

## **Наставно-научном већу Природно-математичког факултета у Крагујевцу**

**Предмет:** Извештај о поднетој докторској дисертацији кандидата Бранка Дрљаче

Одлуком Наставно-научног већа Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу, под бројем 340/XI-1 од 27.04.2011. године одређени смо за преглед докторске дисертације под насловом:

### **„Моделовање простирања светлости кроз вишемодна оптичка vlakна са степенастим индексом преламања применом једначине протока снаге“**

кандидата Бранка Дрљаче, дипл. физичара, студента последипломских докторских студија физике на Природно-математичком факултету Универзитета у Крагујевцу.

Комисија је прегледала поднету докторску дисертацију и Наставно-научном већу Природно-математичког факултета подноси следећи

### **ИЗВЕШТАЈ**

Докторска дисертација је написана на 138 страна и садржи Посвету, Садржај, Увод и десет глава:

1. Кратак историјски преглед развоја оптичких влакана
2. Основи теорије светлости
3. Оптичко влакно
4. Моделовање простирања светлости кроз оптичко влакно са степенастим индексом преламања применом геометријског и електромагнетног приступа
5. Моделовање простирања светлости кроз оптичко влакно са степенастим индексом преламања применом временски-независне једначине протока снаге
6. Моделовање простирања светлости кроз оптичко влакно са степенастим индексом преламања применом временски-зависне једначине протока снаге
7. Закључак
8. Литература
9. Сажетак
10. Индекс појмова

Дисертација садржи 2 табеле, 62 слике и 57 литературне јединице.

### **Преглед садржаја урађене дисертације**

Дисертација се састоји из две целине: теоријских основа и решавања проблема простирања светлости кроз вишемодна оптичка влакна са степенастим индексом преламања, са представљањем добијених резултата и анализом и дискусијом. Као циљ дисертације,

кандидат је поставио решавање једначине протока снаге и примену решења на одређивање особина вишемодних оптичких влакана, најпре применом временски-независне једначине протока снаге, а затим и применом временски-зависне једначине протока снаге. Јасно је указао на предности коришћења једначине протока снаге у односу на модел заснован на геометријској оптици и модел заснован на анализи електромагнетног поља. Уочавање предности и мана решавања проблема нумеричким путем у односу на аналитичко решавање, такође је једна од централних тема дисертације.

У уводном делу доктората дат је кратак преглед обрађених тема.

У првој глави је концизно изложен историјски преглед развоја оптичких влакана. Представљене су прве идеје о простирању светлости кроз стаклена влакна, историјски развој материјала од којих су се правила влакна, као и начини смањења губитака у влакнима. Приказан је и кратак преглед развоја теорије која је пратила развој оптичких влакана.

У другој глави, кандидат излаже основе теорије простирања светлости. Објашњена је таласно-честична природа светлости, затим је приказан и закон одбијања и преламања светлости.

Трећа глава описује оптичко влакно. Приказан је принцип простирања светлости кроз оптичко влакно, затим је дата подела влакана на основу расподеле индекса преламања. Представљени су основни параметри који се користе приликом анализе оптичких влакана, као што су нумеричка апертура, дисперзија и губици у оптичким влакнима. Извршена је подела оптичких влакана према врсти материјала од којег су израђена.

Четврта глава се бави моделовањем простирања светлости кроз оптичка влакна са степенастим индексом преламања помоћу геометријског и електромагнетног приступа. Геометријски метод описује различите зраке који се простиру унутар оптичког влакна са степенастим индексом преламања. Дефинишу се карактеристични углови у влакну и врши класификација зрака на основу тако дефинисаних углова. Уводе се две инваријанте зрака и преко њих дефинишу величине којима се описује трајекторија светлости у оптичком влакну са степенастим индексом преламања. Након тога је објашњен електромагнетни приступ који се бави решавањем Максвелових једначина за цилиндричне таласоводе. То је подразумевало извођење таласне једначине у цилиндричним координатама, одређивање решења помоћу раздвајања променљивих и на крају избор решења на основу граничних услова. Као резултат таквог поступка добијају се решења за појединачне модове, који заправо представљају могуће конфигурације електромагнетног поља у цилиндричном таласоводу, које задовољавају таласну једначину и граничне услове.

