

# НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ ФАКУЛТЕТА ЗА ФИЗИЧКУ ХЕМИЈУ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Данила Кисића, мастер физикохемичара

На VIII редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду, одржаној 16.7.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Данила Кисића, мастер физикохемичара, под насловом: „Утицај јонске имплантације гвожђа на површинска, електрична и магнетна својства полиетилена велике густине”.

Израда докторске дисертације кандидата Данила Кисића под наведеним насловом одобрена је на II редовној седници Наставно-научног већа Факултета за физичку хемију, одржаној 8.11.2018. године (број одлуке: 1741/2). На основу те одлуке, Веће научних области природних наука Универзитета у Београду на седници одржаној 29.11.2018. године, дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број одлуке: 61206-5203/2-18).

Пошто смо прегледали поднети материјал и анализирали докторску дисертацију кандидата, подносимо Наставно-научном већу следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### А. Приказ садржаја дисертације

Докторска дисертација кандидата Данила Кисића, мастер физикохемичара, написана је на 73 стране куцаног текста у складу са Упутством за обликовање дисертације, Универзитета у Београду. Докторска дисертација садржи 9 поглавља: **Увод** (1 страна); **Теоријски део** (12 страна): *Стање у науци о утицају јонске имплантације на површинска, електрична, оптичка и магнетна својства полиетилена велике густине* (4 стране), *Енергијски губици јона услед интеракције са материјалом мете* (2 стране), *Домет јона* (2 стране), *Радијационо оштећење* (4 стране), *Храпавост и морфологија површине* (2 стране); **Циљ рада** (1 страна); **Материјали и методе** (18 страна): *Припрема узорака* (2 стране), *Методе анализе* (17 страна); **Резултати** (21 страна): *Морфолошка својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* (6 страна), *Хемијски састав површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* (10 страна), *Електрична својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* (2 стране), *Магнетна својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* (2 стране), *Оптичка својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* (4 стране), *Површинска енергија полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* (2 стране); **Дискусија** (7 страна), **Закључак** (2 стране), **Литература** (10 страна, 149 литературних навода), и **Биографија** (1 страна) у којој су наведени објављени научни радови, проистекли из тезе. Дисертација садржи и: Насловну страну на српском језику, Насловну страну на енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима комисије, Захвалници, Резиме на српском језику, Резиме на енглеском језику, Садржај, и Прилоге прописане правилима Универзитета о подношењу докторске дисертације (4 стране). Дисертација садржи тридесет осам слика, од чега двадесет две слике представљају

оригиналне резултате кандидата, петнаест слика је урађено на основу доступне научне литературе, једна слика је преузета из доступне науче литературе. Дисертација садржи и шест табела, од чега пет представљају оригиналне резултате кандидата, а једна је модификована на основу постојеће научне литературе.

### **Поглавље 1. Увод** (1 страна)

У уводном делу ове дисертације дат је кратак историјат настанка и развоја јонске имплантације као савремене технологије добијања и модификовања физичкохемијских својстава материјала.

### **Поглавље 2. Теоријски део**

Поглавље **Теоријски део** је подељено на пет потпоглавља. У првом потпоглављу *Стање у науци о утицају јонске имплантације на површинска, електрична, оптичка и магнетна својства полиетилена велике густине* дат је литературни преглед стања у науци о утицају јонске имплантације гвожђа на површинска, електрична, оптичка и магнетна својства полиетилена велике густине. Теоријске основе интеракције између упадног јона и материјала мете описане су у другом потпоглављу, *Енергијски губици јона услед интеракције са материјалом мете*. У трећем потпоглављу *Домет јона*, разматрани су процеси и интеракције који утичу на домет јона током имплантације. Процеси који доводе до радијационих оштећења површине мете, разматрани су у четвртном потпоглављу, *Радијационо оштећење*. У петом потпоглављу *Храпавост и морфологија површине* дати су основни појмови и величине којима се карактеришу храпавост и морфологија површине чврстих материјала.

