

Универзитет у Београду

Електротехнички факултет

ИЗБОРНОМ И НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Марка Ерића.

На 767 седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 8.10.2013. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата мр Марка Ерића, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом:

Имплантација јона у канале кристала силицијума

После прегледа дисертације и одговарајућег пратећег материјала Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Изборно и Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на 735. седници, одржаној 6.9.2011. године, именовало Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације мр Марка Ерића, дипломираног инжењера електротехнике, под називом: *Имплантација јона у канале кристала силицијума*, у саставу: др Јелена Радовановић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Срђан Петровић, научни саветник (Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“), др Витомир Милановић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет), др Небојша Нешковић, научни саветник (Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“) и др Јован Елазар, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет). Извештај Комисије је усвојен на 737. седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 11.10.2011. године.

Овај извештај је усвојен одлуком под бројем 06-8780/13-11 на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, одржаној 26.12.2011. године. На седници Комисије за трећи степен студија, одржаној 8.10.2013. године, констатовано је да је кандидат мр Марко Ерић, дипломирани инжењер електротехнике, предао урађену дисертацију, па је на основу увида у дисертацију и у пратећа докумената, а у складу са Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета, Комисија за трећи степен студија потврдила испуњеност потребних услова за подношење предлога Изборном и Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену дисертације и предложила њен састав: др Јелена Радовановић, ванредни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Срђан Петровић, научни саветник (Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча“) др Витомир Милановић, професор емеритус (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет), др Михалис Кокорис, доцент (Национални технички Универзитет у Атини - Факултет за примењене математичке и физичке науке), др Небојша Нешковић, научни саветник (Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке „Винча“) и др Пеђа Михајловић, ванредни професор (Универзитет у Београду - Електротехнички факултет). На 767. седници Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета, одржаној 8.10.2013. године, прихваћен је предлог Комисије за трећи степен студија.

1.2. Научна област дисертације

Научна област дисертације је физика чврстог стања, а у ужем домену предмет дисертације је модификација и анализа материјала помоћу јонских снопова. Ментор дисертације је др Јелена Радовановић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат мр Марко Ерић је рођен 7.9.1979. године у Београду. Уписао је Електротехнички факултет Универзитета у Београду 1998. године, на коме је дипломирао 2004. године, на одсеку за Физичку електронику, смер Оптике електроника и ласерска техника, са просечном оценом 8,52 у току студија. Тема његовог дипломског рада је била "Појачање полупроводничког ласера у магнетном пољу". Исте године уписао је постдипломске студије (по старом програму) на смеру Физика и техника плазме и чврстог стања, које је завршио и магистрирао 2008. године, са просечном оценом 10,00 у току студија. Тема његовог магистарског рада је била "Функције деканалисања протона у кристалима силицијума и бакра оријентације <100>, <110> и <111>". Кандидат мр Марко Ерић је запослен у Институту за нуклеарне науке „Винча“ од 2006. године. У звање истраживача сарадника кандидат је изабран 2008. године.

У свом досадашњем истраживачком раду кандидат мр Марко Ерић је био аутор у пет радова у врхунским међународним часописима (категорије М21) и у једном раду истакнутог међународног значаја (категорије М22). Од тога, везано за резултате приказане у својој докторској дисертацији, кандидат је био први аутор у

два рада категорије M21.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација кандидата је посвећена анализи профила концентрације имплантираних јона азота и алуминијума, енергија 4 и 6 MeV, респективно, у случајној, <100> и <110> оријентацији кристала силицијума, као и ефекта имплантацијом изазване аморфизације кристала силицијума. Дисертација је написана на 93 стране куцаног ћириличног текста и садржи 35 слика и 67 библиографских референци. Садржи насловну страну на српском и енглеском језику, захвалницу, резиме дисертације на српском и енглеском језику, садржај, пет глава и преглед литературе. Наслови појединих глава дисертације су: 1. Увод, 2. Каналисање јона у кристалу, 3. Преглед експерименталних метода, 4. Резултати и 5. Закључци.

2.2. Кратак приказ појединих поглавља

У оквиру уводне главе дисертације дат је преглед истраживања изведених у оквиру израде докторске дисертације, коришћених експерименталних метода и добијених резултата. Такође, у оквиру уводне главе, представљена је структура дисертације.

У уводном делу друге главе дисертације дат је кратак преглед најбитнијих открића везаних за ефекат каналисања јона у кристалима. Друга глава је подељена на пет поглавља: 2.1. Теоријске основе каналисања јона, 2.2. Јон-атомски потенцијал интеракције, 2.3. Енергијски губитак јона у кристалу, 2.4. Размазивање енергијског губитка (Straggling) и 2.5. Деканалисање јона у кристалу. Прво поглавље је посвећено опису ефекта каналисања јона у кристалима, у којем се уводе појмови критичног угла и континуалне апроксимације потенцијала интеракције. У другом поглављу су изложени најчешће коришћени модели јон-атомског потенцијала интеракције као и опсеги њиховог важења. Треће поглавље је посвећено моделима енергијског губитка јона у кристалима. Четврто поглавље се бави увођењем појма размазивања енергијског губитка и постојећим моделима за описивање овог ефекта. Последње поглавље у оквиру друге главе је посвећено прецизном опису процеса деканалисања јона у кристалима.

Трећа глава дисертације посвећена је представљању експерименталних метода коришћених у изради дисертације. Она је подељена на четири поглавља: 3.1. Метод Радерфордовог повратног расејања, 3.2. Метода нуклеарних реакција, 3.3. Раманова спектроскопија и 3.4. Метода скенирајуће електронске микроскопије. У првом поглављу представљен је експериментални метод Радерфордовог повратног расејања са уобичајеним експерименталним поставкама, са освртом на предности и мане ове методе. Посебна пажња је посвећена овом методу у случају каналисања јона које доноси више информација и који је коришћен у овој дисертацији. Друго поглавље се бави теоријском основном метода нуклеарних реакција са предностима и манама ове експерименталне методе, са посебним освртом на нуклеарне реакције базиране на деутеријуму. Теоријско објашњење Рамановог расејања и на њему

базиране Раманове спектроскопије, са посебним освртом на Раманову спектроскопију кристала, је дато у трећем поглављу. У четвртом поглављу дат је кратак опис скенирајуће електронске микроскопије.

Четврта глава је посвећена резултатима дисертације и подељена је на три поглавља: 4.1. Јонска имплантација, 4.2. Одређивање профила концентрације високоенергијских јона азота имплантираних у $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и случајно оријентисане кристале силицијума и 4.3. Одређивање дубинских профила аморфизације у силицијуму изазване јонском имплантацијом помоћу микро-Раманове спектроскопије. Прво поглавље је посвећено кратком прегледу радова посвећених коришћењу јонске имплантације у полупроводничкој технологији, као и значају каналсања јона у кристалима, односно, о значају имплантације јона у канале кристала. Такође, у овом поглављу детаљно је описана експериментална процедура приликом јонске имплантације и процеса тражења канала кристала. Први део резултата је представљен у другом поглављу које се састоји из шест делова. У првом делу је описан процес анализе имплантираних узорака и услова експеримента, преглед коришћених пресека за расејање $^{14}\text{N}(d,\alpha_0)^{12}\text{C}$ и $^{14}\text{N}(d,\alpha_1)^{12}\text{C}$ нуклеарних реакција и процес калибрације спектра. У другом делу се анализирају и упоређују добијени спектри Радерфордових повратно расејаних (RBS/C) протона у случају $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ оријентације кристала силицијума. Трећи део је посвећен анализи спектра добијених методом нуклеарних реакција (NRA), где је било извршено фитовање експерименталних спектра помоћу SIMNRA програма. Утврђена разлика профила концентрације имплантираног азота, добијених помоћу SRIM 2010 рачунарског програма и експерименталних профила концентрације у случају случајно оријентисаног кристала силицијума, објашњена је у четвртом делу полазећи од претпоставке да је дошло од промене густине силицијумове матрице изазване постојањем "мехурова" азота у силицијуму. Пети део је посвећен приказу и анализи експериментално добијених профила концентрације азота у случајевима разматраних оријентација кристала силицијума. У шестом делу су представљени дубински профили аморфизације кристала силицијума изазвани имплантацијом јона азота у случајевима $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ оријентација кристала силицијума. Други део резултата представљен је у трећем поглављу које се састоји из четири дела. У уводном делу трећег поглавља дат је преглед значаја проучавања аморфизације силицијума у савременим полупроводничким технологијама, као и преглед метода и радова везаних за њено одређивање. У оквиру првог дела трећег поглавља дата је експериментална поставка анализе помоћу микро-Раманове спектроскопије. Други део је посвећен анализи RBS/C спектра протона у случају имплантације јона алуминијума дуж $\langle 110 \rangle$ оријентације кристала силицијума, снимљених на имплантираном и неимплантираном делу силицијума. Раманови спектри снимљени дуж трансверзалног правца имплантиране области кристала силицијума у случајној и $\langle 110 \rangle$ оријентацији силицијума, користећи скенирајући мод уређаја за микро-Раманову спектроскопију, са величином ласерског снопа дуж узорка од око 1 микрон и корацима скенирања од 0,3 и 0,2 микрона, респективно, су анализирани у трећем делу трећег поглавља. Добијени дубински профили аморфизације у случајној и $\langle 110 \rangle$ оријентацији кристала силицијума су анализирани у четвртом делу, у коме су упоређени са дубинским профилима концентрације имплантираног алуминијума.

У петом поглављу су дати закључци дисертације, њени главни доприноси и значај. Такође, дат је и правац даљег истраживања, као наставак истраживања изложеног у дисертацији.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У докторској дисертацији кандидата изложени су резултати два експеримента имплантације јона азота $^{14}\text{N}^{2+}$, енергије 4 MeV, и јона алуминијума $^{27}\text{Al}^{2+}$, енергије 6 MeV, у канале кристала силицијума, као и њихова анализа помоћу следећих експерименталних и теоријских метода: NRA, RBS/C, микро-Раман, SEM, SIMNRA и SRIM 2010. Ови експерименти имплантације су оригинални у смислу да су први пут изведени са овим типовима јона датих енергија у кристалу силицијума. Високо енергијска имплантација јона у канале кристала припада савременој методи добијања дубоко имплантираних слојева у кристалу силицијума, који су имплантирани на већим дубинама у односу на случајну оријентацију кристала, и при томе изазивају мања оштећења кристала.

За експериментално одређивање профила концентрације јона азота имплантираних у $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ канале кристала силицијума, као и у случајно оријентисани кристал силицијума, коришћена је NRA метода, праћењем $^{14}\text{N}(d,\alpha_0)^{12}\text{C}$ и $^{14}\text{N}(d,\alpha_1)^{12}\text{C}$ нуклеарних реакција и SIMNRA програм, којим је успешно фитован експериментални NRA спектар. Ова метода је метода избора када је у питању одређивање профила концентрације азота у матрици кристала силицијума. Међутим, због ограничене доступности снопа деутеријума енергије реда неколико MeV, она може да се успешно користи само на малом броју инсталција у свету. Институт за нуклеарну физику Националног центра "Демокритос", у Атени, Грчка, у коме су вршена мерења одређивања профила концентрације азота у силицијуму, је једна од референтних лабораторија у свету за примену NRA методе у анализи материјала.

Микро-Раман скенирајућа техника дуж попречног пресека имплантиране области кристала силицијума за одређивање дубинског профила аморфизације силицијума, индуковане имплантацијом јона алуминијума, је први пут примењена у оквиру ове дисертације. Ова нова метода, у комбинацији са RBS/C методом и SEM мерењем попречног пресека имплантиране области кристала, има потенцијално велике примене у карактеризацији деформације/аморфизације кристалне структуре силицијума изазване високоенергијском имплантацијом различитих врста јона. Ово може да реши актуелни проблем индуковане деформације/аморфизације кристалне структуре силицијума везан за примену високоенергијске јонске имплантације у полупроводничким технологијама.

3.2. Осврт на коришћену литературу

Литература коришћена у изради дисертације је пажљиво одабрана. Она обухвата како најновије радове везане за проблематику дисертације, тако и класичне опште познатије референце, које на адекватан начин покривају област дисертације. У наведеним референцама се налазе и радови кандидата Марка Ерића.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У дисертацији мр Марка Ерића под насловом: *Имплантација јона у канале кристала силицијума*, примењени су познати експериментални методи у анализи материјала са јонским сноповима: RBS/C и NRA методи, као и SEM метод мерења попречног пресека имплантиране области кристала и нова микро-Раман скенирајућа техника за одређивање дубинског профила аморфизације кристала.

Експериментални део дисертације се састоји од: (1) јонске имплантације азота и алуминијума у канале и у случајној оријентацији кристала силицијума, (2) снимања RBS/C спектра протона у случају каналисања јона у случајној, <100> и <110> кристалној оријентацији, (3) мерења спектра алфа честица емитованих из $^{14}\text{N}(d,\alpha_0)^{12}\text{C}$ и $^{14}\text{N}(d,\alpha_1)^{12}\text{C}$ нуклеарних реакција, (4) мерења скенирајућих микро-Раманових спектра трансверзалног пресека имплантиране области у случајној и <110> оријентацији и (5) снимања трансверзалног пресека имплантиране области кристала силицијума <110> оријентације помоћу SEM методе.

Теоријски део дисертације обухвата: (1) анализу RBS/C спектра протона, (2) одређивање профила концентрације азота фитовањем спектра емитованих алфа честица помоћу SIMNRA програма користећи експериментално одређене пресеке за расејање одговарајућих нуклеарних реакција, (3) фитовање експериментално добијеног профила концентрације азота у случајној оријентацији помоћу SRIM 2010 програма, тако што је мењана густина слојева силицијумове матрице у циљу објашњења разлике између експериментално добијеног и очекиваног профила концентрације азота, (4) одређивање дубинских профила аморфизације кристала силицијума у <100> и <110> оријентацији индуковане имплантацијом азота помоћу RBS/C спектра протона и експериментално добијених профила концентрације азота и (5) анализу скенирајућих микро-Раманових спектра дуж трансверзалног пресека имплантиране области силицијума и одређивања дубинских профила аморфизације индукованих јонском имплантацијом алуминијума.

3.4. Примењивост остварених резултата

Приликом ефекта каналисања јона долази до ширења профила концентрације имплантираних јона у односу на случајно оријентисани кристал. Ово за последицу има увећану осетљивост профила концентрације каналисаних јона на избор модела потенцијала интеракције јон-атом и енергијског губитка, тако да имплантација јона у канале кристала може бити коришћена за прецизно одређивање ових модела. Поред тога, високо енергијска јонска имплантација у канале кристала може бити коришћена за добијање дубоко имплантираних слојева у кристалу силицијума, који се налазе на већим дубинама у односу на случајну оријентацију кристала, и при томе

изазивају мања оштећења кристала, што може да има примену у полупроводничким технологијама.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

На основу прегледане дисертације Комисија процењује да је кандидат мр Марко Ерић, дипломирани инжењер електротехнике, у потпуности способан за самостални научни рад, што је доказано и чињеницом да је објавио два рада у врхунским међународним часописима у којима је први аутор. Кандидат је приликом израде дисертације показао систематичност у раду, истрајност у решавању насталих проблема и иницијативу за овладавање новим научним сазнањима и методама.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси који су остварени у оквиру докторске дисертације су следећи:

- Користећи NRA методу, на основу детекције емитованих алфа честица из $^{14}\text{N}(d,\alpha_0)^{12}\text{C}$ и $^{14}\text{N}(d,\alpha_1)^{12}\text{C}$ нуклеарних реакција и фитовања одговарајућих спектра алфа честица помоћу SIMNRA програма, одређени су дубински профили концентрација имплантираних јона азота.
- Разлика између експерименталних и теоријски добијених профила концентрације азота у силицијуму, у случају имплантације јона азота у случајној оријентацији кристала силицијума, објашњена је помоћу претпоставке о формирању "мехурова" азота и одговарајуће промене густине матрице силицијума.
- Одређени су дубински профили аморфизације кристала силицијума индуковани имлантацијом јона азота користећи RBS/C спектре и експериментално добијене дубинске профиле концентрације азота у силицијуму.
- Предложена је и коришћена нова метода за карактеризацију деформације/аморфизације кристала силицијума по његовој дубини, која је изазвана имплантацијом високо енергијских јона алуминијума, заснована на скенирању трансверзалног пресека имплантиране области кристала помоћу микро-Раман спектроскопије.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Претпоставку о формирању "мехурова" азота и одговарајуће промене густине кристала силицијума, који се јављају као последица високоенергијске имплантације јона азота у силицијуму, требало би проверити неком од независних аналитичких метода, као што је мерење помоћу трансмисионог електронског микроскопа високе резолуције. Такође, добијене дубинске профиле аморфизације силицијума изазване јонском имплантацијом требало би упоредити са одговарајућим

микродифракционим сликама високе резолуције које би се добиле коришћењем трансмисионог електронског микроскопа.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат мр Марко Ерић је до сада објавио пет радова категорије M21 и један рад категорије M22. Проблематици докторске дисертације припадају следећи радови категорије M21:

1. **Erić, M.**, Petrović, S., Kokkoris, M., Lagoyannis, A., Paneta, V., Harissopulos, S., Telečki, I.: *Depth profiling of high energy nitrogen ions implanted in the <100>, <110> and randomly oriented silicon crystals*, - *Nucl. Instr. Meth. B*, vol. 274, pp. 87–92, 2012.

2. **Erić, M.**, Petrović, S., Kokkoris, M., Liarokapis, E., Antonakos, A., & Telečki, I.: *Micro-Raman depth profiling of silicon amorphization induced by high-energy ion channeling implantation*, - *J. Raman Spectrosc.*, vol. 44, pp. 496–500, 2013.

Доле су наведени преостали радови кандидата

Радови категорије M21:

3. **Erić M.**, Radovanović J., Milanović V., Ikonić Z. & Indjin D.: *Spin-Dependent Dwell Times of Electron-Tunneling Through Double- and Triple-Barrier Structures*, - *Journal of Applied Physics*, vol. 103, 2008.

4. Petrović S., **Erić M.**, Kokkoris M. & Nesković N.: *Gompertz Type Dechanneling Functions for Protons in <100>, <110> and <111> Si Crystal Channels*, - *Nucl. Instr. Meth. B*, vol. 256, pp. 177, 2007.

5. Jovanović Z., Kalijadis A., Vasiljević-Radović D., **Erić M.**, Lausević M., Mentus S. & Lausević Z.: *Modification of Glassy Carbon Properties Under Low Energy Proton Irradiation*, - *Carbon*, vol. 49, pp. 3737, 2011.

Радови категорије M22:

6. **Erić M.**, Milanović V., Ikonić Z. & Indjin D.: *Simulation of Optically Pumped Intersubband Laser in Magnetic Field*, - *Solid State Communications*, vol. 142, pp. 605, 2007.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

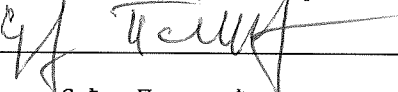
Дисертација кандидата мр Марка Ерића, под насловом: **Имплантација јона у канале кристала силицијума** представља оригиналан научни допринос у истраживању дубинских профила концентрација високоенергијских јона који су имплантирани у канале кристала силицијума и одговарајућих дубинских профила аморфизације силицијума која је изазвана јонском имплантацијом. Оцењујући докторску дисертацију, као и чињеницу да је анализирана проблематика актуелна и савремена с аспекта научног и стручног доприноса, верификована објављивањем у два врхунска међународна часописа, у којима је кандидат први аутор, Комисија констатује да је мр Марко Ерић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду, и у складу са тим предлаже Изборном и Наставно-научном већу Електротехничког факултета да овај Извештај прихвати и да га упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:



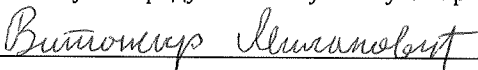
др Јелена Радовановић, ванредни професор

(Универзитет у Београду – Електротехнички факултет)




др Срђан Петровић, научни саветник

(Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“)




др Витомир Милановић, професор емеритус

(Универзитет у Београду – Електротехнички факултет)



др Михалис Кокорис, доцент

(Национални технички универзитет у Атини – Факултет за примењене математичке и физичке науке)



др Небојша Нешковић, научни саветник

(Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“)



др Пеђа Михајловић, ванредни професор

(Универзитет у Београду – Електротехнички факултет)