

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо 24.06.2020, на VII седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одређени за комисију за преглед и оцену докторске дисертације "Примена неуронских мрежа у фотоакустичкој анализи силицијума *n*-типа у фреквентном домену" (Application of Neural Networks in Photoacoustic Analysis of *n*-type silicon in Frequency Domain) из научне области Физика кондензованог стања, коју је кандидат Катарина Ђорђевић, магистар физике предала Физичком факултету у Београду, подносимо следећи:

РЕФЕРАТ

1. Основни подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Катарина Ђорђевић је рођена 03.05.1971 у Нишу. Завршила је гимназију „Светозар Марковић“ након које је уписала студије Опште физике на Филозофском факултету Универзитета у Нишу. Дипломирала је 1997-е године са просечном оценом 9.31 одбраном дипломског рада „Фазни прелази He3 и He4“. Магистарске студије је уписала на Физичком факултету Универзитета у Београду на смеру Физика кондензованог стања где је одбранила магистарску тезу под називом “Статистка разгранатих полимера на једној класи хијерархијских решетки“ под менторством проф.др Милана Кнежевића 2009.-е године. Докторске студије на Физичком факултету из области физике кондензованог стања је уписала 2017, а јуна 2018. године одбранила је тему дисертације пред Колегијумом докторских студија. На деветој седници Изборног и Наставно-научног већа Физичког факултета, одржане 12.09.2018, одређена је Комисија за оцену испуњености услова и оправданост предложене теме. На следећој, десетој седници истог већа, одржаној 24.10.2018, усвојен је Извештај Комисије за оцену испуњености услова и оправданост предложене теме "Примена неуронских мрежа у фотоакустичкој анализи силицијума *n*-типа у фреквентном домену". Као ментор одређен је др Драган Маркушев, научни саветник Института за физику, Земун-Београд, Универзитета у Београду.

1.2. Научна активност

Области истраживања Катарине Ђорђевић су: физика кондензованог стања, полупроводници, фототермални ефекти, нерадијативни процеси трансфера енергије, интеракције светлости и материје, фотоакустика, вештачка интелигенција, машинско учење. У оквиру тога посебно се истичу њена истраживања у примени неуронских мрежа за обраду експерименталних резултата фотоакустике и за инверзно решавање фотоакустичког проблема. Докторска дисертација је урађена у Лабораторији за фотоакустику Института за физику у Земуну чији је руководилац др Драган Маркушев, у сарадњи са групом за фотоакустику др Слободанке Галовић, научним саветником ИНН

Винча Универзитета у Београду. Посебна пажња дата је развоју модела неуронских мрежа фотоакустике и њиховој оптимизацији у сарадњи са др Жарком Ђојбашићем, редовним професором Машинског факултета, Универзитета у Нишу.

До сада је објавила 6 радова у међународним часописима и 8 конференцијских, од којих су 4 објављена у часописима са импакт фактором већим од 1, који су директно вазани за резултате докторске дисертације. Сви радови у међународним часописима објављени су од краја 2019. до средине 2020. године.

2. Опис докторске дисертације

2.1. Основни подаци

Дисертација је урађена под руководством др Драгана Маркушева, научног саветника Института за физику Универзитета у Београду. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење изработом докторске дисертације и аутор је великог броја радова који су објављени у међународним часописима из области фотоакустике, фотоакустике полупроводника и примене неуронских мрежа.

Докторска дисертација „Примена неуронских мрежа у фотоакустичкој анализи силицијума n-типа у фреквентном домену” Катарине Ђорђевић има 101 страну и садржи пет поглавља, 49 слика, 12 табела и 115 референци.

2.2. Предмет и циљ докторске дисертације

Област истраживања ове докторске дисертације је физика кондензованог стања, ужа област фотоакустика полупроводника. Развојане су нове методологије обраде експерименталних резултата фотоакустике неуронским мрежама обучених познатим теоријским моделима, са циљем ефикасне карактеризације полупроводника. Као типичан пример полупроводника у широкој употреби анализиран је силицијум n-типа, а фотоакустика је изабрана као неструктивна метода која може послужити за карактеризацију топлотних, еластичних, оптичких и електронских својстава силицијумских узорака.

