

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидаткиње Милице Будимир, мастер инжењера електротехнике и рачунарства.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5040/15-3 од 24.03.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње Милице Будимир под насловом:

**Модификација угљеничних нанокомпозита електромагнетним зрачењем  
за биомедицинску примену**

**(Modification of carbon nanocomposites by electromagnetic radiation  
for biomedical application)**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидаткињом, Комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидаткиња Милица Будимир је школске 2015-2016 године уписала докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Нуклеарна, медицинска и еколошка техника. Положила је све испите са просечном оценом 9,80 и испунила све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене планом и програмом Електротехничког факултета.

Кандидаткиња је започела истраживачки рад на тему антибактеријских нанокомпозита и њихове модификације електромагнетним зрачењем, под руководством доц. др Милоша Вујисића, ментора за студијски истраживачки рад. Кандидаткиња је 2016. године добила стипендију Владе Француске за докторске студије у коменторству и у фебруару 2017. године потписан је Споразум о коменторству између Универзитета у Београду и Универзитета у Лилу, Француска. Од тада, кандидаткиња је провела укупно 16 месеци у периоду од новембра 2016. до августа 2019. године, на Институту за електронику, микроелектронику и нанотехнологију у Лилу, где је спроведен део експеримената у оквиру докторске дисертације кандидаткиње, под руководством др Rabah Boukherroub. Тему докторске дисертације, под насловом „Модификација угљеничних нанокомпозита електромагнетним зрачењем за биомедицинску примену“ кандидаткиња је пријавила Комисији за студије трећег степена 01.03.2018. године.

Комисија за студије трећег степена је на седници одржаној 06.03.2018. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће је на предлог Комисије за студије трећег степена, именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (одлука бр. 5040/15-1 од 21. марта 2018.) у следећем саставу:

1. др Јован Цветић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду
2. др Биљана Тодоровић Маковић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке Винча
3. др Милица Јанковић, доцент, Електротехнички факултет у Београду

За менторе докторске дисертације предложени су др Милош Вујисић, доцент, Електротехнички факултет у Београду и др Rabah Boukherroub, научни директор, Институт за електронику, микроелектронику и нанотехнологију (ИЕМН), Лил, Француска.

Јавна усмена одбрана одржана је на Електротехничком факултету дана 26.03.2018. године. На одбрани су били присутни сви чланови Комисије. Кандидаткиња је тему своје докторске дисертације изложила у виду презентације, а потом успешно одговорила на сва постављена питања и показала одлично владање проблематиком која је тема докторске дисертације, на основу чега је на јавној усменој одбрани предложене теме добила оцену „задовољно“.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на седници одржаној 12.06.2018. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидаткиње Милице Будимир (Одлука бр. 5040/15-2 од 12. јуна 2018.).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је на седници одржаној 25.06.2018. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације Милице Будимир, под насловом „Модификација угљеничних нанокомпозита електромагнетним зрачењем за биомедицинску примену” (број 61206-2720/2-18 од 25.06.2018. године).

Кандидаткиња је предала докторску дисертацију на преглед и оцену 20.02.2020. године. Комисија за студије трећег степена је на седници одржаној 03.03.2020. године потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће је именовало Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (одлука бр. 5040/15-3 од 24.03.2020.) у следећем саставу:

1. др Милош Вујисић, доцент, (ментор), Електротехнички факултет у Београду
2. др Rabah Boukherroub, научни директор, Институт за електронику, микроелектронику и нанотехнологије (ИЕМН), Лил, Француска), (ментор)
3. др Милан Тадић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду
4. др Биљана Тодоровић Марковић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке „Винча“
5. др Amitav Sanyal, редовни професор, Универзитет Богазици, Истанбул
6. др Зденко Шпиталски, виши научни сарадник, Полимерни Институт, Словачка академија наука, Братислава

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехника и рачунарство и ужој научној области Електротехнички материјали и технологије (Угљенични наноматеријали модификовани зрачењем), за коју је матичан Електротехнички факултет. Ментори докторске дисертације су др Милош Вујисић, доцент Електротехничког факултета у Београду и др Rabah Boukherroub, научни саветник Института за електронику, микроелектронику и нанотехнологију у Лилу. Оба ментора су аутори бројних научних и стручних радова из уже научне области којој припада дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Милица Будимир рођена је у Ћуприји 24.02.1988. године. Тринаесту београдску гимназију завршила је 2006. године, а дипломирала је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду маја 2013. године, на Одсеку за физичку електронику. Мастер студије завршила је на Електротехничком факултету 2014. године на смеру Наноелектроника и фотоника, са темом „АФМ микроскопија бактерија третираних наночестицама”.

Од децембра 2012. године волонтирала је, а затим била стипендиста Лабораторије за радијациону хемију и физику, Института за нуклеарне науке „Винча”, у оквиру Групе за физику и хемију угљеничних наноматеријала, где је и урадила експериментални део свог дипломског и мастер рада. Од марта 2015. запослена је на Институту за нуклеарне науке „Винча”.

Милица Будимир уписала је докторске студије на Електротехничком факултету 2015. године на модулу Нуклерна, медицинска и еколошка техника. Од 2016. године је стипендиста Владе Француске за докторске студије у коменторству између Универзитета у Лилу и Универзитета у Београду. У оквиру ове сарадње докторанткиња је боравила 16 месеци на Институту за електронику, микроелектронику и нанотехнологију, Универзитета у Лилу, где је спровела део свог истраживања и стекла услов за одбрану докторске дисертације у коменторству.

Студијски истраживачки рад Милице Будимир припада научној области угљеничних наноматеријала и њихове примене у биомедицини и екологији. Током докторских студија бави се синтетисањем угљеничних наноматеријала и њихових нанокмпозита са различитим полимерима, испитивањем структурних особина ових материјала, као и промена њихових особина под дејством електромагнетног зрачења, а затим и њиховим антибактеријским својствима.