Кандидат у петој глави прелази на тему дисертације и бави се моделовањем простирања светлости кроз оптичко влакно са степенастим индексом преламања применом временски-независне једначине протока снаге. Приказано је извођење временски-независне једначине протока снаге, а затим и њено аналитичко и нумеричко решење. По мишљењу комисије, овде је кандидат показао знање и разумевање принципа и детаља потребних за даљу анализу једначине протока снаге. Дат је јасан преглед примене временски-независне једначине протока снаге на одређивање параметара вишемодних оптичких влакана са степенастим индексом преламања, као што су константа спрезања, дужина спрезања и дужина влакна на којој настаје стационарна расподела модова. Након тога су представљени добијени резултати, који су проистекли из самосталног рада кандидата. Резултати су приказани јасно и прегледно, а указано је и на ограничења временски-независне једначине протока снаге. Аналитичко решење временски-независне једначине протока снаге је познато за два случаја. Први случај је када се Гаусов сноп светлости убацује у влакно дуж осе влакна, док је друго решење за случај када је угаона расподела снаге раванског таласа на улазу у влакно Диракова делта функција и убацује се у влакно под одређеним углом у односу на осу влакна. Аналитичко решење једначине протока снаге не постоји у случају када Гаусов сноп упадне светлости није усмерен дуж осе влакна. Зато, у већини практичних ситуација

временски-независна једначина протока снаге мора бити решена применом неког нумеричког метода. Применом нумеричког метода одређена је дужина спрезања  $L_c$  за пластично оптичко влакно PREMIER GH4001. Након тога је одређена дужина спрезања  $L_c$  и дужина  $z_s$  на којој настаје стационарна расподела модова код стакленог оптичког влакна CGW-CGE-68. Применом нумеричке методе утврђена је дужина спрезања  $L_c$  код овог оптичког влакна, док је за пластична оптичка влакана утврђено да је та дужина знатно мања. Слично, дужина  $z_s$  потребна за постизање стационарне расподеле модова код стакленог оптичког влакана са степенастим индексом преламања је знатно већа него код пластичних оптичких влакана са степенастим индексом преламања. Знатно веће дужине потребне да се изврши спрезање модова и постигне стационарна расподела модова приписују се слабијим унутрашњим пертурбационим ефектима у стакленим оптичким влакнима са степенастим индексом преламања у односу на пластична оптичка влакана са степенастим индексом преламања, што се огледа у знатно мањем коефицијенту спрезања  $D$  код стаклених оптичких влакана. Након тога су одређене дужине  $L_c$  и  $z_s$  на којој настају равнотежна расподела модова и стационарна расподела модова код три стаклена оптичка влакана са великим пречником језгра (100 – 400  $\mu\text{m}$ ). Добијено је да се коефицијент спрезања мења пропорционално пречнику влакна  $\sim d_{core}^{1.85}$ . Повећање коефицијента спрезања са повећањем пречника језгра приписује се смањењу угаоног раздвајања између суседних модова са повећањем пречника језгра. Утврђено је да као последица тога дужина спрезања  $L_c$  и дужина на којој настаје стационарна расподела модова  $z_s$  опадају са повећањем језгра влакна. Осим тога упоређене су дужине  $L_c$  и  $z_s$  за једно од испитиваних влакана са три различите таласне дужине извора светлости. Добијено је да се коефицијент спрезања мења са таласном дужином као  $\sim \lambda^{-1/2}$ . Смањење коефицијента спрезања приликом повећања таласне дужине настаје услед повећања угаоног раздвајања између суседних модова приликом повећања  $\lambda$ . Као последица тога дужина након које настаје равнотежна расподела модова  $L_c$  и дужина након које настаје стационарна расподела модова  $z_s$  се повећавају повећањем таласне дужине. Извршено је упоређивање дужина спрезања пластичних оптичких влакана са степенастим индексом преламања са релативно великом нумеричком апертуром ( $NA=0.45-0.5$ ), одређених применом Глоегове функције и методе Савовића и Ђорђевића. Глоегова метода даје потцењене вредности за дужину спрезања, а разлог за то је што она не узима у обзир ни утицај нумеричке апертуре ни ширину улазног светлосног снопа на дужину спрезања. Ово се приписује већем учешћу виших модова у влакнима са већом нумеричком апертуром, а како се виши модови не спрежу тако брзо потребне су им веће дужине влакна да би се спрезање завршило. Приказано је одређивање коефицијента спрезања у правом и савијеном стакленом оптичком влакну. Искоришћени су раније добијени експериментални подаци за право и савијено оптичко влакно како би се применила метода Савовића и Ђорђевића за одређивање вредности константе спрезања  $D$ . Добијени резултати указују да се спрезање брже одвија када је влакно савијено. Овакав резултат кандидат објашњава интензивнијим преносом енергије између модова услед микроскопских деформација у влакну. Услед ових деформација долази до постизања стационарне расподеле модова и равнотежне расподеле модова на краћим растојањим него што је то случај код правих влакана.

У шестој глави кандидат проширује анализу на временски-зависну једначину протока снаге. Приказано је извођење временски-зависне једначине снаге и њена позната аналитичка решења. Кандидат се бави решавањем временски-зависне једначине протока снаге јер је њено решавање неопходно уколико је потребно одредити преносне карактеристике оптичких влакана, као што су импулсни одзив, фреквентни одзив и преносни опсег. Најпре је одређен импулсни одзив применом аналитичког методе решавања временски-зависне једначине протока снаге за три пластична оптичка влакана са степенастим индексом преламања. По сазнањима кандидата то је први пут да је аналитичко решење примењено на пластична оптичка влакана са степенастим индексом преламања. Добијени резултати су показали добро слагање са експерименталним резултатима других аутора. Аутор уочава да је при мањим дужинама влакна модално-зависно слабење доминантан

ефекат, док при већим дужинама постаје доминанције спрезање модова које мења облик сигнала у Гаусову функцију. Повећањем дужине влакана облик импулсног одзива се мења услед појачаног спрезања модова и прелази у Гаусову функцију. Светлост која излази из влакна под највећим угловима у односу на осу влакна има највеће кашњење, па се на основу тога може предложити ефикасна метода за побољшање карактеристика влакна, којом се врши просторно филтеровање репова дистрибуције на вишим угловима. Приликом анализе аналитичких и нумеричких резултата за фреквентни одзив добијено је да нумерички резултати дају боље слагање са експерименталним резултатима од аналитичких резултата, нарочито при мањим дужинама. Након тога је, у циљу испитивања преносних карактеристика оптичких влакана, извршено одређивање фреквентног одзива за HFBR пластично влакно у случају када се светлост убацује под различитим угловима у односу на осу влакна. Установљено је да је при мањим дужинама влакна фреквентни одзив знатно мањи ако се светлост убацује под већим углом у односу на осу влакна. Са повећањем дужине влакна та разлика се смањује. И у случају преносног опсега остварено је боље слагање нумеричких резултата са експерименталним резултатима. Анализом преносног опсега уочено је да се он, у логаритамској скали, може представити двема правим линијама различитог коефицијента правца. Место на којем долази до „преламања“ указује да је дошло до преласка из режима слабог спрезања у режим јаког спрезања модова. То заправо означава дужину влакна на којој је успостављена равнотежна расподела модова. Резултати за фреквентни одзив HFBR влакна у случају убацивања светлости под различитим угловима у односу на осу влакна су искоришћени да би се одредио преносни опсег. Већи пад преносног опсега у поређењу са случајем када се светлост убацује дуж осе влакна, је израженији на мањим дужинама. При повећању дужине влакна та разлика се смањује, све до одређене тачке када почиње преклапање преносних опсега светлосних сигнала убачених под различитим угловима у односу на осу влакна. Кандидат сматра да се на тој дужини спрезање завршило, тј. да је на тој дужини настала стационарна расподела модова.

На самом крају, у глави 7, кандидат је сумирао резултате до којих је дошао у дисертацији. Такође је дао и своје виђење смерница за даља истраживања, и то у два конкретна правца. Први би се односио на испитивање утицаја угла под којим се убацује светлост у односу на осу влакна на преносне карактеристике других оптичких влакана, а други на испитивање утицаја ширине улазног светлосног снопа на преносне карактеристике влакана.

### **Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области**

У докторској дисертацији под називом „Моделовање простирања светлости кроз вишемодна оптичка влакна са степенастим индексом преламања применом једначине протока снаге“ кандидата Бранка Дрљаче развијен је комплетан математички и физички приступ моделовању простирања светлости кроз вишемодна оптичка влакна са степенастим индексом преламања. Кандидат је у оквиру дисертације по први пут применио аналитичко решење временски-зависне једначине протока снаге на пластична оптичка влакна са степенастим индексом преламања и упоредио добијене резултате се експерименталним резултатима других аутора. Након тога је, указујући на недостатке таквог решења, развио нумерички модел за решавање временски-зависне једначине протока снаге, који је једноставан за примену.