Предмет истраживања ове тезе јесте развој и примена вештачке интелигенције, машинског учења и неуронских мрежа у инверзном решавању фотоакустичког проблема: проналажење узрока (ефеката) на основу последица (експериментално добијених података) са циљем превазилажења следећих проблема: времена које је потребно за процес прикупљања експерименталних података у фотоакустици, времена потребног за инверзно решавање фотоакустичког проблема, повећања броја параметара којим се, фотоакустиком, одређују различита својства материјала и повећање тачности измерених параметара.

Крајњи циљ је успоставити нову методологију којом се обезбеђује да експериментални уређаји обрађују резултате у реалном времену, на начин који омогућава брзу карактеризацију материјала, посебно полупроводничких. Да би се тај циљ остварио

потребно је успоставити одређене методе оптималног коришћења неуронских мрежа помоћу надгледаног учења, јер су мреже конкурентне било којој методи фитовања.

2.3. Садржај и резултати

Дисертација је подељена у пет поглавља.

У првом, уводном поглављу је дата јасна мотивација тезе: потреба за развојем тачне, прецизне и поуздане технике за решавање инверзног фотоакустичког проблема, којом се може истовремено одредити више физичких својстава полупроводника у реалном времену. Истакнуто је да досадашње искуство упућује на развој и примену неуронских мрежа у те сврхе. Наглашена је важност карактеризације силицијума због њихове широке примене у наноелектроници, фотоници и испитивању танких слојева, због чега су развој и примена неуронских мрежа у овом раду усмерени баш на карактеризацију допираних узорака силицијума.

У другом поглављу је укратко објашњена фотоакустичка фреквентна метода. Дат је опис отворене фотоакустичке ћелије и инструменталне поставке за мерење фреквентног фотоакустичког сигнала. Објашњена је теорија обраде експерименталних сигнала и начина анализе инструменталне дисторзије. Након тога је приказан теоријско симулациони модел који описује све најважније физичке процесе у полупроводнику изложеном дејству монохроматске електромагнетне побуде а који доводе до акустичког сигнала који снима микрофон. Теоријски модел је анализиран и на основу спроведене анализе створен је концепт неуронске мреже и начина њеног обучавања са циљем карактеризације топлотне дифузивности, коефицијента линеарног ширења полупроводника и прецизног одређивања његове дебљине.

У трећем поглављу је дат теоријски резултат: приказане су развијене неуронске мреже намењене карактеризацији полупроводника. Пре тога су у уводном делу поглавља изложени основни принципи формирања неуронских мрежа, њихове обуке и тестирања. На крају су дискутовани методи оптимизације развијених неуронских мрежа за њихову примену у фотоакустичкој карактеризацији полупроводника.

У поглављу четири дат је приказ резултата примене развијених неуронских мрежа у карактеризацији силицијума на основу експериментално мерених фотоакустичких фреквентних одзива. Дискутована је њихова тачност и поузданост, као и брзина обраде експерименталних података. На основу разлике мрежних предикција и литературних података одређиване су оптичке карактеристике извора побуде и стања површина испитаних узорка. На крају је додавањем различитог нивоа шума оптимизована база улазних података неуронске мреже како би се што више прилагодила за рад са експерименталним фотоакустичким одзивом.

У поглављу пет дата су закључна разматрања, као и предложени правци будућих истраживања.

2.3. Публикације

Радови у међународним часописима (импакт фактор >1) везаних за докторску дисертацију:

[A1] K. Lj. Djordjevic , D. D. Markushev, Ž. M. Čojbašić, et al. Photoacoustic Measurements of the Thermal and Elastic Properties of n-Type Silicon Using Neural Networks, *Silicon* 12, 1289–1300 (2020) [doi:10.1007/s12633-019-00213-6](https://doi.org/10.1007/s12633-019-00213-6)

[A2] K. Lj. Djordjevic, D. D. Markushev, Ž. M. Čojbašić, S. P. Galović, Inverse problem solving in semiconductor photoacoustics by neural networks, *Inverse Problems in Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1080/17415977.2020.1787405>.

[A3] K. Lj. Djordjevic, S. P. Galovic, M. I. Jordovic-Pavlovic, M.I. et al. Photoacoustic optical semiconductor characterization based on machine learning and reverse-back procedure. *Optical and Quantum Electronics* 52, 247 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02373-x>

[A4] K. Lj. Djordjevic, S. P. Galovic, M. I. Jordovic-Pavlovic, Z. M. Cojbasic, D. D. Markushev, Improvement of Neural Networks Applied to Photoacoustic Signals of Semiconductors With Added Noise, *Silicon*, accepted*.

* minor revision

2.4. Преглед научних резултата изложених у тези

Најважнији научни резултати докторске дисертације се налазе у Поглављима 4.1., 4.2., 4.3., 4.4. и 4.5. Резултати приказани у овим поглављима представљају више научних доприноса који се највише огледају у следећем:

а) Развијен је најједноставнији модел неуронске мреже који се показао као веома ефикасан у карактеризацији силицијумских узорака дајући врло прецизне и поуздане предикције тражених топлотних, оптичких и механичких параметара у реалном времену - много брже од било које друге методе фитовања [A1].

б) За разлику од стандардног приступа формирању неуронских мрежа, развијен је посебан приступ њене обуке, на великом сету теоријских података заснованих на моделима у оквиру фотоакустике. Оптимизацијом улазних и излазних вектора кроз нормализацију, секвенцијалност тј. строги распоред улазних тачака, и додавањем различитог нивоа шума постигнута је велика прецизност и поузданост у предикцији параметара узорака [A1,A2,A4].

в) Показано је да се применом овако обучених неуронских мрежа може контролисати рад експерименталне поставке прецизном анализом улазних параметара везаних за оптичке карактеристике извора побуде и испитиваног узорка [A3].

г) Показано је да овакав начин обуке и оптимизације неуронских мрежа може указивати на слабости теоријског модела фотоакустике кроз анализу грешака излазних параметара неуронских мрежа, што може указати на правце даљег развоја модела [A4].

3. Публикације кандидата

Међународни часописи:

А Радови у међународним часописима:

[A1] K. Lj. Djordjevic , D. D. Markushev, Ž. M. Čojbašić, et al. Photoacoustic Measurements of the Thermal and Elastic Properties of n-Type Silicon Using Neural Networks, *Silicon* 12, 1289–1300 (2020) [doi:10.1007/s12633-019-00213-6](https://doi.org/10.1007/s12633-019-00213-6)

- [A2] K. Lj. Djordjevic, D. D. Markushev, Ž. M. Čojbašić, S. P. Galović, Inverse problem solving in semiconductor photoacoustics by neural networks, *Inverse Problems in Science and Engineering*, <https://doi.org/10.1080/17415977.2020.1787405>.
- [A3] K. Lj. Djordjevic, S. P. Galovic, M. I. Jordovic-Pavlovic, M.I. *et al.* Photoacoustic optical semiconductor characterization based on machine learning and reverse-back procedure. *Optical and Quantum Electronics* **52**, 247 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02373-x>
- [A4] K. Lj. Djordjevic, S. P. Galovic, M. I. Jordovic-Pavlovic, Z. M. Cojbasic, D. D. Markushev, Improvement of Neural Networks Applied to Photoacoustic Signals of Semiconductors With Added Noise, *Silicon*, accepted.
- [A5] M. I. Jordovic-Pavlovic, A. D. Kupusinac, K. Lj. Djordjevic *et al.* Computationally intelligent description of a photoacoustic detector. *Optical and Quantum Electronics* **52**, 246 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02372-y>
- [A6] M. I. Jordovic-Pavlovic, D. D. Markushev, A. D. Kupusinac, A.D. *et al.* Deep Neural Network Application in the Phase-Match Calibration of Gas–Microphone Photoacoustics. *International Journal of Thermophysics* **41**, 73 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02650-7>

Б. Радови у зборницима међународних конференција:

- [1] M. Nestic, M. Popovic, K. Djordjevic, V. Miletic, M. Jordovic-Pavlovic, D. Markushev, S. Galovic, Development and comparison of the techniques for solving the inverse problem in Photoacoustics, Machine Learning with Photonics Symposium (2019) Belgrade, Serbia
- [2] M. N. Popovic, D. D. Markushev, M. I. Jordovic-Pavlovic, K. Djordjevic, V. Miletic, M. V. Nestic, S. P. Galovic, Influence of protection layer on photoacoustic response of polymer samples – theory and experiment, ICPPP (2019) Moscow, Russia
- [3] D. K. Markushev, M. N. Popovic, S. P. Galovic, K. Lj. Djordjevic, D. D. Markushev, J. Ordonez-Miranda, Steady-state temperature component within an n-type silicon plate illuminated with a laser beam of modulated intensity, ICPPP (2019), 20-th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Moscow, Russia
- [4] K. Djordjević, S. Galović, M. Jordović-Pavlović, M. Nešić, M. Popović, Ž. Čojbašić And D. Markushev, Neural Network Based Reverse-Back Procedure For Photoacoustic Electronic Characterization Of Semiconductors, The 20th Symposium on Condensed Matter Physics - SFKM (2019), Belgrade - Serbia
- [5] M. Jordović-Pavlović, A. Kupusinac, K. Djordjević, S. Galović, D. Markushev, M. Nešić and M. Popović, Computationally Intelligent Estimation Of Properties For Polymer Microphone Diaphragms By Photoacoustic Measurement, The 20th Symposium on Condensed Matter Physics - SFKM (2019), Belgrade – Serbia
- [6] V. Miletic, K. Djordjevic, M. Popovic, D. Milicevic, D. Markushev, S. Galovic And M. Nestic, Preparing And Monitoring Photoacoustic Response Measurements Of Two-Layer PLLa Samples Of Different Crystallinity Levels, The 20th Symposium on Condensed Matter Physics – SFKM (2019), Belgrade – Serbia
- [7] V. Miletic, K. Djordjevic, D. Markushev, M. Popović, S. Galović, D. Miličević, M. Nešić, Priprema PLLA uzoraka i snimanje njihovog fotoakustičkog odziva. Tumačenje kroz model dvoslojnih struktura, 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 18-20 March (2020)

[8] D. Tasic, M. Milovancevic, K. Djordjevic, S. Galovic, Z. Dimitrijevic, B. Mitic, S. Glogovac, History of Artificial Intelligence and its application in nephrology, *Nephrology Dialysis Transplantation* 35 3 gfaa142.P1846, ERA-EDTA (2020)
<https://doi.org/10.1093/ndt/gfaa142.P1846>

4. Закључак

На основу изложеног, докторска дисертација под називом „Примена неуронских мрежа у фотоакустичкој анализи силицијума *n*-типа у фреквентном домену“ Катарине Ђорђевић претставља оригиналан и значајан научни допринос физике кондензованог стања у развоју нових, практичних метода фотоакустике базираних на примени неуронских мрежа, намењених недеструктивној карактеризацији полупроводника. Узимајући у обзир актуелност ове теме као и радове који су произашли из ове дисертације, комисија предлаже Научно-наставном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану докторске дисертације.

У Београду, 07.07.2020.



др Драган Маркушев, научни саветник
Институт за физику Земун-Београд, Универзитет у Београду

др Слободанка Галовић, научни саветник
Институт за нуклеарне науке „Винча“, Универзитет у Београду

др Горан Попарић, редовни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду

др Мићо Митровић, редовни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду

др Едиб Добарцић, ванредни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду

Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације

7/2/2020

Summary Report

Primena neuronskih mreža u fotoakustičkoj anali...

By: Katarina Đorđević

As of: Jul 2, 2020 11:17:23 AM
28,184 words - 219 matches - 122 sources

Similarity Index
15%

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма iThenticate којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације „Примена неуронских мрежа у фотоакустичкој анализи силицијума n-типа у фреквентном домену”, аутора Катарине Ђорђевић, констатујем да утврђено подударање текста износи 15%. Овај степен подударности последица је библиографских података о коришћеној литератури, тзв. општих места и података, као и претходно публикованих резултата докторандових истраживања, који су проистекли из његове дисертације, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујем да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

У Београду, 07.07.2020. године

Ментор



др Драган Маркушев, научни саветник

Институт за физику Земун-Београд, Универзитет у Београду