



РЕЦЕНЗИЯ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен
„Доктор“ в област на висшето образование 5. „Технически науки“,
професионално направление 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика“
(Технология на електронното производство)

Автор на дисертационния труд:

маг.инж. Раде Томов

Тема на дисертационния труд:

„Изследване на многослойни металizacionни системи в съвременните микро- и наноелектронни устройства“

Рецензент: **проф. д.н. инж. Галина Петкова Чернева** - ВТУ „Тодор Каблешков“

член на Научно жури, съгл. заповед № ОЖ-5.2-13/05.02.2025г. на Ректора на ТУ София

1. Информация за докторанта

Маг. инж. Раде Томов завършва висшето си образование в ОКС „Магистър“ по специалност „Микротехнологии и наноинженеринг“ в Технически университет (ТУ) София през 2021г. От 01.03.2022г. е редовен докторант по докторска програма „Технология на електронното производство“ към катедра „Микроелектроника“ на ТУ София.

Маг.инж. Раде Томов е изпълнил всички изисквания в индивидуалния план на своята докторантура и е положил успешно всички необходими изпити. Отчислен е с право на защита преди изтичане на редовния срок на докторантурата – на 01.02.2025г.

Трудовата биография на маг. инж. Томов е свързана с микроелектрониката. През периода 2018-2021г. работи последователно към LEM Bulgaria и GLOBALFOUNDRIES Bulgaria, а от 2023г. до сега се занимава с биомедицинско инженерство към НИС при ТУ София.

Процедурата по публична защита на дисертационния труд на маг. инж. Томов е стартирана по предложение на катедрения съвет на катедра „Микроелектроника“ и решение на факултетния съвет на факултет „Електронна техника и технологии“ на ТУ София.

2. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем в научно и научноприложно отношение

При съвременното развитие на микро- и наноелектрониката възникват редица нови технологични и научни проблеми. Сред тях е и въпросът за метализацията в микроелектронните устройства. Разработването на многослойни металizacionни системи и преходи играе важна роля в развитието на устойчиви технологии и създаването на електронни устройства, базирани на наноматериали. Изследването на контактите между метали и новите функционални материали, включително органични полупроводници и двумерни неорганични наноматериали, е от съществено значение при производството на електронни компоненти.

Появата на нови наноматериали налага необходимостта от детайлно изследване на физичните и електрическите свойства на тези контакти. Тези въпроси оформят проблемното поле на изследванията в настоящия дисертационен труд. В работата са разгледани сензорни структури на базата на карбин, емексен и халкогенид на преходен метал. Акцентирано е върху технологията на металните електроди и



влиятието на микроструктурата и физико-химичните свойства на контактите върху работата и характеристиките на сензорните структури.

Целта на дисертационния труд е изграждане на металizacionни системи за реализиране на омични и Шотки контакти към нови едномерни и двумерни наноматериали и оптимизация на параметри на преходите метал/наноматериал в неизследвани комбинации метал/чувствителен полупроводник с приложение в сензорни структури.

За постигане на поставената цел авторът е формулирал *пет задачи*, свързани с разработване и оптимизиране на технологии за получаване на омични и Шотки контакти върху карбин, емексин и халкогенид на преходен метал, с контролируеми параметри върху различни подложки; изследване на процесите на границата метал/наноматериал в разглежданите случаи; установяване на зависимости и характеристики на разработените сензорни елементи от технологията на изграждане на контактите.

Тематиката е твърде актуална, предвид приложението на изследваните наноелектронни сензорни устройства в биомедицината. Направените изследвания и предложените нови решения за оптимизация на многослойни металizacionни системи определят актуалността на работата в научно и научноприложно отношение.

Формулираните цел и задачи съответстват на изискванията за дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „Доктор“.

3. Степен на познаване състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал.

Библиографията на дисертационния труд е съвременна и отразява адекватно актуалното състояние на разглежданата научна проблематика. От дисертацията личи добрата литературна осведоменост на докторанта. В библиографията са цитирани общо 130 литературни източници, от които 120 на латиница, 3 на кирилица и 7 интернет адреси.

Както на базата на първа глава, така и на останалите глави от дисертацията, в които се привеждат и обсъждат резултати и на други автори, може да се направи извод, че маг.инж. Раде Томов е запознат много добре със спецификата на проблема.