У свом досадашњем раду Милица Будимир има 20 објављених радова у међународним часописима, од чега 10 радова у часописима категорије M21, 7 радова у категорији M22, 3 рада у категорији M23, као и једно поглавље књиге. На два рада која су у директној вези са истраживањем у докторској дисертацији је први аутор, као и у поглављу књиге. Учествовала је на 4 међународне конференције.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Модификација угљеничних нанокмпозита електромагнетним зрачењем за биомедицинску примену” написана је на енглеском језику, а апстракт је написан на енглеском, српском и француском језику. Дисертација је написана на

100 страна куцаног текста (114 са прилозима) и садржи 46 слика, 8 табела и листу од 316 референци. Текст дисертације је организован у два дела - уводни и експериментални, који се састоје од следећих седам поглавља:

Први део: Увод

1. Антимикробна отпорност
2. Угљенични материјали
3. Полимери
4. Гама зрачење

Други део: Експерименти

5. Редуковани графен оксид/полиетиленмин нанокомполит за ефикасну фототермалну аблацију бактерија и биофилмова
6. Антибактеријска активност гама озраченог нанокомполита угљеничне квантне тачке/полиуретан
7. Закључак

Дисертација садржи и стране које нису нумерисане, као што су три насловне стране, страна са подацима о менторима и члановима комисије, захвалница на енглеском језику, резиме на сва три језика и садржај. Поред тога, на крају рада се налази и биографија кандидаткиње, као и неопходне изјаве (Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије рада и Изјава о коришћењу).

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу, како би се објаснио значај и потреба за дизајнирањем антибактеријских материјала, прво је дат увод у основне појмове попут грам-позитивних, грам-негативних бактерија и биофилмова, као и појам антибиотске резистенције. Ово поглавље се састоји од неколико потпоглавља. У првом потпоглављу дато је објашњење појма биофилма и механизма његовог формирања. Објашњен је појам болничких инфекција до којих долази услед формирања биофилма на различитим површинама, попут имплантата и других површина које су у блиском контакту с пацијентом. Истакнут је значај спречавања овакве врсте бактеријских инфекција. У другом потпоглављу дат је приказ развоја антибиотика кроз историју, како би се боље разумела антибиотска отпорност, која представља велики проблем модерне науке. Представљен је значај наноматеријала који се користе у различите антимикробне сврхе, као алтернатива антибиотицима, и другим дезинфицијенсима у системима за пречишћавање вода, као и у дизајнирању различитих антибактеријских материјала и површна. У трећем потпоглављу објашњени су појмови фотодинамичке и фототермалне терапије, а затим дат преглед литературе, са досадашњим резултатима постигнутим у области примене фотодинамичке и фототермалне терапије у третману бактеријских инфекција.

У другом поглављу дат је преглед угљеничних наноматеријала. Акцент је стављен на графен и угљеничне квантне тачке, као два представника угљеничних наноматеријала који су коришћени у експерименталном делу дисертације. Прво потпоглавље се односи на графен, његове особине, начине синтезе и примену. Дат је детаљан преглед литературе о примени графена у антибактеријске сврхе, самостално или у облику нанокомполитних материјала. Друго потпоглавље се односи на угљеничне квантне тачке, начине њихове синтезе, особине и примене. Посебно је дат преглед литературе о примени угљеничних квантних тачака у антимикробне сврхе.

Треће поглавље представља кратак теоријски увод у полимере, њихове особине и примену, са посебним освртом на полиетиленимин и полиуретан, као два представника који су коришћени у експерименталном делу дисертације.

Четврто поглавље обрађује гама зрачење, као вид електромагнетног зрачења које је коришћено за модификацију материјала у другом експерименту дисертације. Описани су интеракција и ефекти гама зрака на различите материјале, уз посебан осврт на ефекте у материјалима који су предмет дисертације и могућност примене гама зрака у модификацији ових материјала.

У петом поглављу представљен је први материјал који је дизајниран у оквиру израде докторске дисертације. Он се састоји од флексибилног нанокompозита који сачињавају: подлога од каптона прекривеног златним наносупљинама (Au Nanoholes - Au NH), који је затим прекривен танким слојем редукованог графен-оксид/полиетиленимина (K/Au NH/rGO/PEI). У овом експерименту фокус је на фототермалном ефекту. Плазмонична структура Au NH је прилагођена тако да има јаку апсорпцију у блиској инфрацрвеној области, док је полимер полиетиленимин (PEI) коришћен због способности јаког везивања бактерија уз помоћ електростатичких интеракција. K/Au NH/rGO/PEI композит је достигао температуре од 70°C током током 10 минута зрачења ласером у блиској инфрацрвеној области. Ова температура била је довољна да ефикасно уништи грам позитивне *Staphylococcus aureus* и грам негативне *Escherichia coli* бактерије, као и бактеријске биофилмове. Добијени нанокompозит је карактерисан бројним методама: скенирајућом електронском микроскопијом (SEM), Раманском спектроскопијом, UV-vis спектрометријом, инфрацрвеном спектроскопијом са Фуријеовом трансформацијом (FTIR) и фотоелектронском спектроскопијом X зрацима (XPS), а такође су извршена мерења контактнoг угла и фототермална мерења, као и експерименти цитотоксичности.

У шестом поглављу описан је композит полимера полиуретана који је допиран хидрофобним угљеничним квантним тачкама. У фокусу овог експеримента је фотодинамички ефекат, до ког долази кад се нанокompозит осветли плавом лампом (таласне дужине светлости од 470 nm), јер тада угљеничне квантне тачке почињу да производе реактивне кисеоничне врсте. Овај нанокompозит је модификован гама зрачењем различитих доза и испитане су промене физичко-хемијских карактеристика нанокompозита као и његове антибактеријске особине. Бројне методе карактеризације су коришћене како би се испитале физичке и хемијске особине нанокompозита (UV-vis спектрометрија, FTIR, фотоелектронска спектроскопија X зрацима (XPS), контактни угао, микроскопија атомских сила, фотолуминесцентна спектроскопија, динамичке механичке особине, одређивање реактивних кисеоничних врста). Установљено је да су нанокompозити након модификација гама зрачењем имали побољшане антибактеријске особине, у поређењу са неозраченим нанокompозитом.