### **Поглавље 3. Циљ рада**

У поглављу **Циљ рада**, дефинисани су основни научни циљеви дисертације:

- а) Утврђивање утицаја дозе имплантације јона  $Fe^{+}$ , на површинска, електрична и магнетна својства Fe/ХДПЕ имплантата;
- б) Разумевање и објашњење механизма интеракције јона гвожђа са површином ХДПЕ;
- ц) Утврђивање утицаја морфолошких и структурних промена на површини имплантата на електричну проводност имплантационог слоја;
- д) Разумевање и објашњење механизма електричне проводности полимерних имплантата;

е) Утврђивање утицаја структурних и морфолошких промена на површини имплантата на магнетна својства имплантационог слоја.

#### **Поглавље 4. Материјали и методе** (18 страна, 12 слика, 2 табеле)

У поглављу **Материјали и методе** описане су методе синтезе имплантираних узорака са различитим дозама гвожђа, и методе за физичкохемијску карактеризацију испитиваних узорака.

У првом потпоглављу *Припрема узорака*, приказан је принцип рада јонског имплантера (500 kV јонски имплантер – High Voltage Engineering Europa, Amersfort), и детаљно описан начин припреме мете за јонску имплантацију.

У другом потпоглављу *Методе анализе* описане су методе анализе припремљених узорака. У овом потпоглављу су описане *Методе за одређивање хемијског састава површине*, *Методе анализе храпавости и морфологије површине*, *Методе за испитивање оптичких својстава површине*, *Магнето-оптичка Керова магнетометрија*, *Метода за испитивање електричних својстава*, и *Метода за одређивање површинске енергије*.

#### **Поглавље 5. Резултати**

Поглавље **Резултати** се састоји од шест потпоглавља.

**Прво потпоглавље** *Морфолошка својства површине ХДПЕ имплантираног јонима гвожђа*, састоји се из два одељка: *Анализа морфологије и храпавости површине коришћењем методе микроскопије атомских сила*; *Анализа морфологије површинског слоја коришћењем методе трансмисионе електронске микроскопије*.

У одељку *Анализа морфологије и храпавости површине коришћењем методе микроскопије атомских сила*, приказани су:

- а) топографске и фазне слике површине неимплантираног и имплантираног полиетилена велике густине;
- б) зависност површинске храпавости од дозе имплантације;
- в) зависност фракталне димензије површине од дозе имплантације, одређена на основу топографских слика микроскопије атомских сила.

На основу приказаних резултата, закључено је:

- а) јонска имплантација гвожђа доводи до настајања удолина и избочина на површини имплантираних узорака, пречника од неколико стотина нанометара (nm) до неколико микрометара ( $\mu\text{m}$ );
- б) повећање дозе у опсегу од  $5 \times 10^{16}$  до  $2 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$  доводи до повећања вредности храпавости ХДПЕ-а за око три пута у односу на неимплантирани ХДПЕ;

в) при дози од  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , вредност храпавости је већа за око шест пута у односу на неимплантирани полиетилен велике густине;

г) фрактална димензија површине се смањује након имплантације са вредности око 2,24 на вредност од око 2,05.

У одељку *Анализа морфологије површинског слоја коришћењем методе трансмисионе електронске микроскопије*, приказани су:

а) микрофотографије попречних пресека површинских слојева имплантираних узорака, добијене трансмисионом електронском микроскопијом;

б) зависност просечног пречника наночестица гвожђа, од дозе имплантације, одређена на основу микрофотографија трансмисионе електронске микроскопије;

в) зависност фракталне димензије попречног пресека имплантираних узорака од дозе имплантације, одређена на бази микрофотографија трансмисионе електронске микроскопије;

На основу приказаних резултата, утврђено је:

а) повећање дозе у опсегу од  $5 \times 10^{16}$  до  $1 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$  доводи до повећања вредности просечног пречника наночестица са вредности од око 2 nm до вредности од око 13 nm;

б) при највећој дози од  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , долази до настајања континуалног слоја;

в) фрактална димензија попречног пресека површинског слоја опада са повећањем дозе са вредности од око 2,75 на вредност од око 2,20;