4. Съответствие на избраната методика на изследване с поставената цел и задачи на дисертационния труд

Поставената цел и основните задачи на дисертационния труд определят методологията на изследване. За изпълнение на формулираните задачи са разработени технологии и са направени експериментални изследвания за установяване на връзките между технологичните параметри и електрическите характеристики на контактите метал/наноматериал. При изследванията са използвани съвременни спектроскопски и микроскопски методи (атомно-силова микроскопия, сканираща електронна микроскопия и енергийно-дисперсионна рентгенова спектроскопия).

5. Аналитична характеристика на дисертационния труд.

Трудът е разработен в обем от 143 страници, като съдържа 98 фигури и 8 таблици. Структуриран е в уводна част, пет глави, претенции за приноси на дисертацията, списък на публикации, свързани с дисертацията и библиографична справка. Всяка глава завършва с основни изводи, публикации и апробация на резултатите.



В *първа глава* са разгледани въпроси от процеса на метализация, формиране на Шотки и омичен контакт и взаимодействието между метал и органични полупроводници. На база на задълбочено литературно проучване, са дефинирани нерешените проблеми и целта на настоящия дисертационен труд. В края на главата са формулирани и основните задачи за изпълнение по темата на разработката.

Във *втора глава* са изследвани възможностите за създаване на контакти между карбин и различни метали чрез използване на вакуумни процеси за отлагане на метални слоеве. Разгледано е влиянието на отгряването и бондирането на металните контакти, върху микроструктурата и елементния състав на прехода метал/карбин. Разработена е многослойна метализация с никелов бариерен слой за предотвратяване на дифузия на паладиеви частици в карбина.

В *трета глава* са изследвани контакти между карбин и злато, паладий и алуминий. Открити са зависимости между температурата, големината и честотата на електрическото поле върху електрическото поведение, характеристики и параметри на карбоновите преходи с различните метали. Разработена е технология за бондиране на паладиеви и сребърни слоеве върху карбин и са оптимизирани параметрите на бондирането до получаване на здрави бондиращи връзки с контролируеми и повторяеми параметри.

В *четвърта глава* са получени хеморезистивни структури и е изследвана реакцията им към съставки от човешката пот, с цел доближаване до реално приложение на слоевете в биосензори и оптималната им метализация за подобрена чувствителност.

В *пета глава* са изследвани преходите, формирани между слоеве молибденов дисулфид и метални покрития от молибден и никел, като е получена информация за механизма на формиране на омични и Шотки преходи към съвременен двумерен наноматериал и тяхното електрическо поведение.

6. Научни и/или научноприложни приноси на дисертационния труд

Основните приноси на представената цялостна разработка в дисертацията могат да се обобщят в следното:

- доказване с нови средства на съществени нови страни в съществуващи научни проблеми;
- създаване на нови методи и технологии;
- получаване и доказване на нови и потвърдителни факти.

Авторът формулира 5 научно-приложни и 4 приложни приноса, които аз приемам.

Като обобщение на *научно-приложните* приноси може да се посочи:

- разработени нови технологии за създаване на контакти между карбин и различни метали с цел подобряване микроструктурата и характеристиките на прехода метал/карбин;
- установени нови връзки и зависимости между параметри на електрическото поле и характеристиките на карбоновите преходи с различните метали;
- оптимизирани параметри на бондирането върху карбин до получаване на здрави бондиращи връзки с контролируеми и повторяеми параметри;
- установена нова информация за механизмите на формиране на омични и Шотки контакти към съвременни наноматериали с приложение в биомедицината.



Приложни приноси се откриват в:

- разработени методики за снемане на характеристики на преходи метал/карбинов наноматериал;
- реализирани експериментални постановки за определяне на контактно съпротивление между метал и полупроводник с широко приложение;
- оптимизирани условия на отлагане на емексин и молибденов дисулфид чрез адаптирана технология за ултразвуково пулверизиране от воден разтвор;
- изготвени хеморезистивни структури с оптимизирана метализация на слоевете за подобрена чувствителност с приложение в биосензори.

Получените резултати представляват оригинален принос в науката и практиката и напълно съответстват на изискванията за дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „Доктор“.

7. Преценка на публикациите по дисертационния труд

По темата на дисертацията са приложени 9 публикации. 4 от тях са представени на конференции с международно участие у нас и в чужбина, а 5 са отпечатани в списания, едно от които в Q1 с IF 4.6. Една от публикациите е самостоятелна, останалите в съавторство, като маг.инж. Раде Томов е първи автор. 8 от публикациите са индексирани в Scopus, като 3 от тях са с SJR. Една публикация е индексирана в Scopus и Web of Science.