Седмо поглавље је закључак, изведен на основу представљених резултата истраживања.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Контаминација бактеријама је веома распрострањен проблем који утиче на много различитих аспеката свакодневног живота, међу којим су најзначајнији здравство, системи за пречишћавање воде и чување хране. Традиционалне антибактеријске терапије су постале мање ефикасне, услед неадекватне употребе и одлагања неискоришћених антибиотика, што је довело до мутација бактерија и резултовало појавом многобројних антибиотски отпорних

врста. Болничке инфекције су најчешће последица бактеријске колонизације различитих биомедицинских површина, укључујући и имплантате. У развијеним земљама, смрт услед компликација изазваних болничким инфекцијама је шести по реду узрок смрти, док је у земљама у развоју још више на лествици. Такође, када је реч о води и системима за пречишћавање воде, према подацима светске здравствене организације данас око 829 000 људи годишње умре услед последица изазваних небезбедном пијаћом водом. Ови подаци истичу важност налажења нових, ефикасних и безбедних средстава за дезинфекцију, као и нових материјала који би спречили бактеријску колонизацију биоматеријала. Сходно томе, циљ ове дисертације био је развијање два различита нанокompозита на бази угљеника и полимера који испољавају одлична антибактеријска својства кроз два различита ефекта: фотодинамички и фототермални. До сада није потврђено да бактерије могу ефикасно да развију отпорност на фотодинамичку и фототермалну терапију.

Тема којом се дисертација бави је веома актуелна и захтева мултидисциплинарност у приступу. У поменутих нанокompозитима користе се угљенични наноматеријали, графен и угљеничне квантне тачке, који су у последњих десет година у самом врху истраживања науке о материјалима. Оригиналност дисертације је у комбиновању различитих особина полимера и угљеничних наноматеријала, као и метода њихове модификације, у циљу постизања повољнијих особина и високе антибактеријске активности нанокompозита која је универзалана, јер се може применити на различите микроорганизме. Оригиналност дисертације је потврђена и објављивањем два научна рада у врхунским међународним часописима, који директно произилазе из дисертације.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература која је коришћена у дисертацији садржи најновије радове који су релевантни за област наноматеријала, али и класичне радове и књиге о графену, полимерима, гама зрачењу и другим темама релевантним за дисертацију. Број референци на крају дисертације (укупно 316) указује да је кандидаткиња темељно и широко упозната с научном облашћу коју је обрадила у дисертацији.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру предложене докторске дисертације је обухватала следеће фазе:

- Размарање теоријских основа и различитих механизма деловања наноматеријала на микроорганизме;
  - Анализа постојећих радова на тему дејства наночестица и нанокompозита на микроорганизме, као и уочавање предности и недостатака различитих материјала;
  - Планирање и концептуално дизајнирање нанокompозита;
  - Синтеза и карактеризација редуковани графен оксид/полиетиленимин нанокompозита;
  - Дeпoнoвaње редуковани графен оксид/полиетиленимин нанокompозита на златне наночестице/каптон подлогу;
  - Физичко-хемијске карактеризације добијеног материјала;
  - Испитивање његових фототермалних и антибактеријских особина под дејством континуалног ласера у инфрацрвеној области;
  - Испитивање цитотоксичности нанокompозита.
- 
- Синтеза хидрофобних квантних тачака поступком кондензације из полимера Плуроник 68;
  - Допирање полимера полиуретана хидрофобним квантним тачкама поступком умакања;

- Модификација синтетисаног нанокompозита гама зрачењем различитих доза;
- Физичко-хемијске карактеризације добијеног нанокompозита и испитивање утицаја гама зрачења на особине нанокompозита;
- Испитивање антибактеријских особина гама-озрачених нанокompозита и тестови биокомпатибилности (цитотоксичност и пролиферација ћелија).

Испитивања у оба спроведена експеримента подразумевају примену низа стандардних метода које се срећу у карактеризацији наноматеријала, попут микроскопије атомских сила, скенирајуће електронске микроскопије, фотоелектронске спектроскопије X зрацима, Раманске спектроскопије, UV-vis спектроскопије, инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом, електронске парамагентне резонанце, фотолуминесцентне спектроскопије, мерења контактнoг угла, мерења термалних карактеристика инфрацрвеном камером, различитих антибактеријских тестова, као и тестова цитотоксичности.

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научно-истраживачког рада у области наноматеријала и у сагласности је са циљевима дефинисаним на почетку израде дисертације.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Први од два дизајнирана и синтетисана нанокompозита, који се састоји од флексибилног редуковани графен оксид/полиетиленимин нанокompозита на подлози од каптона, има потенцијалну примену у биомедицини, индустрији или системима за пречишћавање вода. Када се потопи у воду, поменути нанокompозит ефикасно привлачи бактерије и задржава их на својој површини, а затим их врло ефикасно уништава под дејством инфрацрвеног ласера. Уништавање бактерија је ефикасно и неповратно, јер долази до потпуног уништења ћелијске мембране бактерија услед високе температуре подлоге (70°C). Ова метода је показала високу ефикасност и у уништавању биофилмова.

Други нанокompозит, гама озрачен угљеничне квантне тачке/полиуретан нанокompозит, има примену у дизајну различитих антибактеријских материјала за примену у биомедицини. Површине у болницама и операционим салама су стално изложене бактеријама. Често се за стерилизацију користи UV светлост, али овај вид стерилизације није увек изводљив и практичан, због штетног дејства UV зрачења на човека. Синтетисани нанокompозит испољава антибактеријска својства већ кад је озрачен плавом светлосћу из видљивог дела спектра. Површине се, дакле, помоћу њега могу одржавати стерилним лако и ефикасно. Такође, након пред-третмана гама зрачењем, нанокompозити испољавају знатно побољшана антибактеријска својства и добру биокомпатибилност. То чини ове нанокompозите потенцијално применљивим и у дизајну појединих биоматеријала, попут катетера.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидаткиња је током израде дисертације показала способност да систематично приступи проучавању актуелних достигнућа из области у којој спроводи истраживања, да потом, уз дискусије са менторима, конципира основни дизајн нанокompозита, као и да осмисли оригиналне модификације овог дизајна у циљу поспешивања њихових антибактеријских својстава. Испољила је умешност у извођењу експеримената и на креативан начин је решавала проблеме на које је наишла. Овладала је различитим техникама карактеризације материјала, међу којима су технике којима је имала приступ у Србији, у Институту за нуклеарне науке „Винча”, као и технике које је имала могућност да савлада на Институту за електронику, микроелектронику и нанотехнологију у Француској. Област којом се дисертација бави је мултидисциплинарна и захтева широко знање из области науке о

материјалима, физике, хемије и микробиологије. Кандидаткиња је показала способност да усвоји и примени мултидисциплинаран начин размишљања и решавања проблема.