**Друго потпоглавље *Хемијски састав површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа*** састоји се из четири одељка: *Одређивање хемијског састава методом Радерфордове спектрометрије расејања; Одређивање хемијског састава методом рендгенске фотоелектронске спектроскопије; Одређивање хемијског састава методом инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом; Одређивање локалног хемијског састава методом енергијски дисперзивне рендгенске спектроскопије.*

У одељку *Одређивање хемијског састава методом Радерфордове спектрометрије расејања*, приказани су:

а) спектри Радерфордове спектрометрије расејања, на основу којих су идентификовани елементи присутни у узорцима;

б) дубински концентрациони профили гвожђа;

в) упоредне вредности имплантационе дозе измерене струјним интегратором, и вредности имплантационе дозе израчунате из спектра Радерфордове спектрометрије расејања;

г) упоредне вредности атомских концентрација гвожђа на самој површини имплантираних узорака, узете са дубинских концентрационих профила гвожђа;

д) упоредне вредности максималних атомских концентрација гвожђа, узете са дубинских концентрационих профила гвожђа.

На основу приказаних резултата констатовано је:

- а) присуство гвожђа, угљеника, кисеоника и силицијума у површинском слоју;
- б) дозе имплантације измерене струјним интегратором су у међусобној доброј сагласности са вредностима израчунатим из спектра Радерфордове спектрометрије расејања;
- в) са повећањем дозе, позиције максимума концентрације гвожђа на концентрационим профилима померају се ближе површини;

У одељку *Одређивање хемијског састава методом рендгенске фотоелектронске спектроскопије*, приказани су:

- а) спектри рендгенске фотоелектронске спектроскопије неимплантираног и имплантираних узорака полиетилена велике густине;
- б) деконволуирани спектри најинтензивније Fe  $2p_{3/2}$  спектралне линије гвожђа, узорака полиетилена велике густине имплантираних јонима гвожђа;
- в) деконволуирани спектри најинтензивније O  $1s$  спектралне линије кисеоника, узорака полиетилена велике густине имплантираних јонима гвожђа;
- г) деконволуирани спектри најинтензивније C  $1s$  спектралне линије угљеника, узорака полиетилена велике густине имплантираних јонима гвожђа;

На основу приказаних резултата утврђено је:

- а) присуство угљеникове C  $1s$  спектралне линије у неимплантираном ХДПЕ-у;
- б) присуство угљеникове C  $1s$  спектралне линије, и спектралних линија кисеоника (O  $1s$ ) и гвожђа (Fe  $2p_{3/2}$ ) у свим имплантираним узорцима;
- в) имплантирано гвожђе се састоји из елементарног гвожђа и оксида гвожђа;
- г) кисеоник се састоји од компоненте која се приписује органским једињењима, и компоненте која се приписује оксидима гвожђа;
- д) након имплантације, компонента  $sp^2$  хибридованог угљеника постаје доминантна у односу на компоненту  $sp^3$  хибридованог, који је доминантан код неимплантираног полиетилена.

У одељку *Одређивање хемијског састава методом инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом*:

- а) приказани су инфрацрвени спектри узорака неимплантираног полиетилена велике густине, и полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа;
- б) извршена је асигнација утврђених апсорпционих трака.

На основу приказаних резултата, утврђено је:

- а) имплантација јонима гвожђа при дози од  $5 \times 10^{16}$  јона/ $\text{cm}^2$  доводи до појаве нове апсорпционе траке  $\text{C}=\text{O}$  групе са максимумом на  $1717 \text{ cm}^{-1}$ ;
- б) са даљим повећањем дозе, при дози од  $1 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$  позиција максимума апсорпционе траке  $\text{C}=\text{O}$  групе се помера на  $1732 \text{ cm}^{-1}$ ;
- в) позиције максимума апсорпционих трака  $\text{CH}_2$  асиметричне, симетричне, савијајуће и љуљајуће вибрације се не мењају са повећањем дозе у опсегу доза од  $5 \times 10^{16}$  до  $2 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ .
- г) позиције максимума апсорпционих трака  $\text{CH}_2$  асиметричне, симетричне, савијајуће и љуљајуће вибрације за највећу имплантациону дозу од  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , померају се ка мањим вредностима таласних бројева.