### **Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области**

Имајући увид у актуелно стање у области оптичких влакана, комисија закључује да је докторска дисертација кандидата Бранка Дрљаче оригинално научно дело чији резултати нису били предмет ниједног до сада објављеног истраживања на начин на који је то кандидат

учинио. Ово се посебно односи на примену аналитичког решења временски-зависне једначине протока снаге за одређивање преносних карактеристика пластичних оптичких влакана са степенастим индексом преламања, као и на развој нумеричког модела решавања временски-зависне једначине протока снаге.

### **Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области**

Кандидат Бранко Дрљача се бави научним радом у области моделовања простирања светлости кроз оптичка влакна већ неколико година, о чему сведочи већи број објављених научних радова наведених у прилогу. Кандидат је такође активно учествовао на два домаћа научна пројекта.

### **Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему**

Комисија сматра да приложен текст дисертације у потпуности испуњава постављене циљеве и да поставља сасвим нове стандарде у моделовању простирања светлости кроз оптичка влакна са степенастим индексом преламања. Завршена дисертација представља значајан научни допринос у области физике и испуњава највише критеријуме предвиђене за успешну докторску дисертацију.

### **Научни резултати докторске дисертације**

Део научних резултата дисертације изложен је у радовима:

A. Djordjevich, S. Savović, P. W. Tse, **B. Drljača** and A. Simović, "Mode coupling in strained and unstrained step-index glass optical fibers", *Applied Optics*, Vol. 49, 5076–5080 (2010). (ISSN: 0003-6935 Kobson; 1559-128X *Applied Optics* website) [ИФ=1.763; 18/64; 2008; Subject Category: OPTICS]; Категорија часописа: **M21**

**B. Drljača**, S. Savović and A. Djordjevich, "Calculation of the Frequency Response in the Step-Index Plastic Optical Fibers Using the Time-Dependent Power Flow Equation", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, 5618–622 (2011). (ISSN: 0143-8166) [ИФ=1.262; 28/71; 2009; Subject Category: OPTICS]; Категорија часописа: **M22**

**B. Drljača**, S. Savović and A. Djordjevich, "Calculation of the Impulse Response of Step-Index Plastic Optical Fibers Using the Time-Dependent Power Flow Equation", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, 658–660 (2009). (ISSN: 0587-4246) [ИФ=0.433; 99/112; 2009; Subject Category: PHYSICS (MULTIDISCIPLINARY)]; Категорија часописа: **M23**

S. Savović, A. Djordjevich, **B. Drljača** and A. Simović, "Equilibrium Mode Distribution and Steady State Distribution in Step-Index Glass Optical Fibers", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, 655–657 (2009). (ISSN: 0587-4246) [ИФ=0.433; 99/112; 2009; Subject Category: PHYSICS (MULTIDISCIPLINARY)]; Категорија часописа: **M23**

S. Savović, A. Djordjevich, **B. Drljača** and M. Kovačević, "Comparison of methods for calculating coupling length in step-index plastic optical fibers", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, 652–654 (2009). (ISSN: 0587-4246) [ИФ=0.433; 99/112; 2009; Subject Category: PHYSICS (MULTIDISCIPLINARY)]  
Категорија часописа: **M23**

Резултати презентовани у овим радовима се односе, пре свега, на примену аналитичког

решења временски-зависне једначине протока снаге на одређивање преносних карактеристика пластичних оптичких влакана са степенастим индексом преламања, као и на спрезање модова у пластичним и стакленим оптичким влакнима са степенастим индексом преламања. Развијени нумерички метод и резултати добијени његовом применом тема су радова који су у припреми.

### **Примењивост и корисност резултата у теорији и пракси**

Иако су оптичка влакна предмет научног истраживања више од тридесет година, потреба за преносом све веће количине података ставља испитивање оптичких влакана у сам врх приоритета у области телекомуникација. Поред тога све су актуелнија истраживања оптичких влакана у области сензора и ласера. Зато рад на моделовању простирања светлости кроз оптичка влакна има великог смисла у широком дијапазону научних и техничких области, како макро, тако и микро нивоа. Са друге стране, научна актуелност теме дисертације је, по мишљењу комисије, на највишем нивоу, пре свега због одређивања преносног опсега оптичких влакана, која је једна од најважнијих тема у области оптичких влакана.

### **Начин презентирања резултата научној јавности**

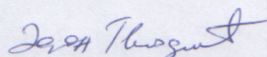
Резултати до којих је кандидат дошао, у самом тексту дисертације су представљени јасно, систематично и концизно. Комисија сматра да је, пре свега захваљујући систематичности и поштовању узрочно-последичних веза, дисертацију уз одређене модификације могуће користити и као штиво погодно за обуку истраживача који улазе у област проучавања оптичких влакана. Такође, кандидат је део резултата докторске дисертације већ представио на међународној конференцији, а у плану је учешће на више међународних конференција. Међународној научној јавности је део резултата већ представљен кроз поменуте публикације у реномираним светским часописима, а остали резултати ће бити презентовани кроз неколико будућих публикација.

На основу изложеног Комисија доноси следећи

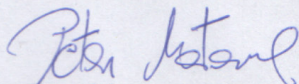
## ЗАКЉУЧАК

Комисија сматра да приложени текст дисертације у потпуности испуњава постављене циљеве и да поставља сасвим нове стандарде у развоју моделовања простирања светлости кроз оптичка влакна са степенастим индексом преламања. Ова дисертација представља значајан научни допринос у области физике и испуњава највише критеријуме предвиђене за успешну докторску дисертацију.

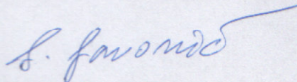
Комисија предлаже Наставно-научном већу Природно-математичког факултета да донесе одлуку о прихватању поднете докторске дисертације.



1. др Дејан Гвоздић, редовни професор,  
Електротехнички факултет, Београд  
ужа научна област: Физичка електроника и оптичке комуникације



2. др Петар Матавуљ, ванредни професор,  
Електротехнички факултет, Београд  
ужа научна област: Физичка електроника и оптоелектроника



3. др Светислав Савовић, редовни професор (ментор)  
Природно-математички факултет, Крагујевац  
ужа научна област: Субатомска физика

У Крагујевцу/Београду  
09. 05. 2011. године

**Прилог:** Листа објављених радова кандидата

A. Djordjevich, S. Savović, P. W. Tse, **B. Drljača** and A. Simović, "Mode coupling in strained and unstrained step-index glass optical fibers", *Applied Optics*, Vol. 49, 5076–5080 (2010). (ISSN: 0003-6935 Kobson; 1559-128X Applied Optics website) [ИФ=1.763; 18/64; 2008; Subject Category: OPTICS]; Категорија часописа: **M21**

**B. Drljača**, S. Savović and A. Djordjevich, "Calculation of the Frequency Response in the Step-Index Plastic Optical Fibers Using the Time-Dependent Power Flow Equation", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, 5618–622 (2011). (ISSN: 0143-8166) [ИФ=1.262; 28/71; 2009; Subject Category: OPTICS]; Категорија часописа: **M22**

**B. Drljača**, S. Savović and A. Djordjevich, "Calculation of the Impulse Response of Step-Index Plastic Optical Fibers Using the Time-Dependent Power Flow Equation", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, 658–660 (2009). (ISSN: 0587-4246) [ИФ=0.433; 99/112; 2009; Subject Category: PHYSICS (MULTIDISCIPLINARY)]; Категорија часописа: **M23**

S. Savović, A. Djordjevich, **B. Drljača** and A. Simović, "Equilibrium Mode Distribution and Steady State Distribution in Step-Index Glass Optical Fibers", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, 655–657 (2009). (ISSN: 0587-4246) [ИФ=0.433; 99/112; 2009; Subject Category: PHYSICS (MULTIDISCIPLINARY)]; Категорија часописа: **M23**

S. Savović, A. Djordjevich, **B. Drljača** and M. Kovačević, "Comparison of methods for calculating coupling length in step-index plastic optical fibers", *Acta Physica Polonica A*, Vol. 116, 652–654 (2009). (ISSN: 0587-4246) [ИФ=0.433; 99/112; 2009; Subject Category: PHYSICS (MULTIDISCIPLINARY)]; Категорија часописа: **M23**