Кандидаткиња је аутор/коаутор на 20 радова у часописима са SCI листе, од чега је први аутор на 2 рада и на једном поглављу књиге, који су у директној вези са дисертацијом. Као први аутор учествовала је на три међународне конференције, чиме је показала способност да презентује свој рад широј научној заједници.

#### **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

##### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- По први пут је развијен и припремљен флексибилан нанокомпозит који се састоји од каптона модификованог златим наношупљинама, на који је депонован танак филм који сачињавају редуковани графен оксид/полиетиленимин;
- Испитивањем физичко-хемијских особина овог нанокомпозита показано је да има изузетно добре фототермалне особине кад се озрачи ласером у блиској инфрацрвеној области, а тиме и способност уништавања грам-позитивних и грам-негативних бактерија, као и биофилмова;
- Гама зрачењем различитих доза је модификован нанокомпозит који сачињавају угљеничне квантне тачке и полиуретан;
- Идеја о модификацији гама зрачењем овакве врсте нанокомпозита је први пут примењена;
- Испитивањем физичко-хемијских и антибактеријских особина овог нанокомпозита, након излагања различитим дозама гама зрачења, доказано је да су антибактеријске особине нанокомпозита значајно побољшане.

Основни научни допринос који даје ова докторска дисертације је дизајн два нова нанокомпозита на бази полимера и угљеничних наноматеријала. Комбиновањем особина различитих материјала као и примена различитих метода модификације у циљу добијања повољнијих особина, дали су потпуно нове резултате који унапређују научну област нанокомпозитних материјала. Оба материјала показују одлична антибактеријска својства кроз два различита ефекта и кроз примену две врсте електромагнетног зрачења. Такође, оба нанокомпозита имају ниску цитотоксичност и потенцијалну примену биомедицини.

##### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Први материјал представљен у дисертацији користи фототермални ефекат као методу уништавања бактерија, што је велика предност у односу на друге бактерицидне технике, јер бактерије до сада нису показале могућност да развију отпорност на високе температуре. Такође, ова метода је универзална и ефикасна у случају различитих врста бактерија, јер позитивно наелектрисане аминок групе на површини нанокомпозита привлаче готово све бактерије, с обзиром да већина бактеријских сојева поседује негативно наелектрисану мембрану. Комбинација овог нанокомпозита и ласера у блиској инфрацрвеној области успешно уништава биофилм, што је резултат који се ретко среће чак и у најскоријим радовима у овој области.

У другом експерименту, основна предност развијеног нанокомпозита над другим материјалима представљеним у литератури је што се реактивне кисеоничне врсте активирају



већ при употреби видљиве светлости плаве лампе, чиме је отклањена потреба за применом потенцијално штетног UV зрачења. У многим другим наночестицама фотодинамички ефекат захтева употребу UV светлости. Такође, излагањем гама зрачењу знатно је побољшана продукција реактивних кисеоничних врста, чиме су унапређена антибактеријска својства нанокompозита.

Истраживања изложена у овој дисертацији изнедрила су релевантне нове резултате, који чине значајан корак у просперитетној научној области антимикуробних наноматеријала, што је верификовано кроз два научна рада публикована у естаблираним међународним часописима. Уз практична будућа побољшања у погледу једноставности дизајна, смањења трошкова израде и испитивања ширег спектра микроорганизама, резултати истраживања представљени у дисертацији отварају перспективу за примену описаних материјала, као и за дизајнирање и тестирање нових материјала на бази поступака синтезе и модификације освојених и верификованих током израде дисертације.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

##### Категорија M21:

1. **Budimir M.**, Jijie R., Ye R., Barras A., Melinte S., Silhanek A., Markovic Z., Szunerits S., Boukherroub R.: Efficient capture and photothermal ablation of planktonic bacteria and biofilms using reduced graphene oxide-polyethyleneimine flexible nanoheaters. *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 7, no. 17, pp. 2771-2781, 2019 (IF=5.047) (ISSN 2050-7518).

##### Категорија M22:

1. **Budimir M.**, Marković Z., Jovanović D., Vujisić M., Mičušík M., Danko M., Kleinová A., Švajdlenková H., Špitalský Z., Todorović Marković B.: Gamma ray assisted modification of carbon quantum dot/polyurethane nanocomposites: Structural, mechanical and photocatalytic study, - *RSC Advances*, vol. 9, no. 11, pp. 6278-6286, 2019 (IF=3.049) (ISSN 2046-2069).

##### Категорија M33:

1. **Budimir M.**, Kleut D., Boukherroub R., Todorovic Markovic B.: Reduced graphene oxide-chitosan flexible nanocomposites for efficient bacteria capture and photothermal ablation, - *Resolution and discovery*, accepted for publication in February 2019 (ISSN 2498-8707).

##### Поглавље књиге:

**Budimir M.**, Markovic Z., Szunerits S., Boukherroub R.: Nanomaterials for Sustainable Energy and Environmental Remediation - Chapter 9: *Nanoscale materials for the treatment of water contaminated by bacteria and viruses*, Materials Today, Elsevier 2020, pp. 261-305.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Докторска дисертација кандидаткиње Милице Будимир, која је резултат вишегодишњег рада и сарадње Универзитета у Београду и Универзитета у Лилу, представља савремени допринос области наноматеријала. Дисертација је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе које захтева Правилник о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Текст дисертације, који је написан на енглеском језику, је разумљив и добро организован. Тема дисертације је актуелна и савремена, а њен научни допринос чине два нова нанокompозитна материјала са одличним антибактеријским својствима, који имају потенцијалну примену у биомедицини. Спроведено истраживање је високог квалитета, што

је и потврђено публикацијама у међународним часописима са анонимном рецензијом минимум два експерта из области. Кандидаткиња је показала научну зрелост и способност за самосталан научни рад.

Кандидаткиња Милица Будимир је испунила све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета у Београду. Такође је испунила све услове за одбрану докторке дисертације на Универзитету у Лилу, смер - Наука за инжењере.