У одељку *Одређивање локалног хемијског састава методом енергијски дисперзивне рендгенске спектроскопије*, приказани су:

- а) микрофотографија одабраног подручја узорка имплантираног дозом од  $2 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ ;
- б) линијски концентрациони профили угљеника, гвожђа и кисеоника;

На основу приказаних резултата закључено је:

- а) гвожђе егзистира у облику наночестица
- б) концентрација угљеника има знатан пад у области коју прекрива наночестица гвожђа;
- в) концентрација кисеоника има знатан пад у области коју прекрива наночестица гвожђа.

У трећем потпоглављу, *Електрична својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа* приказани су:

- а) зависност слојне отпорности имплантационог слоја од дозе имплантације;
- б) зависност специфичне отпорности имплантационог слоја од дозе имплантације.

На основу приказаних резултата је утврђено

- а) слојна и специфична отпорност имплантационог слоја смањују се са повећањем имплантационе дозе;
- б) облици зависности слојне специфичне отпорности површинског слоја од дозе имплантације су међусобно веома слични.

У четвртом потпоглављу, *Магнетна својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа*, приказане су криве магнетизације за узорке полиетилена велике густине, имплантиране дозама од  $1 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ ,  $2 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$  и  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ .

На основу приказаних резултата утврђено је:

- а) суперпарамагнетно понашање имплантираних узорака при дозама од  $5 \times 10^{16}$  јона/cm<sup>2</sup> и  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>;
- б) феромагнетно понашање при дозама од  $2 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup> и  $5 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>.

**Пето потпоглавље, *Оптичка својства површине полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа*** састоји се из два одељка: *Анализа оптичких својстава методом спектроскопске елипсометрије; Анализа оптичких својстава методом УВ-ВИС спектроскопије.*

У одељку *Анализа оптичких својстава методом спектроскопске елипсометрије*, приказани су елипсометријски спектри индекса преламања и апсорпционог коефицијента, узорака полиетилена велике густине и полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа.

На основу приказаних резултата, констатовано је да повећање дозе имплантације доводи до повећања и индекса преламања, и апсорпционог коефицијента;

У одељку *Анализа оптичких својстава методом УВ-ВИС спектроскопије*, приказани су:

- а) УВ-ВИС апсорпциони спектри узорака неимплантираног полиетилена велике густине, и полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа;
- б) УВ-ВИС апсорпциони спектри узорака полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа, од којих је одузет спектар неимплантираног полиетилена велике густине.

На основу приказаних резултата утврђено је:

- а) неимплантирани узорак Полиетилена велике густине нема апсорпциони пик на УВ-ВИС спектру;
- б) код имплантираних узорака се јавља апсорпциони пик на око 236 нанометара;
- в) позиција апсорпционог пика се не мења са повећањем имплантационе дозе.

**У шестом потпоглављу, *Површинска енергија полиетилена велике густине имплантираног јонима гвожђа*** приказани су:

- а) утицај дозе имплантације на вредности контактних углова три различите течности (вода, етилен гликол и дијодметан) са површином испитиваних узорака;
- б) утицај дозе имплантације на вредности укупне површинске енергије испитиваних узорака, израчунатих на основу измерених контактних углова;
- в) утицај дозе имплантације на вредности компонената укупне површинске енергије (поларна, дисперзивна, Луисовска киселинска и Луисовска базна);
- г) зависност укупне површинске енергије од примењене имплантационе дозе.

На основу приказаних резултата, утврђено је:

- а) контактни углови са течностима се смањују са смањењем удела поларне компоненте у укупној површинској енергији течности, па су са водом као најполарнијом течношћу највећи, а са дијодметаном као сасвим неполарном течношћу најмањи;
- б) вредност укупне површинске енергије се повећава са повећањем имплантационе дозе у опсегу доза од  $5 \times 10^{16}$  јона/cm<sup>2</sup> до  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>;
- в) повећање имплантационе дозе у опсегу доза од  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup> до  $5 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>, доводи до смањења вредности укупне површинске енергије;
- г) дисперзивна компонента површинске енергије је изразито доминантна у односу на поларну компоненту, и њен удео се не мења значајно са дозом имплантације.