Общият брой точки по съответния показател G е 160 точки, при изискуеми 30 точки.

Резултатите от работата по дисертацията са станали достояние на научната общност у нас и в чужбина.

8. Оценка на степента на лично участие на дисертанта в приносите.

Въз основа на представените изследвания, задълбочен анализ на резултатите, авторството на публикациите по дисертацията и участието в 3 научноизследователски проекта (един, от които международен), считам, че тя е самостоятелно дело на дисертанта, реализирано под ръководството на научния ръководител.

Не откривам плагиатство.

9. Оценка на съответствието на автореферата с изискванията за изготвянето му.

Авторефератът пълно и ясно отразява основните моменти от съдържанието на дисертационния труд, което позволява да се преценят актуалността на разглежданите проблеми, начините за тяхното решаване и получените резултати. Написан е в съответствие със съществуващите изисквания.

10. Приложимост на резултатите от ДТ.

Направените аналитични и експериментални изследвания и получените резултати показват, че предложените оригинални технологии и разработените структури дават възможност за анализ и решаване на конкретни проблемни задачи в областта на наноматериалите. Проведените изследвания, създадените продукти и



получените резултати според мен ще имат голямо приложение в областта на биомедицината. Резултатите са свързани и със задачи в 3-те научноизследователски проекта, в които участва докторантът. Част от разработките служат за учебния процес.

Потвърждение за актуалността на получените от докторанта резултати са общо 10 броя цитирания в Scopus на негови публикации.

Това дава основание да се твърди, че кандидатът притежава способността за формулиране на инженерни проблеми и за провеждане на самостоятелни научни изследвания.

Смятам, че предложеният дисертационен труд представлява една задълбочена научно-изследователска разработка с висока степен на актуалност. Степента на приложимост на получените резултати е висока.

11. Критични бележки и препоръки.

Дисертацията представлява обширен научен труд по изследваната проблематика. Тя е структурирана добре и прегледно. Дисертантът е извършил сериозна по обем научно-изследователска работа, съдържаща както експериментална, така и аналитична част. Нямам критични бележки.

Препоръката ми към докторанта е да продължи успешната си научноизследователска дейност в областта на нанотехнологиите и биомедицината.

12. Заключение

Представеният от маг. инж. Раде Томов дисертационен труд съдържа аналитични и експериментални резултати, чрез които са решени поставените в него задачи. Налице са достатъчно научно-приложни и приложни приноси, които покриват изискванията на ЗРАСРБ, Правилника за неговото приложение и Правилника на ТУ София за присъждане на образователната и научна степен «Доктор».

Предлагам на уважаемите членове на Научното жури да дадат висока оценка и гласуват за присъждането на маг. инж. Раде Томов на образователната и научна степен «Доктор» в област на висшето образование 5. „Технически науки“, професионално направление 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика“ (Технология на електронното производство).

Дата: 25.04.2025



Рецензент:.....(н)
/ проф. дн инж. Г. Чернева/





REVIEW

of a dissertation work for acquisition of the educational and scientific degree "Doctor" in the field of higher education 5. "Technical sciences", professional field 5.2. "Electrical Engineering, Electronics and Automatics", (Technology of Electronic Manufacturing)

Author of the dissertation:

M.Sc. Eng. Rade Tomov

Dissertation title:

"Study of multilayer metallization systems in the modern micro- and nanoelectronic devices"

Reviewer:

Prof. DSc Eng. Galina Petkova Cherneva – Todor Kableshkov University of Transport

Member of the scientific jury: acc. Order № ОЖ-5.2-13/05.02.2025 of the Rector of TU Sofia:

1.Information about the PhD student

M.Sc. Eng. Rade Tomov completed his higher education with a Master's degree in specialty "Microtechnologies and Nanoengineering" at the Technical University (TU) Sofia in 2021. Since 01.03.2022 he has been a full-time PhD student in the doctoral program "Technology of Electronic Manufacturing" at the Department of "Microelectronics" of TU Sofia.

M.Sc. Eng. Rade Tomov has fulfilled all the requirements in the individual plan of his PhD study and has successfully passed all the required exams thus he finished his PhD study.

The work biography of M.Sc. Eng. Tomov is related to the microelectronics. During the period 2018-2021, he worked successively at LEM Bulgaria and GLOBALFOUNDRIES Bulgaria, and from 2023 until now he has been involved in biomedical engineering at the NIS at TU Sofia.