На основу свега наведеног, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Модификација угљеничних наноконтрола електромагнетним зрачењем за биомедицинску примену” кандидаткиње **Милице Будимир** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 18.05.2020. године

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



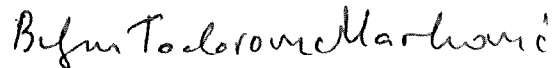
др Милош Вујисић, доцент  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Rabah Boukherroub, научни директор  
Универзитет у Лилу - Институт за електронику, микроелектронику и нанотехнологију



др Милан Тадић, редовни професор  
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



др Биљана Тодоровић Марковић, научни саветник  
Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке Винча



др Amitav Sanyal, редовни професор  
Univerzitet Bogazici, Истанбул



др Zdenko Špitalsky, виши научни сарадник  
Полимерни Институт, Словачка академија наука, Братислава

TO THE ACADEMIC COUNCIL

**Subject:** Report on the completed doctoral dissertation of candidate Milica Budimir.

By the Decision of the Academic Council of the School of Electrical Engineering, Reg. No. 5040/15-3 from March 24<sup>th</sup>, 2020, we have been appointed members of the Commission for examination, evaluation, and defense of the doctoral dissertation of candidate Milica Budimir, with the title:

**Modification of carbon nanocomposites by electromagnetic radiation  
for biomedical application**

After the examination of the submitted thesis, and accompanying material, and after the interview with the candidate, the Commission made the following

**R E P O R T**

**1. INTRODUCTION**

1.1. Chronology of the dissertation approval and preparation

The candidate enrolled in doctoral studies at the School of Electrical Engineering in 2015/2016 at the module Nuclear, medical and Ecological Engineering. She passed all the exams with an average grade of 9.80 and fulfilled all the obligations related to the study research work stipulated by the plan and program of the School of Electrical Engineering.

The candidate started her research work on antibacterial nanocomposites and methods of their modification by electromagnetic irradiation, under the supervision of Dr. Milos Vujisic, Assistant Professor. In 2016 the candidate received a scholarship of the French Government for the Joint supervision studies, and in February 2017 an Agreement on the Joint supervision was signed between the University of Belgrade and the University of Lille. Since then, the candidate has spent a total of 16 months in the period between November 2016 and August 2019, at the Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology (IEMN) in Lille, where a part of the experimental work for the thesis was conducted under the supervision of Dr. Rabah Boukherroub, Research Director. The candidate submitted the topic of the thesis entitled "Modification of carbon nanocomposites by electromagnetic radiation for biomedical application" to the Commission for the third-level studies at the School of Electrical Engineering on March 1<sup>st</sup>, 2018.

The Commission for third-level studies considered the proposal of the thesis topic for the dissertation preparation at the session held on March 6<sup>th</sup>, 2018, and forwarded the proposal of the Commission for the evaluation of the suitability of the topic and the Candidate to the Academic Council.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering appointed the Commission for the evaluation of conditions and acceptance of the doctoral dissertation topic at the session held on March 21<sup>st</sup>, 2018 (the Decision No. 5040/15-1, from March 21<sup>st</sup>, 2018) composed of:

1. Dr. Jovan Cvetic, Full Professor, School of Electrical Engineering
2. Dr. Biljana Todorovic Markovic, Scientific Advisor, Vinca Institute of Nuclear Sciences
3. Dr. Milica Jankovic, Assistant Professor, School of Electrical Engineering

As supervisors of the doctoral dissertation Dr. Milos Vujisic, Assistant Professor, School of Electrical Engineering and Dr. Rabah Boukherroub, Research Director, Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology (IEMN), were proposed.

Public oral presentation of a candidate's topic of the dissertation and her scientific progress was held at the School of Electrical Engineering on March 26<sup>th</sup>, 2018. All members of the Commission were present at the presentation. The candidate presented the topic of her doctoral dissertation and her progress, and then successfully answered all the questions of the Commission members. Finally, she received a grade of "satisfying" at the public oral defense.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering adopted the Report of the Commission for the evaluation of conditions and acceptance of the doctoral dissertation topic of the candidate Milica Budimir (the Decision No. 5040/15-2 from June 12<sup>th</sup>, 2018).

The Council of Technical Sciences of the University of Belgrade, at the session held on June 25<sup>th</sup>, accepted the proposal of the doctoral dissertation topic entitled "Modification of carbon nanocomposites by electromagnetic radiation for biomedical application" (No. 61206-2720/2-18 from June 25<sup>th</sup>, 2018).

The candidate submitted the doctoral dissertation for evaluation on February 20<sup>th</sup>, 2020. The Commission for the third-level studies confirmed the fulfillment of all the necessary conditions for submitting the proposal to the Academic Council of the School of Electrical Engineering to form the Commission for examination and evaluation of the doctoral dissertation.

The Academic Council of the School of Electrical Engineering appointed the Commission for examination and evaluation of the doctoral dissertation (decision No. 5040/15-3 from March 24<sup>th</sup>, 2020), composed of:

1. Dr. Milos Vujisic, Assistant Professor (supervisor), School of Electrical Engineering, University of Belgrade, Serbia
2. Dr. Rabah Boukherroub, Research Director (supervisor), Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology (IEMN), University of Lille, France
3. Dr. Milan Tadic, Full Professor, School of Electrical Engineering, University of Belgrade, Serbia
4. Dr. Biljana Todorovic Markovic, Scientific Advisor, Vinca Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Serbia
5. Dr. Amitav Sanyal, Full Professor, University Bogazici, Istanbul, Turkey
6. Dr. Zdenko Špitalsky, Assistant Professor, Polymer Institute, Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia

## 1.2. The scientific field of the doctoral dissertation

The doctoral dissertation belongs to the scientific field of Electrical and Computer Engineering, and to the narrower scientific field of Materials Science in Electrical Engineering (Radiation modified carbon nanomaterials), for which the School of Electrical Engineering and Doctoral School Science for Engineers at the University of Lille are specialized. The mentors of the doctoral dissertation are Dr. Miloš Vujisić, Assistant Professor at the School of Electrical Engineering in Belgrade, and Dr. Rabah Boukherroub, Research Director at the Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology in Lille. Both mentors are authors of numerous scientific papers in the leading international journals.

## 1.3 Biography of the Candidate

Milica Budimir was born on February 24<sup>th</sup>, 1988 in Čuprija, Serbia. In May 2013, she has graduated from the University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Department – Physical Electronics: Nanoelectronics and Photonics. She finished her Master's studies in 2014, at the School of Electrical Engineering with the master thesis "AFM microscopy of bacteria treated with nanoparticles".