## **Поглавље 6. Дискусија**

У шестом поглављу, Дискусија, упоређени су резултати са литературно познатим чињеницама, и дато је објашњење утврђених чињеница.

Утврђене промене у морфологији и храпавости површине објашњене су: ефектима локалног пораста температуре и распрашивања атома мете, нуклеацијом и растом формираних, наночестица гвожђа, и процесима радиотермолизе и дегазације молекула мете приликом имплантације.

Повећање слојне електричне проводљивости са повећањем дозе објашњено је нуклеацијом и растом наночестица гвожђа, и карбонизацијом молекула ХДПЕ-а, у имплантационом слоју.

Појава суперпарамагнетног понашања узорака добијених при имплантационим дозама од  $5 \times 10^{16}$  јона/cm<sup>2</sup> и  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>, објашњена је постојањем наночестица гвожђа пречника до око 4 nm;

Појава феромагнетног понашања узорака добијених при имплантационим дозама од  $2 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup> и  $5 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>, објашњена је појавом наночестица гвожђа пречника већих од 10 nm, и континуалног слоја гвожђа;

Повећањем оптичке густине имплантационог слоја, насталог услед промена у хемијском саставу са повећањем имплантационе дозе, објашњено је повећање индекса преламања и апсорпционог коефицијента;

Појава новог апсорпционог пика у ултраљубичастој области, код имплантираних узорака, повезана је са ефектима локализоване површинске плазмонске резонанције наночестица гвожђа.

Индукованим променама у хемијском саставу површинског слоја имплантираних узорака услед раскидања молекулских веза полимерног ланца и присуства гвожђа, објашњена је промена површинске енергије са повећањем дозе имплантације.

## **Поглавље 7. Закључак** (2 стране)

У овом поглављу су сумирани закључци до којих се дошло на основу резултата приказаних у оквиру ове докторске дисертације.

## **Поглавље 8. Литература** (10 страна, 149 литературних навода)

Литературни наводи цитирани у оквиру ове докторске дисертације, према редоследу појављивања у тексту, наведени су у 8. поглављу.

## **Поглавље 9. Биографија** (1 страна)

Биографија кандидата, и наслови научних радова проистеклих из ове дисертације, дати су у 9. поглављу - Биографија

## **Б. Опис резултата дисертације**

На основу приказаних резултата из ове докторске дисертације, као и датих објашњења, утврђено је:

- а) при имплантационим дозама у опсегу од  $5 \times 10^{16}$  до  $2 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , вредност храпавости имплантираних узорака је око три пута већа у односу на неимплантирани полиетилен велике густине;
- б) при имплантационој дози од  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , вредност храпавости имплантираних узорака већа је више од шест пута у односу на неимплантирани полиетилен велике густине;
- в) при дозама у опсегу од  $5 \times 10^{16}$  до  $2 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , на површини се јављају удолине и избочине величине од неколико стотина нанометара до неколико микрометара;
- г) при имплантационој дози од  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$ , на површини постоје сферичне континуалне структуре ;
- д) са повећањем дозе расте и величина наночестица гвожђа;
- ђ) при дози од  $5 \times 10^{17}$  јона/ $\text{cm}^2$  долази до настајања континуалног слоја гвожђа;
- е) формиране наночестице се састоје од гвожђа и мешавине више оксида гвожђа;
- ж) имплантација доводи до раскидања полимерних ланаца и деградације полиетилена, што се огледа у доминацији  $\text{sp}^2$  хибридолизованог угљеника након имплантације;

- з) имплантација гвожђа доводи до повећања индекса преламања и апсорпционог коефицијента површинског слоја;
- и) имплантација гвожђа доводи до појаве апсорпционог пика у ултраљубичастој области спектра;
- ј) електрична слојна отпорност се смањује са повећањем дозе имплантације;
- к) имплантација гвожђа узрокује појаву суперпарамагнетног понашања имплантационог слоја при дозама од  $5 \times 10^{16}$  и  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>;
- л) имплантација гвожђа узрокује појаву феромагнетног понашања имплантационог слоја при дозама од  $2 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup> и  $5 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>;
- м) површинска енергија полиетилена велике густине се повећава са повећањем дозе имплантације гвожђа до дозе од  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>, након које се са даљим повећањем имплантационе дозе смањује;
- н) удео дисперзивне компоненте површинске енергије не мења се значајно са повећањем дозе имплантације.