The procedure for a public validation of his dissertation work has started after a proposal of the Department of "Microelectronics" and a decision of the Faculty of Electronic Engineering and Technologies.

2.Actuality of the problem studied in the dissertation work

In the modern development of micro- and nanoelectronics, a number of new technological and scientific problems arise. Among them is the issue of metallization in microelectronic devices. The development of multilayer metallization systems and transitions plays an important role in the development of sustainable technologies and the creation of electronic devices based on nanomaterials. The study of contacts between metals and new functional materials, including organic semiconductors and two-dimensional inorganic nanomaterials, is of essential importance in the production of electronic components.



The emergence of new nanomaterials necessitates a detailed study of the physical and electrical properties of these contacts. These issues form the problem field of research in the present dissertation work. The work considers sensor structures based on carbyne, emexene and transition metal chalcogenide. Emphasis is placed on the technology of metal electrodes and the influence of the microstructure and physicochemical properties of the contacts on the operation and characteristics of the sensor structures.

The aim of the dissertation is to build metallization systems for the realization of Ohmic and Schottky contacts to new one-dimensional and two-dimensional nanomaterials and optimization of parameters of metal/nanomaterial transitions in unexplored metal/sensitive semiconductor combinations with application in sensor structures.

To achieve the set goal, the author has formulated five tasks related to the development and optimization of technologies for obtaining Ohmic and Schottky contacts on carbyne, MXene and transition metal chalcogenide, with controllable parameters on different substrates; study of the processes at the metal/nanomaterial interface in the considered cases; establishment of dependencies and characteristics of the developed sensor elements on the contact construction technology.

The topic is very relevant, given the application of the studied nanoelectronic sensor devices in biomedicine. The research conducted and the proposed new solutions for optimization of multilayer metallization systems determine the relevance of the work in scientific and applied science.

The autor of the dissertation has formulated goals and tasks that are adequate and correspond to the requirements of a dissertation for the acquisition of the educational and scientific degree "Doctor".

3. Level of knowledge of the problem and creative interpretation

The bibliography of dissertation work is modern and adequately reflects the current state of the scientific issues under consideration. The dissertation work shows a good literary awareness of the doctoral student. In the bibliography are cited 130 in number literary sources, of which 120 are in English, 3 are in Cyrillic and 7 Internet addresses.

Based on the first chapter, as well as on the other chapters of the dissertation, which present and discuss the results of other authors, it can be concluded that M.Sc. Eng. Rade Tomov is very familiar with the issues.

4. Conformity of the selected research methodology with the aim and tasks of the dissertation

The goal and main tasks of the dissertation work determine the research methodology. To achieve the formulated tasks, technologies have been developed and experimental studies have been conducted to establish the relationships between technological parameters and electrical characteristics of metal/nanomaterial contacts. The studies have used modern spectroscopic and microscopic methods (atomic force microscopy, scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy).

5. Analytical characteristics of the dissertation work

The dissertation work is developed in a volume of 143 pages of text, containing 98 figures and 8 tables. Its structure includes an introduction, five chapters, a summary of the work's contributions, a list of publications and references. Conclusions and approbation of results are formulated at the end of each chapter.

The *first chapter* discusses issues of the metallization process, Schottky and ohmic contact formation and the interaction between metal and organic semiconductors. Based on



a thorough literature study, the unresolved problems and the goal of this dissertation work are defined. At the end of the first chapter, representing a literature review, the main goal and the tasks to be performed on the topic of dissertation work are formulated.

In the *second chapter*, the possibilities for creating contacts between carbyne and different metals by using vacuum processes for the deposition of metal layers are studied. The influence of annealing and bonding of metal contacts on the microstructure and elemental composition of the metal/carbyne transition is examined. A multilayer metallization with a nickel barrier layer has been developed to prevent the diffusion of palladium particles into carbyne.

In the *third chapter*, contacts between carbyne and gold, palladium and aluminum are studied. Dependencies between temperature, magnitude and frequency of the electric field on the electrical behavior, characteristics and parameters of carbon transitions with different metals are discovered. A technology for bonding palladium and silver layers on carbyne has been developed and the bonding parameters have been optimized to obtain strong bonding connections with controllable and repeatable parameters.

In the *fourth chapter* chemoresistive structures have been obtained and their reaction to human sweat components has been studied, with the aim of approaching the real application of the layers in biosensors and their optimal metallization for improved sensitivity.

In the *fifth chapter*, the junctions formed between molybdenum disulfide layers and metal coatings of molybdenum and nickel have been studied, and information has been obtained about the mechanism of formation of Ohmic and Schottky junctions to a modern two-dimensional nanomaterial and their electrical behavior.

6. Dissertation contributions

The main contributions of the overall development presented in dissertation work can be summarized in the following:

- proving with new means essential new sides in existing scientific problems;
- creation of new research methods and technologies;
- obtaining corroborating facts.

The author formulated 5 scientific-applied and 4 applied contributions, which I accept.

The main *scientific-applied* contributions can be listed as:

- developed new technologies for creating contacts between carbyne and various metals in order to improve the microstructure and characteristics of the metal/carbyne transition;
- established new relationships and dependencies between parameters of the electric field and the characteristics of carbon transitions with various metals;
- optimized bonding parameters on carbyne to obtain strong bonding connections with controllable and repeatable parameters;
- established new information about the mechanisms of formation of Ohmic and Schottky contacts to modern nanomaterials with applications in biomedicine.

Applied contributions are found in:

- developed methodologies for recording characteristics of metal/carbene nanomaterial transitions;
- implemented experimental setups for determining contact resistance between metal and semiconductor with wide application;
- optimized conditions for deposition of emexine and molybdenum disulfide by adapted technology for ultrasonic spraying from aqueous solution;
- prepared chemoresistive structures with optimized metallization of the layers for improved sensitivity with application in biosensors.



The obtained results represent an original contribution to science and practice and they fully meet the requirements for a dissertation to acquire the educational and scientific degree of "Doctor".

7. Assessment of dissertation publications

On the topic of dissertation work, the PhD student has a total of 9 publications. 4 of them have been presented at conferences with international participation in our country and abroad, and 5 has been published in journals, one of which in Q1 with IF 4.6.

One of the publications is independent, the rest are co-authored, with M.Eng. Rade Tomov as the first author. 8 of the publications are indexed in Scopus, 3 of them with SJR. One publication is indexed in Scopus and Web of Science.

The total number of points under corresponding indicator Γ is 160 points, which exceeds the required 30 points.

It is obvious that the results of the dissertation work have become available to the scientific community at home and abroad.

8. Assessment of the degree of personal participation of the doctoral student in the contributions

Based on the research presented, the authorship of the publications on the dissertation and participation in 3 research projects (one of which is international), I consider that it is an independent work of the PhD student, realized under the guidance of the scientific supervisor. I don't find plagiarism.

9. Assessment of the qualities of the abstract

The abstract fully and clearly reflects the main points of the content and contributions of the dissertation. The requirements for preparation of the abstracts on the dissertation works have been met.

10. Using the results of the dissertation work in science and practice

The analytical and experimental studies carried out and the results obtained show that the proposed original technologies and the developed structures provide an opportunity for analysis and solution of specific problem tasks in the study of nanomaterials. The research carried out, the created products and the obtained results, in my opinion, will have great application in the field of biomedicine. The results are also related to tasks in the 3 research projects in which the doctoral student participates. Some of the developments serve the educational process.

Confirmation of the relevance of the results obtained by the doctoral student are a total of 10 citations in Scopus of his publications.

This gives grounds to claim that the PhD student has the ability to formulate engineering problems and to conduct independent scientific research.

I believe that the proposed dissertation work represents a thorough scientific research work with a high degree of relevance. The degree of applicability of the obtained results is high.

11. Opinions, recommendations and remarks on the dissertation work



The dissertation work is an extensive scientific work on the researched issues. It is well structured and clearly arranged. The PhD student has carried out a serious volume of scientific research work, containing both experimental and analytical parts. I don't have critical remarks.

My recommendation to the doctoral student is to continue his successful research activities in the field of nanotechnology and biomedicine.

12. Conclusion

The dissertation work of M.Sc. Eng. Rade Tomov contains analytical and simulation results, through which the tasks set in it are solved. My overall rating is positive. There are sufficient scientific and applied contributions that meet the requirements of the ZRASRB, as well as the Rules of the Law and that of the TU Sofia for the award of the educational and scientific degree "Doctor".

I suggest to the respected members of the Scientific Jury to give high marks and vote for the awarding of M.Sc. Eng. Rade Tomov for the educational and scientific degree "Doctor" in the field of higher education 5. "Technical sciences", professional direction 5.2. "Electrical engineering, electronics and automatics" (Technology of Electronic Manufacturing).

25.04.2025



Reviewer:.....(2).....

/Prof. DSc. Eng. G. Cherneva/