In January 2013, she started working as an intern at the Vinča Institute of Nuclear Sciences, in the Laboratory for Radiation Chemistry and Physics, within the Carbon Nanomaterials Group, where she performed the experimental part of her Master thesis. In March 2015, she started working as a Research Assistant at "Vinca" Institute of Nuclear Sciences.

She started her Ph.D. studies in 2015, at the School of Electrical Engineering, the module for Nuclear, Biomedical, and Ecological Engineering. In 2016, she was granted with Scholarship of the French Government for co-tutorial Ph.D. studies between the University of Lille - Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology (IEMN) and University of Belgrade - School of Electrical Engineering. She has spent 16 months in Lille, working at the Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology (IEMN), where she performed one experimental part of her thesis.

Her research interest is in the field of carbon nanomaterials and their biomedical and ecological application. During her doctoral studies, she has been working on the synthesis of carbon nanomaterials and their nanocomposites with different polymers, characterization of these materials, and their antibacterial applications.

Milica Budimir was a co-author of 20 articles and one book chapter. She was the first author of two papers, which are directly connected to the thesis, and she was a participant at four International Conferences.

## **2. DESCRIPTION OF THE DISSERTATION**

### 2.1. Dissertation content

A doctoral dissertation entitled "Modification of carbon nanocomposites by electromagnetic radiation for biomedical application" is written in English, and the abstract is written in Serbian, English, and French language. The dissertation contains 100 pages, 46 figures, 8 tables, and 316 references. The text is organized in 2 parts - Introduction and Experiments, which are organized in the following seven chapters:

## Part I: Introduction

1. Antimicrobial Resistance
2. Carbon nanomaterials
3. Polymers
4. Gamma radiation

## Part II: Experiments

5. Reduced graphene oxide/polyethylenimine flexible nanoheaters for efficient capture and photothermal ablation of bacteria and biofilms
6. Antibacterial activity of gamma-irradiation pre-treated carbon quantum dots/polyurethane nanocomposites
7. Conclusion

The thesis contains pages without enumeration such as the Title pages, the page with information about supervisors and jury members, Abstracts in Serbian, English, and French, Acknowledgements, and the Table of Contents. The last chapter is followed by the References, candidate's biography, and necessary statements.

### 2.2. A brief overview of thesis chapters

In the first chapter, in order to explain the importance and need for designing antibacterial materials, some of the basic concepts such as Gram-positive, Gram-negative bacteria and biofilms, as well as the concept of antibiotic resistance, are explained. This chapter consists of several subchapters. The first subchapter explains the concept of biofilm as well as the mechanism of its formation. The notion of nosocomial infections that occur due to the formation of biofilm on various surfaces such as implants, but also other surfaces that are in close contact with the patient, is explained. The importance of preventing this type of bacterial infection was emphasized. The second subchapter presents the development of antibiotics throughout history, with the idea to better understand antibiotic resistance, which presents a major problem of modern science. The potential of using nanomaterials for various antimicrobial purposes, as an alternative to antibiotics and other disinfectants in water purification systems, but also in the design of various antibacterial surfaces, is highlighted. The third subchapter explains the concepts of photodynamic and photothermal therapy, their role in the treatment of bacterial infections, and gives an overview of the literature with the new achievements in this field.

The second chapter provides an overview of carbon nanomaterials, emphasizing graphene, and carbon quantum dots, as two representatives of carbon nanomaterials used in the experimental part of the thesis. The first subchapter refers to graphene, its properties, methods of synthesis, and application. A detailed overview of the literature on the application of graphene for antibacterial purposes is given. The second subchapter refers to carbon quantum dots, methods of their synthesis, properties, and applications. Again, an overview of the literature on the application of carbon quantum dots as antimicrobial agents is given.

The third chapter presents a brief introduction to polymers, their properties, and applications, with special attention to polyethylenimine and polyurethane, as the two representatives used in the experimental part of the dissertation.

The fourth chapter deals with gamma radiation, as a type of electromagnetic radiation that was used to modify the material in the second experiment of the thesis. The interaction and effects of gamma radiation on different materials are described, with a detailed literature overview.

The fifth chapter presents the first material designed as part of the doctoral dissertation. It consists of a flexible Kapton interface modified with gold nanoholes (Au NH) substrate, coated with reduced graphene oxide-polyethyleneimine thin films (K/Au NH/rGO-PEI). In this experiment, the photothermal (PTT) effect is exploited. The Au NH plasmonic structure was designed to feature strong absorption in the near-infrared (NIR) region, where most of the biological matter has limited absorption, while PEI was selected for its strong ability of binding with bacteria through electrostatic interactions. The K/Au NH/rGO-PEI device was demonstrated to capture and eliminate effectively both planktonic Gram-positive *Staphylococcus aureus* and Gram-negative *Escherichia coli* bacteria after 10 min of NIR (980 nm) irradiation and even more to destroy and eradicate *Staphylococcus epidermidis* biofilms after 30 min irradiation. The obtained nanocomposite is characterized by numerous methods: Scanning Electron Microscopy (SEM), Raman spectroscopy, UV-vis spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) as well as antibacterial and cytotoxicity experiments.

The sixth chapter, presents an antibacterial hydrophobic carbon quantum dots/polyurethane nanocomposite (hCQD-PU), with improved antibacterial properties caused by gamma-irradiation pre-treatment. Here, the photodynamic (PDT) treatment of bacteria was applied. The hydrophobic carbon quantum dots (hCQDs), which can generate reactive oxygen species (ROS) upon irradiation with low power blue light (470 nm), were incorporated in the polyurethane (PU) polymer matrix, to form a photoactive nanocomposite. Different doses of gamma irradiation (1, 10, and 200 kGy) were applied to the formed nanocomposite in order to modify its physical and chemical properties and improve its antibacterial efficiency. Numerous characterization methods have been used to examine the physical and chemical properties of nanocomposites (UV-vis spectroscopy, FTIR, XPS, contact angle measurements, Atomic Force Microscopy (AFM), Photoluminescent Spectroscopy, Dynamic mechanical properties, determination of reactive oxygen species). It was found that after the modification by gamma pre-treatment, nanocomposites had improved antibacterial properties, compared to non-irradiated nanocomposite.

The seventh chapter is a conclusion based on the presented research results.

### **3. DISSERTATION EVALUATION**

#### 3.1. State-of-the-art and originality

Bacterial contamination is a very common problem that affects many different aspects of everyday life: health, water purification systems, food storage, etc. Traditional antibacterial therapies have become less effective, due to inadequate use and disposal of antibiotics, which has led to mutations in bacteria and resulted in the emergence of numerous antibiotic-resistant bacterial species. Nosocomial infections are most often the result of bacterial colonization of various biomedical surfaces, including implants. In developed countries, death due to complications caused by nosocomial infections is the sixth leading cause of death, while in developing countries it is even higher on the scale. Also, when it comes to water and water purification systems, according to the data of the World Health Organization, today about 829,000 people die every year due to the complications caused by unsafe drinking water. These alarming data highlight the importance of finding new, effective, and safe disinfectants, as well as new materials that would prevent bacterial colonization of biomaterials. Accordingly, the goal of this dissertation was to develop two different nanocomposites based on carbon and polymers, that exhibit excellent antibacterial properties through two different effects: photodynamic and photothermal. It has not yet been confirmed that bacteria can effectively develop resistance to photodynamic and photothermal therapy.

The topic of the dissertation is very up-to-date and requires a multidisciplinary approach. The mentioned nanocomposites are composed of carbon nanomaterials, graphene, and carbon quantum dots, which have been at the very top of materials science research in the last ten years. The originality of the dissertation is in combining different properties of polymers and carbon nanomaterials, as well as the method of their modification, in order to achieve more favorable properties and high antibacterial activity. The originality of the dissertation was confirmed by the publication of two scientific papers in leading international journals in the field of Materials Science.

### 3.2. Review of the used literature

The literature used in the dissertation contains the latest papers that are relevant to the field of nanomaterials, but also classic papers and books on graphene, polymers, gamma radiation, etc. The number of references at the end of the dissertation (316) indicates the candidate's thorough and broad insight into the scientific field of the dissertation.

### 3.3. Description and adequacy of applied scientific methods

The research methodology within the proposed doctoral dissertation included the following phases:

- Understanding of theoretical grounds and different mechanisms of action of nanomaterials on microorganisms;
  - Analysis of existing publications on the effect of nanoparticles and nanocomposites on microorganisms, as well as observing the advantages and disadvantages of different materials;
  - Planning and conceptual design of nanocomposites;
  - Synthesis and characterization of reduced graphene oxide/polyethyleneimine nanocomposites;
  - Deposition of reduced graphene oxide/polyethyleneimine nanocomposites on gold nanoholes/kapton substrate;
  - Physico-chemical characterization of the obtained material;
  - Examination of its photothermal and antibacterial properties under the irradiation of a continuous laser in the near-infrared region;
  - Cytotoxicity study.
- 
- Synthesis of hydrophobic quantum dots by condensation process from Pluronic 68 polymer;
  - Doping of polyurethane polymers with hydrophobic quantum dots by swell-encapsulation-shrink method;
  - Modification of the synthesized nanocomposite by gamma radiation of different applied doses;
  - Physico-chemical characterization of the obtained nanocomposite and examination of the influence of gamma-irradiation on the properties of nanocomposites;
  - Examination of antibacterial properties of gamma-irradiated nanocomposites and biocompatibility study (cytotoxicity and cell proliferation tests).

Analyses in both experiments involve the application of typical methods of characterization of nanomaterials, such as Atomic Force Microscopy (AFM), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-photoelectron Spectroscopy (XPS), Raman Spectroscopy, UV-vis Spectroscopy, Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Electron Paramagnetic Resonance (EPR), contact angle measurements, measurement of thermal characteristics by an infrared camera, various antibacterial tests, and cytotoxicity tests.

The applied methodology fully corresponds to the standards of scientific research work in the field of nanomaterials and is in accordance with the goals defined at the beginning of the dissertation preparation.



### 3.4. Applicability of dissertation results

The synthesized nanocomposite from the first experiment, which consists of a flexible reduced graphene oxide/polyethyleneimine nanocomposite deposited on a Kapton/gold nanoholes substrate, has potential application in biomedicine, industry or water purification systems. When immersed in water, the mentioned nanocomposite effectively attracts bacteria and keeps them on its surface, and then very effectively destroys them under NIR laser irradiation. The eradication of bacteria is efficient and irreversible because there is a total destruction of the cell membrane of bacteria due to the high temperature of the substrate (70°C). This method has shown high efficiency in the destruction of biofilms, as well.

The rapid and effective antibacterial activity, as well as UV to NIR region absorption property, might make K/Au NH/rGO-PEI antibacterial nanocomposite function even under normal solar light.

A nanocomposite from the second experiment, a gamma-irradiated carbon quantum dot/polyurethane nanocomposite has a potential in the design of various antibacterial materials for biomedicine. Different surfaces in hospitals and operating rooms are constantly exposed to bacteria. UV light is often used for sterilization, however, this type of sterilization is not always feasible and practical, due to the harmful effects of UV radiation on humans. The synthesized nanocomposite exhibits antibacterial properties even when irradiated with visible blue light. Thus, surfaces can be kept sterile very easily and efficiently. Also, after the pre-treatment with gamma irradiation, nanocomposites exhibited significantly improved antibacterial properties and good biocompatibility, which might make them potentially effective in the design of certain biomaterials, such as catheters.

### 3.5. Evaluation of candidate's ability for independent scientific work

During the preparation of the thesis, the candidate showed an ability to systematically study current achievements in her field of research, and then, through discussions with her mentors, to conceive the basic design of nanocomposites, as well as the idea for original modification methods of these nanocomposites, which improved their antibacterial properties. She showed the ability to independently perform experiments and solve problems creatively. The candidate mastered various material characterization techniques, including techniques she had access to in Serbia at the "Vinca" Institute of Nuclear Sciences, but also techniques she had the opportunity to use at the Institute of Electronics, Microelectronics, and Nanotechnology in France. The scientific field that the dissertation covers is multidisciplinary and requires broad knowledge in the field of materials science, physics, chemistry, and finally microbiology. The candidate showed the ability to embrace and apply a multidisciplinary way of thinking and solving problems.

The candidate is the author/co-author of 20 papers in scientific journals. She is the first author of 2 papers and one book chapter, which are directly related to the dissertation. As the first author, she participated in three international conferences, which proved her ability to present her work to the wider scientific community.

## 4. SCIENTIFIC CONTRIBUTION

### 4.1. Overview of the achieved results and their scientific contribution

The following scientific contributions were made within the doctoral dissertation:

- A flexible Kapton interface modified with gold nanoholes (Au NH) substrate and coated with reduced graphene oxide-polyethyleneimine thin films was prepared for the first time;
- It has been shown that the mentioned nanocomposite has exceptional photothermal properties when irradiated with a laser in the NIR region, and thus the ability to destroy Gram-positive and Gram-negative bacteria, and even biofilms.
- The nanocomposite consisting of carbon quantum dots/polyurethane has been modified by gamma radiation of different doses for the first time;
- The idea of using gamma radiation to modify such nanocomposites was applied for the first time;
- Physico-chemical properties of nanocomposites were examined after exposure to gamma radiation at different doses;
- The antibacterial properties of nanocomposites were significantly improved after gamma radiation.

The basic scientific contribution given by this doctoral dissertation is the design of two new nanocomposites based on polymers and carbon nanomaterials. By combining the properties of different materials, as well as the application of different modification methods in order to obtain more favorable properties, the thesis has given new results that improve the overall scientific knowledge in the field of nanocomposite materials. Both materials show excellent antibacterial properties through two different effects and the application of two types of electromagnetic radiation. Also, both nanocomposites have low cytotoxicity and potential application in biomedicine.

### 4.2. A critical approach to the research results

The first material presented in the dissertation uses the photothermal effect as a method of destroying bacteria, which is a great advantage because bacteria have not shown, so far, the ability to develop resistance to such high temperatures. Also, this method is universal and effective in the case of different types of bacteria, because positively charged amino groups on the surface of nanocomposites attract almost all bacteria (most bacterial strains have a negatively charged membrane). The combination of this nanocomposite and NIR laser successfully destroys biofilm, and papers presenting successful biofilm destruction are not so common in the literature.

In the second experiment, the main advantage of the developed nanocomposite over other materials presented in the literature is that reactive oxygen species are activated already when using a blue lamp, so visible light is used. Many other nanoparticles require the use of UV light that would trigger the photodynamic effect. Also, the use of gamma radiation has significantly improved the production of ROS, and thus the antibacterial properties of nanocomposites.

The research presented in this dissertation has yielded relevant new results, which make a significant step in the prosperous scientific field of antimicrobial nanomaterials. These results have been verified through two scientific papers published in renowned international journals. With possible future improvements in terms of simplicity of design, reduction of production costs, and testing of a wider range of microorganisms, the research results presented in the dissertation open a perspective for the application of the described materials, as well as for designing new materials based on the methods presented in the thesis.

### 4.3. Verification of the scientific contribution

#### Category M21:

1. **Budimir M.**, Jijie R., Ye R., Barras A., Melinte S., Silhanek A., Markovic Z., Szunerits S., Boukherroub R.: Efficient capture and photothermal ablation of planktonic bacteria and biofilms using reduced graphene oxide-polyethyleneimine flexible nanoheaters. *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 7, no. 17, pp. 2771-2781, 2019 (**IF=5.047**) (ISSN 2050-7518).

#### Category M22:

1. **Budimir M.**, Marković Z., Jovanović D., Vujisić M., Mičušík M., Danko M., Kleinová A., Švajdlenková H., Špitalský Z., Todorović Marković B.: Gamma ray assisted modification of carbon quantum dot/polyurethane nanocomposites: Structural, mechanical and photocatalytic study, - *RSC Advances*, vol. 9, no. 11, pp. 6278-6286, 2019 (**IF=3.049**) (ISSN 2046-2069).

#### Category M33:

1. **Budimir M.**, Kleut D., Boukherroub R., Todorovic Markovic B.: Reduced graphene oxide-chitosan flexible nanocomposites for efficient bacteria capture and photothermal ablation, - *Resolution and discovery*, accepted for publication in February 2019 (ISSN 2498-8707).

#### Book Chapter:

**Budimir M.**, Markovic Z., Szunerits S., Boukherroub R.: Nanomaterials for Sustainable Energy and Environmental Remediation – Chapter 9: *Nanoscale materials for the treatment of water contaminated by bacteria and viruses*, Materials Today, Elsevier 2020, pp. 261-305.

## **5. CONCLUSION AND PROPOSAL**

The doctoral dissertation of the candidate Milica Budimir, which is the result of years of work and collaboration between the University of Belgrade and the University of Lille, represents a major contribution to the field of nanomaterials. The dissertation was written following the Rulebook on doctoral studies at the Faculty of Electrical Engineering, University of Belgrade.

The dissertation is nicely written, clear, and well organized. The topic of the dissertation is interesting, the experiments are well designed and its scientific contribution consists of two new nanocomposite materials with excellent antibacterial properties that have a potential application in biomedicine. The conducted research is of high quality, which is confirmed by publications in leading journals in the field. The candidate confirmed scientific maturity and ability for independent scientific work.

Candidate Milica Budimir fulfilled all the conditions provided by the Law on Higher Education, the Statute, and the Rulebook on doctoral studies at the Faculty of Electrical Engineering in Belgrade. She also fulfilled all the conditions for the defense of her doctoral dissertation at the University of Lille, majoring in Science for Engineers.

Based on everything exposed above, the Commission is pleased to propose to the Academic Council of the School of Electrical Engineering, University of Belgrade to accept the doctoral dissertation entitled "**Modification of carbon nanocomposites by electromagnetic radiation for biomedical application**" by **Milica Budimir**, to present it to the public and forward for final adoption to the Council of technical sciences, University of Belgrade.

Belgrade, May 18, 2020

#### COMMISSION MEMBERS



---

Dr. Milos Vujisic, Assistant Professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering



---

Dr. Rabah Boukherroub, Scientific Director  
Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology – University of Lille



---

Dr. Milan Tadic, Full Professor  
University of Belgrade – School of Electrical Engineering



---

Dr. Biljana Todorovic Markovic, Scientific Advisor  
University of Belgrade – Vinca Institute of Nuclear Sciences



---

Dr. Amitav Sanyal, Full Professor  
Univerzitet Bogazici, Istanbul



---

Dr. Zdenko Špitalsky, Senior Research Scientist  
Polymer Institute, Slovak Academy of Sciences, Bratislava