## **В. Упоредна анализа резултата са налазима из литературе.**

Прегледом доступне научне литературе, утврђено је да нема публикација које се баве површинским, електричним и магнетним својствима полиетилена велике густине имплантираним јонима гвожђа.

У раду Куна и сарадника (N.C. Koon, D. Weber, P. Pehrsson, A.I. Schindler, *Magnetic properties of iron implanted polymers and graphite*, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **27** (1984) 445.) испитиван је утицај дозе имплантације Fe<sup>+</sup> јона на магнетна својства полиетилена мале густине, високо-оријентисаног пиролитичког графита и поливинил флуорида. Утврђено је да се феромагнетно понашање имплантираних узорака постиже при дозама већим од  $3 \times 10^{16}$  јона/cm<sup>2</sup>.

Утицај дозе имплантације јона Fe<sup>+</sup> на морфолошка, електрична и магнетна својства полиетилен терафталата (ПЕТ) у опсегу доза од  $1,5 \times 10^{16}$  јона/cm<sup>2</sup> до  $1,5 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>, испитивали су Окај и сарадници (С. Окај, B.Z. Rameev, R.I. Khaibullin, M. Okutan, F. Yildiz, V.N. Popok, B. Aktas, *Ferromagnetic resonance study of iron implanted PET foils*, Phys. Stat. Sol. (a) **203** (2006) 1525-1532.). Аутори су показали да:

- а) долази до формирања наночестица гвожђа пречника између 5 и 100 nm, зависно од дозе, а за дозу од  $1,5 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup> формирају се издужене структуре дужине до неколико стотина nm;
- б) на површини је утврђено формирање малих избочина или издужених структура.
- в) присуство феромагнетне фазе је утврђено већ за дозу од  $2,5 \times 10^{16}$  јона/cm<sup>2</sup>, а максимална електрична проводљивост је постигнута за дозу од  $1 \times 10^{17}$  јона/cm<sup>2</sup>, која се показала и као доза магнетне перколације.

Лукашевич и сарадници (M.G. Lukashевич, V.N. Popok, V.S. Volobuev, A.A. Melnikov, R.I. Khaibullin, V.V. Bazarov, A. Wieck, V.B. Odzhaev, *Magneto-resistive Effect in PET Films with*

*Iron Nanoparticles Synthesized by Ion Implantation*, ТОАРЈ 3 (2010) 1.-5.) су такође испитивали утицај дозе импланације јона  $Fe^+$  на морфолошка, електрична и магнетна својства ПЕТ-а, у опсегу доза од  $2,5 \times 10^{16}$  јона/ $cm^2$  до  $1,5 \times 10^{17}$  јона/ $cm^2$ . Морфологија формираних наночестица гвожђа је веома слична као и у претходно наведеном истраживању, максимална електрична проводљивост је постигнута за највећу примењену дозу од  $1,5 \times 10^{17}$  јона/ $cm^2$ , а магнетна перколација је утврђена за дозу од  $7,5 \times 10^{16}$  јона/ $cm^2$ .

Упоредно испитивање утицаја јонске импланације јона  $Fe^+$  на оптичка и електрична својства Полиимида (ПИ), полиетер етер кетона (ПЕЕК) и ПЕТ-а, у опсегу доза од  $0,2 \times 10^{16}$  јона/ $cm^2$  до  $5 \times 10^{16}$  јона/ $cm^2$ , извршили су Мацкова и сарадници (А. Mackova, Р. Malinsky, R. Miksova, V. Hnatowicz, R.I. Khaibullin, P. Slepicka, V. Svorcik, *Characterisation of PEEK, PET and PI implanted with 80 keV Fe<sup>+</sup> ions to high fluencies*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **331** (2014) 176.–181.) Показано је:

- а) дубински концентрациони профили гвожђа знатно су померени ка површини, поготово при највећој примењеној дози од  $5 \times 10^{16}$  јона/ $cm^2$ .
- б) смањење електричне отпорности показује сатурацију при дозама изнад  $1 \times 10^{16}$  јона/ $cm^2$ , а посебно је изражено код ПЕЕК-а.

Бут и сарадници (M.Z. Butt, D. Ali, N.-ul-Aarifeen, S.Naseem, *Structural and optical properties of CR-39 polymer implanted with laser produced plasma ions of iron*, Physica B Condens. Matter. **454** (2014) 179.-183.) су испитивали имплантацију ласерски створеним плазма јонима  $Fe^+$  у CR-39 полимер у опсегу доза од  $3,03 \times 10^5$  јона/ $cm^2$  до  $6,071 \times 10^5$  јона/ $cm^2$ . Утврђено је смањење енергијског процепа у датом опсегу од више од 5 %.

Утицај јонске импланације  $Fe^{6+}$  јона на својства етилен-винил ацетата (ЕВА), у опсегу доза од  $1 \times 10^{15}$  јона/ $cm^2$  до  $1 \times 10^{17}$  јона/ $cm^2$ , испитивали су Божанић и сарадници (D.K. Božanić, I. Draganić, N. Bibić, A.S. Luyt, Z. Konstantinović, V. Djoković, *Morphology and magnetic properties of the ethylene-co-vinylacetate/iron nanocomposite films prepared by implantation with Fe<sup>6+</sup> ions*, Appl. Surf. Sci. **378** (2016) 362.–367.). При дози од  $1 \times 10^{17}$  јона/ $cm^2$  формиране су наночестице гвожђа просечног пречника око 1,5 nm, груписане у слој дебљине 80 nm, који почиње на око 40 nm од површине. Утврђено је суперпарамагнетно понашање ових композитних слојева.

## Г. Научни радови и саопштења објављени из резултата дисертације

Кандидат Данило Кисић из резултата дисертације објавио је два рада у истакнутим међународним часописима (M22) на којима је првопотписани аутор.

Радови у истакнутим међународним часописима (M22)

1. Danilo D. Kisić, Miloš T. Nenadović, Jelena M. Potočnik, Mirjana Novaković, Pavol Noga, Dušan Vaňa, Anna Závacká, Zlatko Rakočević, *Surface layer morphology of the high fluence Fe implanted polyethylene - Correlation with the magnetic and optical behavior*, *Vacuum* **171** (2020) 109016.-109024. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109016>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042207X19322705>

2. Danilo Kisić, Miloš Nenadović, Tanja Barudžija, Pavol Noga, Dušan Vaňa, Martin Muška, Zlatko Rakočević, *Modification of polyethylene's surface properties by high fluence Fe implantation*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **462** (2020) 143.–153. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.11.022>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X19307761>

#### Д. Закључак Комисије

На основу презентованих резултата у дисертацији и датих оцена о њима у овом Извештају, Комисија је закључила да су резултати кандидата Данила Кисића, мастер физикохемичара, приказани у оквиру докторске дисертације, оригинални и да ће имати значајан научни допринос у областима физичке хемије агрегатних стања и физике чврстог стања. Део резултата ове докторске дисертације објављен је у виду два рада у истакнутим међународним часописима (M22).

На основу свега изложеног, Комисија позитивно оцењује докторску дисертацију кандидата Данила Кисића, мастер физикохемичара под насловом:

**„Утицај јонске имплантације гвожђа на површинска, електрична и магнетна својства полиетилена велике густине“**

и предлаже Наставно-научном већу Факултета за физичку хемију Универзитета у Београду да дисертацију прихвати и одобри њену јавну одбрану, чиме би били испуњени сви услови да кандидат стекне звање доктор физичкохемијских наука.

Београд, .09.2020. године

Чланови комисије:

---

Др Боривој Аднађевић, редовни професор  
Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију

---

Др Милош Ненадовић, научни сарадник  
Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча”

---

Др Никола Цвјетићанин, редовни професор  
Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију