

Извештај о оцени
Мингсвић

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКОГ ФАКУЛТЕТА

ПРИЈЕМАЊА 21.12.2020

02 625/1 - -

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

ВЕЋУ ЗА ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКЕ НАУКЕ

УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Наставно-научног већа Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу одржаној 30.09.2020. (одлуком број 440/X-2) и на седници Већа за природно-математичке науке Универзитета у Крагујевцу одржаној 14.10.2020. (број одлуке IV-01-715/8) одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **Љубице Кузмановић** под насловом „**Моделовање фотонско кристалних оптичких влакана са W индексом преламања**“. Љубица Кузмановић је поднела рукопис своје докторске дисертације Наставно-научном већу Природно-математичког факултета у Крагујевцу на оцену. Чланови Комисије су детаљно прегледали рукопис, проценили научни квалитет дисертације и указали кандидату на потребне корекције. Љубица Кузмановић је усвојила све предлоге Комисије у оквиру коначне верзије дисертације, чиме су се стекли услови да Комисија поднесе следећи Извештај.

ИЗВЕШТАЈ КОМИСИЈЕ О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

**„Моделовање фотонско кристалних оптичких влакана са W индексом преламања“
кандидата Љубице Кузмановић**

Докторска дисертација „**Моделовање фотонско кристалних оптичких влакана са W индексом преламања**“ садржи следеће делове:

- 1) Сажетак у коме је дат кратак приказ докторске дисертације
- 2) Сажетак (*Abstract*) дисертације на енглеском језику
- 3) Садржај
- 4) Списак слика
- 5) Списак табела
- 6) Појмови
- 7) Скраћенице и симболи
- 8) Увод
- 9) Глава 1: Фотонско кристална оптичка влакна
- 10) Глава 2: Оптичко влакно са W профилем индекса преламања
- 11) Глава 3: Моделовање W-ФКВ
- 12) Глава 4: Нумерички резултати

- 13) Закључак
- 14) Библиографија
- 15) Биографија кандидата
- 16) Прве стране научних радова у којима су објављени резултати дисертације

Дисертација је написана на 120 страна и садржи 40 слика, 81 једначину, 4 табеле и 150 библиографских јединица.

1. Преглед садржаја урађене дисертације

У Уводу су дате основне информације о оптичким влакнима, као што су кратак историјски осврт на развој идеје оптичких влакана, принципи на којима оптичка влакна функционишу, материјали који се користе за њихову израду. Потом су изнети основни подаци који говоре о фотонским кристалима и начину на који су феномени који се код њих испољавају употребљени код конструкције микроструктурираних (фотонско кристалних) оптичких влакана. Наведени су примери природних фотонских кристала који су послужили као инспирација за стварање вештачких фотонско кристалних структура.

Као циљ дисертације кандидат је поставио дизајнирање новог типа фотонско кристалног оптичког влакна са W профилем индекса преламања и теоријско испитивање преносних карактеристика оваквог влакна. За анализу одабраног влакна су примењене једначина протока снаге и таласна теорија која се базира на решавању једначина поља и модалној анализи.

На крају Увода је дат преглед садржаја дисертације.

Прва глава најпре говори о фотонским решеткама правећи паралелу између кристалне решетке и фотонске кристалне решетке. Уведен је појам ефективног индекса преламања. Објашњени су принципи вођења светлости у фотонско кристалним влакнима и наведени материјали који се користе за израду ових влакана. Приказани су различити типови фотонско кристалних влакана, као и фабрикација фотонско кристалних влакана. Направљена је подела фотонско кристалних влакана према механизму вођења светлости, на фотонско кристална влакна са индексним вођењем, која светлост воде механизмом модификоване унутрашње рефлексије, и фотонско

кристална влакна са шупљим језгром, која светлост воде ефектом фотонски забрањене зоне. Описана су влакна са индексним вођењем и дате су њихове основне карактеристике. Као примери влакана која светлост воде ефектом фотонски забрањене зоне, описана су фотонско кристална влакна са Браговим расејањем са пуним језгром, али нижег индекса преламања од омотача који га окружује, и фотонско кристална влакна са Браговим расејањем са шупљим језгром. Описана су и хибридна фотонско кристална влакна и фотонско кристална влакна допирана флуидима. И код једних и код других је одређени број штапића из микроструктуре влакна замењен штапићима који имају различит индекс преламања од основног материјала од ког је влакно направљено. Наведене су примене фотонско кристалних влакана, а дат је и опис микроструктурираног оптичког полимерног влакна, као и његове предности.

Друга глава говори о оптичким влакнима са W профилем индекса преламања. Најпре је дат кратак увод о конвенционалним оптичким влакнима, а потом је детаљно описано W -влакно и наведене су његове најважније преносне карактеристике. Описан је један од модела који се најчешће користи за квалитативну анализу влакна са W индексом преламања – концепт референтног SC влакна. Након тога је дат коментар о вишемодном W влакну. На крају друге главе описано је фотонско кристално влакно са W профилем индекса преламања и дизајн оваквог влакна.

Трећа глава је „Моделовање W -ФКВ“ (ФКВ – фотонско кристално влакно). У првом делу ове главе се говори о апроксимацији континуума и једначини протока снаге. Дато је извођење временски независне једначине протока снаге за влакна са W профилем индекса преламања, и наведен начин њеног нумеричког решавања применом експлицитног метода коначних разлика у општем случају, а потом је описано и решавање ове једначине за случај влакана са W профилем индекса преламања. Решавањем временски независне једначине протока снаге добијају се угаоне расподеле светлости на различитим дужинама влакна са W профилем индекса преламања, за познату ширину и дубину унутрашњег омотача. Дат је и временски зависан облик једначине протока снаге, њена примена код влакана са W профилем преламања, као и нумерички метод решавања овакве једначине. Решавање временски зависне једначине протока снаге почиње применом Фуријеове трансформације снаге сигнала која зависи од угла простирања мода кроз влакно, дужине влакна и времена, потом се решава

добијена преносна функција система. Преносна функција је комплексна, па се добијају две спрегнуте диференцијалне једначине које се потом решавају експлицитним методом коначних разлика. Након одређивања реалног и имагинарног дела преносне функције, фреквентни одзив се налази као однос функција улазног и излазног сигнала.

Други приступ, примењен за моделовање W-ФКВ, који је описан у трећој глави, је моделовање једномодних W-ФКВ таласном теоријом. Овај приступ је искоришћен за добијање губитака у влакну који потичу од Рејлијевог расејања. Ови губици зависе од материјала влакна и индекса преламања влакна. Приказани су поступци одређивања средње вредности коефицијента Рејлијевог расејања, и ефективног индекса преламања омотача.

У четвртој глави су изложени нумерички резултати проистекли из истраживања обухваћених дисертацијом. Прво је описано испитивано фотонско кристално оптичко влакно са W профилем индекса преламања. Дате су вредности параметара влакна: индекс преламања језгра, полупречник језгра, пречници шупљина унутрашњег и спољашњег омотача (што одређује дубину унутрашњег омотача), као и одговарајући критични углови, растојање међу шупљинама у омотачима, број слојева ваздушних шупљина у унутрашњем омотачу (што одређује ширину унутрашњег омотача), коефицијент спрезања, као и таласна дужина светлости пропуштене кроз влакно.

Описан је утицај параметара влакна на модалну расподелу снаге код вишемодних W-ФКВ са чврстим језгром. Искоришћено је решење временски независне једначине протока снаге добијено експлицитним методом коначних разлика, како би се одредила промена просторне расподеле снаге и расподела у стационарном стању које настаје када се заврши спрезање вођених и цурећих модова. Испитиван је утицај пречника ваздушних шупљина и броја прстенова ваздушних шупљина у унутрашњем омотачу на расподелу снаге, губитке цурећих модова и дужину на којој се успоставља стационарна расподела модова. Разматран је и утицај врсте ексцитације светлости на улазу у влакно на дужину на којој долази до стационарне расподеле. У зависности од тога да ли су побуђени само вођени или и цурећи и вођени модови, ексцитација може бити уска или широка.

Помоћу временски зависног облика једначине протока снаге је израчунат пропусни опсег W-ФКВ. Ова једначина је решавана експлицитним методом коначних разлика.

Испитиван је утицај пречника ваздушних шупљина у унутрашњем омотачу на пропусни опсег и губитке стационарног стања. И овде су у обзир узети утицаји броја прстенова ваздушних шупљина у унутрашњем омотачу и типа ексцитације светлости на улазу на анализиране преносне карактеристике W-ФКВ-а.

Поред утицаја до сада поменутих параметара влакна, испитиван је и утицај таласне дужине пропуштене светлости на слабљење цурећих модова. Изабране таласне дужине представљају трансмисионе прозоре у оптичким телекомуникационим системима за стаклена влакна, и припадају инфрацрвеном делу електромагнетног спектра. За разматране таласне дужине одређене су и дужине на којима се успоставља стационарна расподела снаге, као и утицај таласне дужине на угаону расподелу снаге светлости пропуштене кроз влакно.

Осим вишемодног, испитивано је и једномодно фотонско кристално влакно са W профилем индекса преламања. Код овог влакна су одређени губици услед Рејлијевог расејања. Одређена је зависност ових губитака од полупречника језгра, пречника ваздушних шупљина у унутрашњем омотачу, растојања међу шупљинама у унутрашњем омотачу, и таласне дужине пропуштене светлости.

На крају је дат закључак дисертације.

2. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области

Предмет ове докторске дисертације је дизајнирање новог типа фотонско кристалног оптичког влакна са W профилем индекса преламања и теоријско испитивање преносних карактеристика оваквог влакна. За анализу одабраног влакна коришћене су једначина протока снаге и таласна теорија. Применом временски независне једначине протока снаге, по први пут су испитивани утицаји ширине и дубине унутрашњег омотача, као и утицај ширине улазног снопа светлости на дужине на којима се успоставља стационарна расподела снаге код фотонско кристалних влакна са W индексом преламања. Применом временски зависне једначине протока снаге, поред утицаја ширине и дубине унутрашњег омотача, испитан је и утицај ширине улазног снопа светлости, као и утицај таласне дужине светлости на пропусни опсег и губитке код W-ФКВ. Добијени резултати показују да се променом ширине и дубине

унутрашњег омотача, као и избором одговарајуће ширине улазног снопа светлости, пропусни опсег може мењати у интервалу од 4-230 MHz·km, при чему су губици услед спрезања модова у стационарном стању у интервалу од 1-3 dB/km за анализирано W-ФКВ. Добијено је да са порастом пропусног опсега расту и губици у стационарном стању. Пропусни опсег конвенционалних вишемодних оптичких влакана са W индексом преламања, теоријски одређен у радовима других аутора, за влакно сличних карактеристика креће се у мало ужем интервалу, од 20-250 MHz·km, а губици услед спрезања модова у стационарном стању у интервалу од 0.3-25 dB/km.

Показано је да постоји велика зависност губитака који потичу од Рејлијевог расејања од пречника шупљина у унутрашњем омотачу и растојања међу шупљинама у унутрашњем омотачу. Може се закључити да се уз одговарајући избор структурних параметара анализираних фотонско кристалног W влакна могу лако добити влакна чије карактеристике одговарају одређеним специфичним применама, као што је нпр. употреба у фибер-оптичким сензорима где се расејање може користити за праћење и детектовање ефеката који се јављају током простирања светлости кроз влакно.

3. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области

Имајући увид у актуелно стање у изучавању фотонско кристалних оптичких влакана са W профилем индекса преламања, Комисија закључује да докторска дисертација кандидата Љубице Кузмановић садржи оригиналне научне резултате који нису били предмет ниједног до сада објављеног истраживања у овој области.

4. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области

Кандидат Љубица Кузмановић се бави научним радом у области оптичке физике, о чему сведоче објављени радови: 1 рад у часопису категорије M21, 4 рада у часописима категорије M22, и 2 рада (један публикован, други прихваћен за публикавање) у часописима категорије M23.

5. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Приложена докторска дисертација у погледу обима и квалитета испуњава све захтеве који су постављени пријавом теме докторске дисертације. Циљеви докторске дисертације су у потпуности испуњени и добијени су очекивани резултати.

6. Научни резултати докторске дисертације

Комисија истиче да је из области докторске дисертације кандидат Љубица Кузмановић објавила четири рада у часописима са листе цитираних часописа (SCI/ISI).

1. **Lj. Kuzmanović**, A. Simović, M. S. Kovačević, S. Savović, A. Djordjevich, Controlling the attenuation of leaky modes in multimode W-type photonic crystal fibers in the infrared wavelength domain, *Laser Physics Letters* 16 (9), 95-103, ISSN: 16122011, DOI: 10.1088/1612-202x/ab341f(2019) (M22)
2. M. S. Kovačević, **Lj. Kuzmanović**, A. Simović, S. Savović, B. Drljača, A. Djordjevich, Calculation of the bandwidth of W-type photonic crystal fibers by time-dependent power flow equation, *Optics Communications* 427, pp.348-353, ISSN: 00304018, DOI: 10.1016/j.optcom.2018.06.074 , IF 1.887 (2018) (M22)
3. Kovacevic, M. S., **Kuzmanovic, Lj.**, Djordjevich, A., Estimation of Rayleigh scattering loss in a double-clad photonic crystal fiber, *Optical and Quantum Electronics* 50 (5), ISSN: 03068919, DOI: 10.1007/s11082-018-1482-4, IF 1.168 (2018) (M23)
4. Milan. S. Kovacevic, **Lj. Kuzmanovic**, A. Simovic, S. Savovic, A. Djordjevich, Transients of modal-power distribution in multimode solid core W-type photonic crystal fibers, *J. Lightwave Technol.* 35, 4352-4357, ISSN: 0733-8724, DOI: 10.1109/JLT.2017.2726518, IF 3.671 (2017) (M21)

Остали радови кандидата

1. M. S. Kovačević, M. M. Milošević, **Lj. Kuzmanović**, A. Djordjevich, Monte Carlo simulation of SiO₂ nanoparticle-coated polymer optical fiber humidity sensor by ray tracing, *Optica Applicata* 51 (3) (2021) ISSN: 0078-5466 (1899-7015) (M23) – прихваћен за публикавање
2. M. S. Kovačević, M. M. Milošević, **Lj. Kuzmanović**, A. Djordjevich, A new look at surface-wave sustained plasma: magnetic current model treated by a fixed-point method, *Publ. Astron. Obs. Belgrade No 99* (2020), 213-216, ISSN: 0078-5466

3. **Lj. Kuzmanović**, M. M. Milošević, M.S. Kovačević, A. Djordjevich, An estimation of far-field intensity distribution for photonic crystal fibers based on empirical relations, *Optical and Quantum Electronics* **52**, 67(2020), ISSN: 0306-8919, DOI: 10.1007/s11082-019-2183-3 (2020) (M22)
4. Milan S. Kovacevic, **Ljubica Kuzmanovic**, Alexandar Djordjevich, An analysis of W shaped plastic optical fibres by WKB approximation, *Opt Quant Electron*, 326-335, DOI 10.1007/s1182-016-0588-9, ISSN 0306-8919, DOI: 10.1007/s11082-016-0588-9, IF 1.290 (2016) (M22)
5. M. Kovačević, **Lj. Kuzmanović**, Fotonsko kristalna optička vlakna, *Nastava fizike*, broj 2, str 43-52, ISSN 2406-2626 (2016)

7. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Резултати добијени у овој дисертацији могу наћи примену у актуелном проучавању испитивања фотонско кристалних оптичких влакана са W профилем индекса преламања. Добијени резултати се могу применити при избору оптималног профила индекса преламања узимајући у обзир однос пропусног опсега, као и таласних дужина пропуштене светлости, и губитака.

8. Начин презентовања резултата научној јавности

Резултати до којих је кандидат дошао представљени су научној јавности кроз четири публикована рада у часописима који се налазе на SCI/ISI листи, као и учешћем на међународним конференцијама:

- **Lj. Kuzmanović**, M. M. Milošević, M.S. Kovačević, A. Djordjevich, An estimation of far-field intensity distribution for photonic crystal fibers based on empirical relations, VII International School and Conference on Photonics (Photonica 2019), Serbia, August 26-30, 2019. M34
- Kovacevic, M. S., **Kuzmanovic**, **Lj.**, Djordjevich, A., Estimation of Rayleigh scattering loss in a double-clad photonic crystal fiber, VI International School and Conference on Photonics (Photonica 2017), Serbia, August 28-September 1, 2017. M34

- Milan S. Kovacevic, **Ljubica Kuzmanovic**, Alexandar Djordjevich, An analysis of W shaped plastic optical fibres by WKB approximation, V International School and Conference on Photonics (Photonica 2015), Serbia, August 24-28, 2015. M34

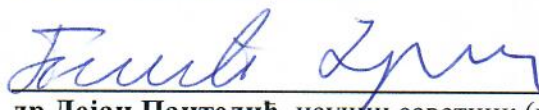
ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Из изложених података Комисија закључује:

- кандидат Љубица Кузмановић испуњава све суштинске и формалне захтеве који се траже од кандидата за одбрану докторске дисертације;
- урађена докторска дисертација „**Моделовање фотонско кристалних оптичких влакана са W индексом преламања**“ кандидата Љубице Кузмановић, урађена под менторством др Милана Ковачевића, редовног професора Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу, по квалитету, обиму и оствареним резултатима представља битан допринос физици оптичких влакана.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Природно-математичког факултета у Крагујевцу и Већу за природно-математичке науке Универзитета у Крагујевцу да позитивно оцени урађену докторску дисертацију кандидата Љубице Кузмановић, под насловом „Моделовање фотонско кристалних оптичких влакана са W индексом преламања“ и одобри њену одбрану.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:



др Дејан Пантелић, научни саветник (председник комисије)
Институт за физику
Београд
ужа научна област: Оптика



др Светислав Савовић, редовни професор
Природно-математички факултет
Универзитет у Крагујевцу
ужа научна област: Субатомска физика



др Ана Симовић, научни сарадник
Природно-математички факултет
Универзитет у Крагујевцу
ужа научна област: Атомска, молекулска и оптичка физика