер фотона унутар нелинеарних оптичких кристала. Из тог разлога почиње да се користи нелинеарни кристал *AGS* (*silver gallium sulfide*) који проширује област у инфрацрвеном делу спектра [17],

омогућујући спектроскопију у опсегу од 7.4 μm до 8.4 μm [18]. Ради добијања квантитативних резултата у микроскопији углавном се примењивала *Phase Shifting Holography*, која подразумева уношењем фазне промене транслацијом једног огледала микроскопа. Таква техника захтева компјутерски контролисан систем који може синхронно да помера елементе поставке и да врши аквизицију серије слика ради формирања јединствене слике узорка.

Циљ истраживања предложене докторске дисертације је реализација квантног холографског микроскопа имплементацијом одговарајућег нелинеарног интерферометра зарад осликавања узорака у инфрацрвеном делу спектра без детекције интерагујућих фотона.

Успешна реализација нелинеарног холографског микроскопа представља ефикасно решење недеструктивног осликавања узорака у инфрацрвеном делу спектра, што отвара врата даљим истраживањима у области биологије, хемије, медицине, ветерине, и представља значај истраживања предложене докторске дисертације.

Литература

- [1] R. H. Wilson, K. P. Nadeau, F. B. Jaworski, B. J. Tromberg, and A. J. Durkin, "Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization.," *J. Biomed. Opt.*, vol. 20, no. 3, p. 30901, Mar. 2015, doi: 10.1117/1.JBO.20.3.030901.
- [2] S. Golovynskyi *et al.*, "Optical windows for head tissues in near-infrared and short-wave infrared regions: Approaching transcranial light applications.," *J. Biophotonics*, vol. 11, no. 12, p. e201800141, Dec. 2018, doi: 10.1002/jbio.201800141.
- [3] G. Bellisola and C. Sorio, "Infrared spectroscopy and microscopy in cancer research and diagnosis.," *Am. J. Cancer Res.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–21, 2012.
- [4] S. A. Filatova, I. A. Shcherbakov, and V. B. Tsvetkov, "Optical properties of animal tissues in the wavelength range from 350 to 2600 nm.," *J. Biomed. Opt.*, vol. 22, no. 3, p. 35009, Mar. 2017, doi: 10.1117/1.JBO.22.3.035009.
- [5] V. Shapaval, A. Deniset-Besseau, D. Dubava, S. Dzurendova, J. Heitmann Solheim, and A. Kohler, "Multiscale spectroscopic analysis of lipids in dimorphic and oleaginous *Mucor circinelloides* accommodate sustainable targeted lipid production.," *Fungal Biol. Biotechnol.*, vol. 10, no. 1, p. 2, 2023, doi: 10.1186/s40694-023-00148-z.
- [6] L. J. Wang, X. Y. Zou, and L. Mandel, "Induced coherence without induced emission," *Phys. Rev. A*, vol. 44, no. 7, pp. 4614–4622, 1991, doi: 10.1103/PhysRevA.44.4614.
- [7] G. B. Lemos, V. Borish, G. D. Cole, S. Ramelow, R. Lapkiewicz, and A. Zeilinger, "Quantum imaging with undetected photons.," *Nature*, vol. 512, no. 7515, pp. 409–412, Aug. 2014, doi: 10.1038/nature13586.
- [8] I. Kviatkovsky, H. M. Chrzanowski, and S. Ramelow, "Mid-infrared microscopy via position correlations of undetected photons," *Opt. Express*, vol. 30, no. 4, pp. 5916–5925, Feb. 2022, doi: 10.1364/OE.440534.
- [9] S. Töpfer, M. G. Basset, J. Fuenzalida, F. Steinlechner, J. P. Torres, and M. Gräfe, "Quantum holography with undetected light," *Sci. Adv.*, vol. 8, no. 2, p. eabl4301, 2022, doi: 10.1126/sciadv.abl4301.
- [10] I. Kviatkovsky, H. M. Chrzanowski, E. G. Avery, H. Bartolomaeus, and S. Ramelow, "Microscopy with undetected photons in the mid-infrared," *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 42, p. eabd0264, 2020, doi: 10.1126/sciadv.abd0264.
- [11] A. V. Paterova, H. Yang, Z. S. D. Toa, and L. A. Krivitsky, "Quantum imaging for the semiconductor industry," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 117, no. 5, p. 54004, 2020, doi: 10.1063/5.0015614.
- [12] E. Pearce *et al.*, "Practical quantum imaging with undetected photons," *Opt. Contin.*, vol. 2,

- no. 11, pp. 2386–2397, Nov. 2023, doi: 10.1364/OPTCON.507154.
- [13] A. Búzás, E. K. Wolff, M. G. Benedict, P. Ormos, and A. Dér, “Biological Microscopy with Undetected Photons,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107539–107548, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000740.
 - [14] A. Paterova, S. Lung, D. A. Kalashnikov, and L. A. Krivitsky, “Nonlinear infrared spectroscopy free from spectral selection,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 42608, 2017, doi: 10.1038/srep42608.
 - [15] M. Kutas, B. Haase, J. Klier, D. Molter, and G. von Freymann, “Quantum-inspired terahertz spectroscopy with visible photons,” *Optica*, vol. 8, no. 4, pp. 438–441, Apr. 2021, doi: 10.1364/OPTICA.415627.
 - [16] A. V Paterova, H. Yang, C. An, D. A. Kalashnikov, and L. A. Krivitsky, “Tunable optical coherence tomography in the infrared range using visible photons,” *Quantum Sci. Technol.*, vol. 3, no. 2, p. 25008, Apr. 2018, doi: 10.1088/2058-9565/aab567.
 - [17] M. Kumar, P. Kumar, A. Vega, M. A. Weissflog, T. Pertsch, and F. Setzpfandt, “Mid-infrared photon pair generation in AgGaS₂,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 119, no. 24, p. 244001, 2021, doi: 10.1063/5.0074054.
 - [18] A. V Paterova, Z. S. D. Toa, H. Yang, and L. A. Krivitsky, “Broadband Quantum Spectroscopy at the Fingerprint Mid-Infrared Region,” *ACS Photonics*, vol. 9, no. 6, pp. 2151–2159, Jun. 2022, doi: 10.1021/acsp Photonics.2c00464.

3. Полазне хипотезе

Предложено истраживање ће почети од следећих хипотеза:

- Оптичким пумпањем нелинеарног кристала се генеришу парови сигнал- ајдлер фотона различитих таласних дужина применом *SPDC* процеса нелинеарне оптике другог реда.
- Ајдлер фотони новонасталог пара фотона ће интераговати са узорком чије се информација може уписати у амплитуду или фазу ајдлер фотона, док се детекција те информације врши сигналним фотонима који никада нису директно интераговали са узорком.
- Информаија о узорку од ајдлер фотона уписује у сигналне фотоне услед феномена индуковане кохеренције.
- Формирана слика холограма у равни камере се може реконструисати техникама дигиталне холографије како би се добила амплитудна и фазна слика узорка.

4. Научне методе истраживања

У оквиру предложене докторске дисертације биће:

- теоретски анализиран нелинеарни процес *SPDC* као извора парова фотона који представљају основу функционалности нелинеарног холографског микроскопа;
- нумерички симулиран нелинеарни процес *SPDC*;
- експериментално верификовани резултати нумеричке симулације нелинеарног процеса *SPDC*;
- реализована експериментална поставка нелинеарног холографског микроскопа;
- развијени програмски кодови за реконструкцију амплитудних и фазних слика објеката од интереса;
- карактеризација перформанси нелинеарног холографског микроскопа.

5. Очекивани научни допринос

У оквиру предложене докторске дисертације:

- по први пут ће се реализовати нелинеарни холографски микроскоп применом техника недетектујућих фотона са нелинеарним кристалом *AGS*;
- продужиће се спектрална област ради осликавања узорка на таласним дужинама преко 5 μm ;
- скратиће се потребно време аквизиције слике ради формирања квантитативних резултата амплитудних и фазних слика узорака применом техника дигиталне холографије;
- скраћивањем времена аквизиције слике омогућује се праћење динамичких промена у узорцима.

6. План истраживања и структура рада

Планирано истраживање ће почети са детаљним прегледом литературе везане за микроскопију и спектроскопију у инфрацрвеном делу спектра, примену различитих квантних техника у микроскопији и спектроскопији, теоријску анализу *SPDC* процеса и различите интерферометријске и холографске технике.

Наредни корак ће подразумевати обуку кандидата у области нелинеарне и квантне оптике ради реализације извора фотона у инфрацрвеном делу спектра. Кандидат ће бити упознат са постојећим експериментима квантне интерферометрије применом техника недетектујућих фотона ради стицања потребног експерименталног искуства зарад конструисања новог система.

На почетку истраживања кандидат ће се бавити теоријским описивањем модела *SPDC* процеса, нумеричким симулацијама истог и експерименталном валидацијом резултата симулација.

Након карактеризације парова фотона насталим *SPDC* процесом, следећа фаза ће бити реализација оптичке поставке која ће имати улогу нелинеарног холографског микроскопа. Применом различитих интерферометријских и холографских техника радиће се на усавршавању перформанса нелинеарног холографског микроскопа. Ради формирања амплитудних и фазних слика узорка биће потребно посветити се и писању програмских кодова за аквизицију и реконструкцију слике.

Последња фаза предложеног плана истраживања ће бити приказ резултата у форми докторске дисертације.

7. Закључак и предлог

На основу свега изложеног сматрамо да је кандидат Филип Крајинић подобан кандидат за реализацију предвиђених циљева истраживања. Предложена тема под називом „Квантна холографија за осликавање објекта у средној инфрацрвеној области спектра без детекције интерагујућих фотона“ (енг. „*Quantum holography for object imaging in mid infrared spectrum with undetected photons*“) је подобна, веома актуелна и имаће примену у реализацији нових техника микроскопије.

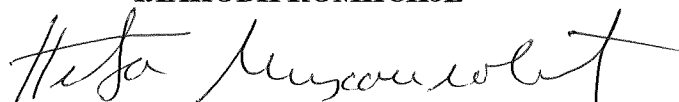
Комисија констатује да предложена тема припада ужој научној области Физичка електроника и да је Електротехнички факултет у Београду матичан за ову научну област те за ментора израде докторске дисертације предлаже др Бранислава Јеленковића, научног саветника и дописног члана САНУ. Уз извештај се прилаже и списак радова др Бранислава Јеленковића који га квалификују за ментора.

Комисија предлаже Научно наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Филипу Крајинићу одобри израду докторске дисертације на тему: „Квантна холографија за осликавање објекта у средној инфрацрвеној области спектра без детекције интерагујућих фотона“ (енг. „*Quantum holography for object imaging in mid infrared spectrum with undetected photons*“).

Дисертација ће бити написана на енглеском језику.

Датум 6.6.2024. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Пеђа Михаиловић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
(председник комисије)



др Душан Арсеновић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за физику
(члан комисије који није запослен на ЕТФ-у)



др Ана Гавровска, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет