



Българска академия на науките
Институт по физика на твърдото тяло
„Академик Георги Наджаков“

Бул. Цариградско шосе 72, 1784 София; <http://www.issp.bas.bg>; тел. +359 2 875 8061; факс: +359 2 416 9357

Мария Димитрова Берова

Наноразмерен оптически запис на информация в
диамантено подобен въглерод чрез фокусирана
йонна имплантация

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователната и научна
степен „Доктор“

Специалност:

„Електрични, магнитни и оптични свойства
на кондензираната материя“

Научен ръководител:

Доц. д-р Таня Цветанова Цветкова

Рецензенти:

Проф. дфн Дианка Димитрова Нешева-Славова

Проф. дфн Дориана Иванова Димова-Малиновска

София, 2017

Дисертацията се състои от 146 страници, 137 фигури, 7 таблици и 134 цитирани литературни източника.

Дисертационният труд е обсъдан и насочен за защита от научен семинар на Направление „Физическа оптика и оптични методи“, Институт по физика на твърдото тяло „Акад. Георги Наджаков“ – БАН, състоял се на 30.11.2017 година.

<http://www.issp.bas.bg>

ISSP-BAS-2018-PhD022

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 9 май 2018 от 11.00 часа в зала 300 на Институт по Физика на Твърдото Тяло „Акад. Г. Наджаков“ – БАН, бул. „Цариградско шосе“ 72, пред научно жури в състав:

- 1 проф. дфн Дианка Димитрова Нешева-Славова – ИФТТ- БАН
2. доц. д-р Таня Цветанова Цветкова – ИФТТ - БАН
3. проф. дфн. Дориана Иванова Димова-Малиновска – ЦЛ СЕНЕИ - БАН
4. доц. д-р Теодор Иванов Миленов - ИЕ-БАН
- 5 доц. д-р Василка Христова Пенчева - ИЕ - БАН

Дисертационният труд е свързан с участието ми в международния проект CareRAMM (Carbon Resistive Random Access Memory Materials) 01-02-2013 – 01-02-2016, финансиран по програма на Европейската комисия

Съдържание

Структура на дисертацията	
Актуалност на темата	
Състояние на изследвания проблем	
Цел и задачи на изследването	
Обект и предмет на изследването.....	
Хронологични рамки на изследването.....	
Методологична основа на изследването	
Спектроскопия във видимата и ултравиолетовата област на спектъра (UV/Vis).....	
Елипсометрията	
Рентгеновата фотоелектронна спектроскопия (XPS).....	
Раманова спектрометрия (Raman).....	
Трансмисионна електронна микроскопия (TEM) и сканираща електронна микроскопия (SEM).....	
Атомно силов микроскоп (AFM)	
Емпирична база на изследването.....	
Подготовка на образците	
Спектрометрия във видимата и ултравиолетовата област на спектъра.....	
Елипсометрия	
Рентгенова фотоелектронна спектроскопия (XPS)	
Раманова спектроскопия (Raman).....	
Трансмисионна електронна микроскопия.....	
Сканираща електронна микроскопия	
Атомно силов микроскоп (AFM)	
Формиране на микро-изображения в диамантено-подобни слоеве чрез фокусирана йонна имплантация (FIB) с галиеви йони.	
Апробация на резултатите от изследването	
Научна новост на получените резултати	

Практическа значимост на получените резултати

Принос на дисертацията

Изводи

 Библиография

Списък публикации и участия в конференции.....

Структура на дисертацията

Дисертацията се състои от 146 страници, 137 фигури, 7 таблици и 134 цитирани литературни източника. Брой на публикациите, свързани с дисертационния труд е 8.

Съдържанието на дисертацията е структурирано в следните части: преглед на достиженията в областта до момента, методологична и експериментална част и заключителни глави.

В глава 2 е направен исторически преглед на оптичния запис до момента като накратко са разгледани и другите методи за запис, които се използват понастоящем.

В глава 3 е разгледан основния метод използван в това изследване – йонната имплантация. Тук са включени теоретична част и преглед на използваната за йонна имплантация техника.

В глава 4 са обобщени постиженията досега в наноразмерния запис на информация. Разгледани са два метода на създаване на оптичен контраст: преминаване от прозрачно кристално в непрозрачно аморфно състояние и преминаване от оптически слабо поглъщащо аморфно в силно поглъщащо аморфно състояние.

В глава 5 е описана подготовката за поставяне на експеримента като са разгледани свойствата на избраните материали, метода за получаване на слоевете и моделирането на имплантацията с помощта на симулационната програма SRIM.

В глава 6 е разгледано влиянието на йонната имплантация върху оптичните свойства на диамантено подобните слоеве като са представени два експеримента: определяне на оптичните свойства с UV/Vis спектрометрия и елипсометрия.

В глава 7 са представени резултатите от експериментите по Раманова спектроскопия и Рентгенова фотоелектронна спектроскопия (XPS).

В глава 8 са показани резултатите от електронната и сканираща сондова микроскопия – трансмисионна електронна микроскопия (ТЕМ), сканираща електронна микроскопия (СЕМ), атомно-силова микроскопия (AFM) и проводяща атомно-силова микроскопия (Conductive AFM (C-AFM)).

Глава 9 е посветена на получаването на микро-изображения в диамантено-подобни въглеродни слоеве чрез система за фокусирана йонна имплантация (FIB).

В глава 10 е изложен оригиналният принос на дисертацията

В глава 11 са направени изводи от изследването.

Следва библиография.

Актуалност на темата

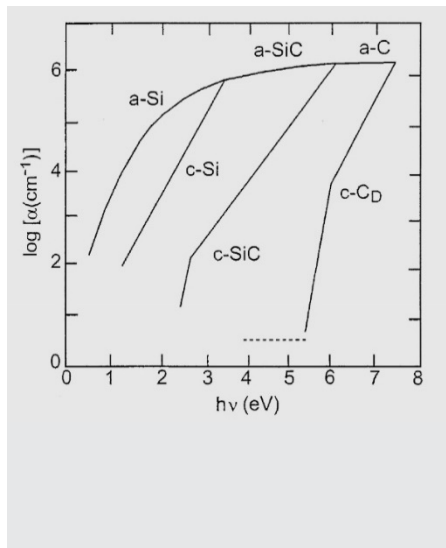
В наши дни информацията е един от най-ценните активи. Записът на архивни данни се оказва от голяма важност. Могат да се дефинират четири основни стъпки при съхранението на информацията: събиране, запис, четене и копиране. Електронните библиотеки се нуждаят от подобрения на начина на запис. На този етап целият обем на информацията в света надхвърля $1 \text{ Eb}_{(10^{18}\text{b})}$. Настоящите среди за запис имат кратко време на живот – близо 10 години. Това води до непрекъснати усилия за постоянното презаписване на данните наново, за да не се загубят. Освен това повечето среди за запис на информация досега са чувствителни към топлинни, механични, химически и електромагнитни увреждания. В последните години се правят редица изследвания по темата и те доказват, че е възможно значително подобрение на качеството на запис. От всичко това следва, че съществува голямо търсене за носители за запис, които са практически перманентни и като допълнение имат голяма плътност на записа. Прогнозната плътност на запис на данните по новите методи е от 1 до 10 Tbit върху 100 cm^2 .

Най-известни от досегашните опити за наноразмерен оптически запис са: имплантиране на Ag, Ne и Xe в Si, SiC и диамант при четене на пропускане, имплантиране на Sn, Ge и Ga в a-SiC:H и четене при пропускане, имплантиране с галий в диамантено подобен въглерод и четене при отражение. Тези опити ни наведоха на мисълта дали диамантено подобния въглерод, който е по-широкозонен от силициевия карбид, би бил по-подходящ материал за четене при трансмисия от досега изследваните.

Състояние на изследвания проблем

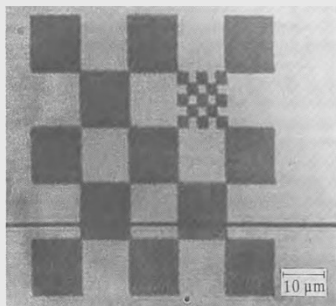
Съществуват два метода на получаване на изображение чрез йонна имплантация – аморфизация на кристално вещество и модифициране на аморфно вещество. По настоящем са изпробвани такива методи за запис на оптическо изображение в материали като диамант, кристален Si, кристален SiC [1], и аморфен a-SiC:H

[2]. Получен е оптически контраст и са направени изображения с помощта на фокусирана йонна имплантация. На фигура 1 е показана разликата в коефициентите на поглъщане на кристално и аморфно състояние на няколко вещества и се наблюдава, че различните вещества дават оптичен контраст при различни вълнови обхвати, като най-голям е обхвата на диаманта. На фигура 2 и 3 са дадени два примера за оптичен запис чрез FIB. Вижда се, че при материала с по-широка забранена зона (SiC) има по-голям контраст.

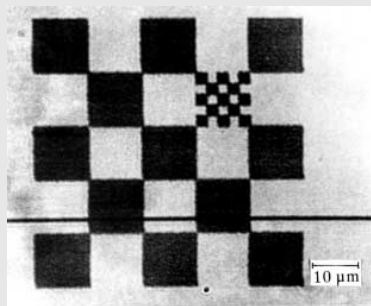


Фиг.1. Коефициенти на оптическо поглъщане на аморфен и кристален Si, SiC и C

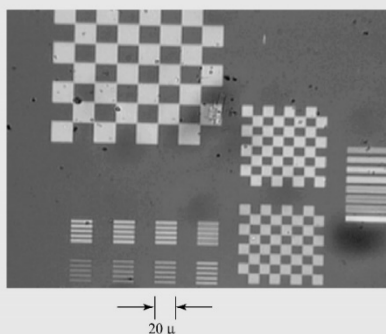
Във връзка със втория метод (модифициране на аморфно състояние) ще разгледаме експериментите на Таня Цветкова и съавтори [2]. Изследвана е оптичката модификация на слой аморфен хидрогенизиран силициев карбид (a-SiC:H) след имплантацията му с йони на галия (Ga^+). Наблюдавано е отместване на границата на абсорбция към по-дългите дължини на вълните (по-ниски енергии на фотоните), съпроводено със значително увеличение на коефициента на поглъщане. Направени са изображения върху слой a-SiC:H с помощта на фокусирана йонна имплантация с йони Ga^+ **Фиг.4.**



Фиг.2. Кристално-аморфно контрастно изображение записано върху поликристален силициев филм върху сапфир. Прозрачните региони са на кристален силиций, а тъмните на аморфен. Изображението е било създадено с помощта на компютърно контролиран йонен сноп.



Фиг.3. Кристално-аморфно аналогово изображение записано в поликристален SiC върху подложка от сапфир с фокусиран йонен сноп Ne с енергия 20keV



Фиг.4. Изображение показващо оптически контраст между имплантирана и неимплантирана области във получен чрез разпръскване слой $a\text{-Si}_{0.85}\text{C}_{0.15}\text{:H}$, отложен върху подложка от оптично стъкло. Прозрачните области са неимплантиран, а черните имплантиран слой.

Цел и задачи на изследването

Целта на настоящата дисертация е на базата на йонната имплантация да се създаде наноразмерен оптически запис в широкозонен и екологичен материал като диамантено-подобния въглерод. Искане чрез променящи се параметри (доза и енергия на йонната имплантация) да модулираме коефициента на трансмисия. За целта са планирани и осъществени следните стъпки:

1. Създаване на работни образци – диамантено подобен слой върху силициева и стъклена подложка.
2. Имплантиране на пробите с различни дози галиеви йони, като се остави референтен (неимплантиран) образец
3. Изследване промените на оптичните и електронните свойства на материала в резултат на имплантацията.
4. Запис на изображение с помощта на фокусирани йонни снопове.

Обект и предмет на изследването

Обект на настоящото изследване е промяната на редица физически свойства на диамантено-подобни аморфни слоеве след имплантацията в тях на галиеви йони.

Хронологични рамки на изследването

Изследванията са проведени в периода 2013-2015. Първо е извършено отлагането на слоевете. След това е направена йонната имплантация в Научно-изследователския център Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). В последствие бяха направени оптически спектроскопски анализи в областта на видимата и ултравиолетовата области на спектъра в ИОМТ. Следват Рентгенова фотоелектронна спектроскопия (XPS) в ИОНХ, Раманова спектроскопия в СУ“Климент Охридски“. След това бяха направени микроскопските изображения получени чрез Трансмисионна електронна микроскопия (ТЕМ) и сканираща електронна микроскопия (SEM) в ИОМТ, където се налага пробите да претърпят подготовка за изследването и се отрязват части от образците. Останалите образци бяха използвани за елипсометрично изследване в ИФТТ и АФМ отново в ИОМТ.

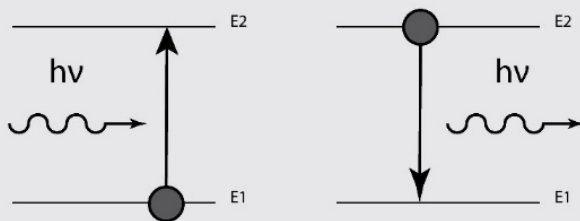
Методологична основа на изследването

В тази глава са описани следните методи за изследване на пробите:

1. Оптическа спектроскопия във видимата и ултравиолетовата област на спектъра (UV/Vis) и Елипсометрия.
2. Рентгенова фотоелектронна спектроскопия (XPS) и Раманова спектрометрия.
3. Микроскопски изследвания: Трансмисионна електронна микроскопия (TEM), сканираща електронна микроскопия (SEM) и Атомно силов микроскоп (AFM)

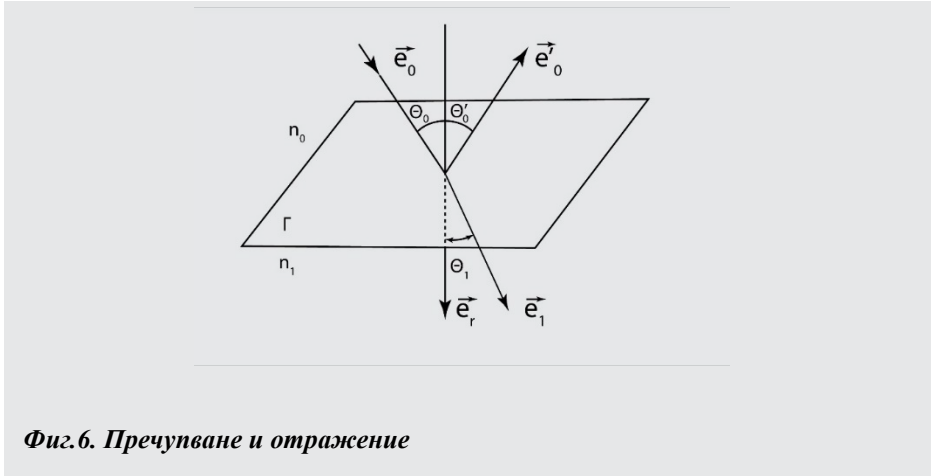
Спектроскопия във видимата и ултравиолетовата област на спектъра (UV/Vis). Този метод представлява измерването на намалението на интензитета на снопа светлина, който преминава през образеца или се отразява от повърхността му. Поглъщането може да се измерва за една дължина на вълната или за спектрален обхват.

Разглежда се взаимодействието между фотон и ядро. То е най-силно, когато енергията на фотона отговаря на разликата в енергиите на две енергетични състояния на електрона в ядрото (**Фиг. 5**).



Фиг.5. Поглъщане и излъчване на фотон от атома.

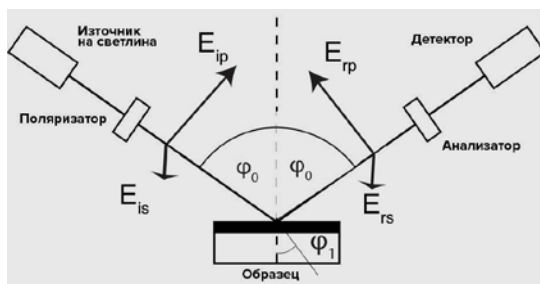
При отражение и пречупване на светлината от повърхността на образца са в сила законите на Снелиус (**Фиг.6.**):



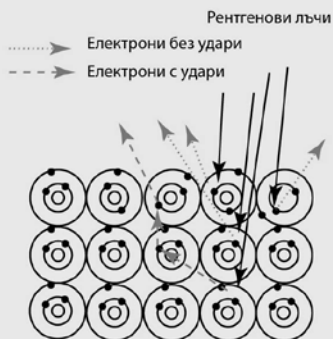
Фиг.6. Пречупване и отражение

пречупване на лъча между средите с комплексните коефициенти на пречупване

Фиг. 7. Схема на елипсометър



Рентгеновата фотоелектронна спектроскопия (XPS) се основава на фотоелектронния процес. Уравнението, което се използва за описване на фотоелектричния процес, е било получено от Айнщайн и носи името закон на фотоэффекта:



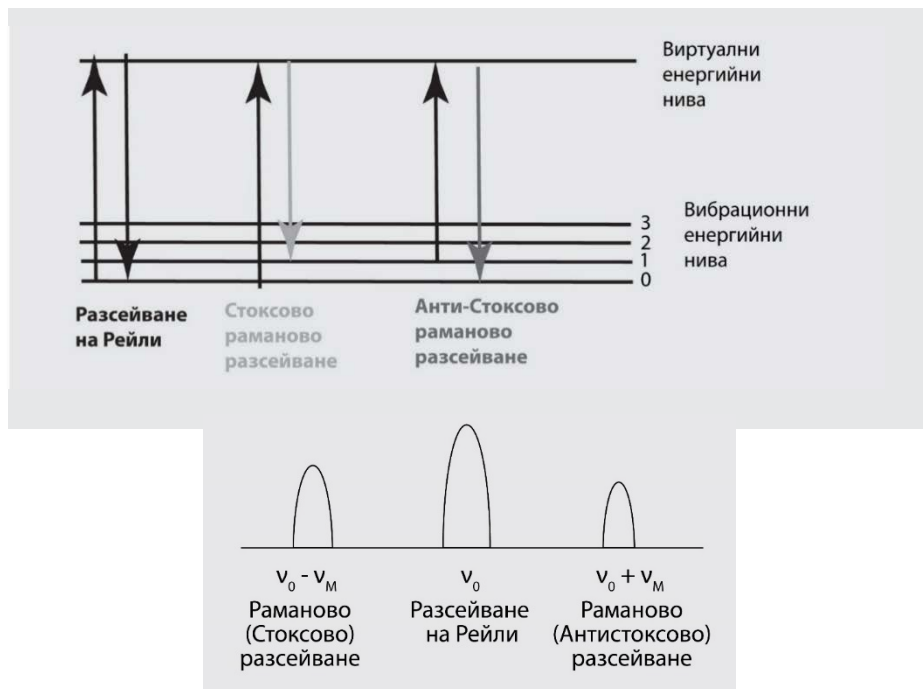
Фиг. 8. Избиване на електроните от рентгенови лъчи.

основата на XPS.

Енергетичният диапазон на фотоните е от 10eV (близо до енергията на връзката на водорода) до 0.1MeV . При тези енергии електроните могат, прониквайки в твърдото тяло, да взаимодействат с електроните от вътрешните обвивки на атомите.

Раманова спектроскопия (Raman) се основава на разсейването на светлината от материала. Разсейването бива три вида: еластично разсейване на Рейли, нееластично Стоксово и нееластично Антистоксово, както е показано на *Фиг. 9*.

Фиг. 9. Видове разсейване на светлината

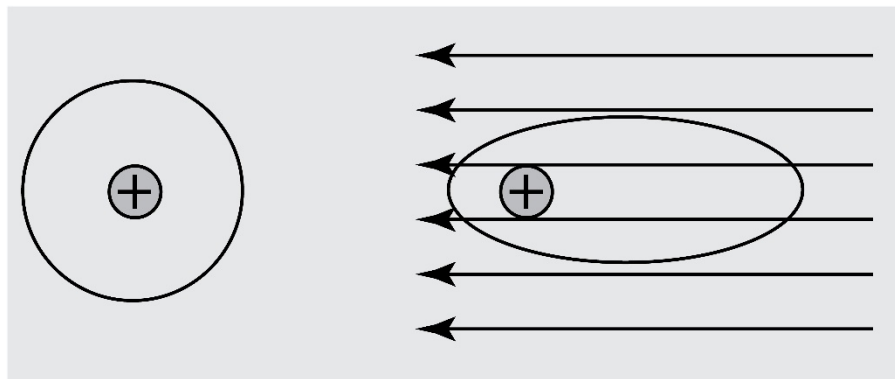


Вероятността за преминаване от по-високо на по-ниско енергетично ниво е малка поради високото населване на ниските нива и следователно

Фиг. 10. Принципна схема на спектър при Раманово разсейване

Антистоксовата линия е с по-малък интензитет (*Фиг.10*). Затова в практиката се изследват Стоксовите линии.

Фиг. 11. Поляризация на молекулата

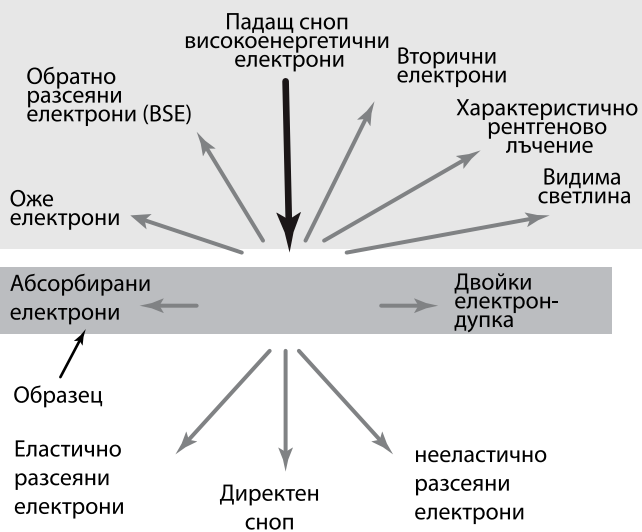


Електричното поле може да деформира електронния облак на молекулата и по този начин да създаде индуциран електричен диполен момент (*Фиг.11*). Електромагнитното излъчване ще създаде по този начин осцилиращ индуциран електричен диполен момент, който на свой ред ще излъчва електромагнитно лъчение.

Трансмисионна електронна микроскопия (ТЕМ) и сканираща електронна микроскопия (SEM) . Електронната микроскопия е подобна

на оптичната, но вместо светлина се използва електронен сноп, а вместо оптични лещи се използват електромагнити. Съгласно принципа на Де-Бройл електроните могат да се разглеждат като вълна и дължината на тази вълна е много по-малка от тази на светлината, което позволява в порядъци по-добра разделителна способност на микроскопа, тъй като разделителната способност и дължината на вълната са свързани с отношението:

Фиг. 12. Взаимодействие на електроните с веществото.



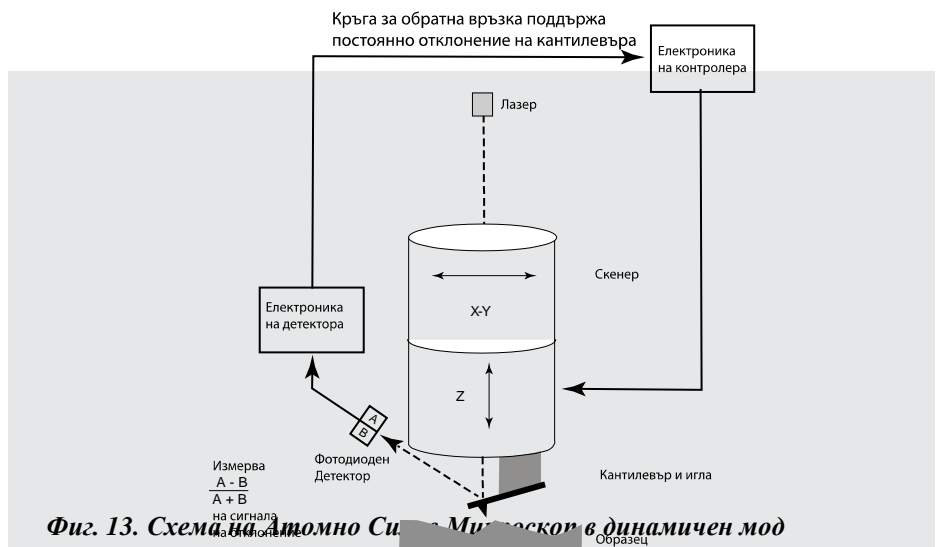
Принципът на действие на електронния микроскоп е следният. Източникът на електрони намиращ се в електронната пушка излъчва сноп високо енергетични електрони. Този сноп се насочва към образеца (който трябва да е тънък слой). Полученото изображение се увеличава чрез поредица от електромагнитни лещи. Изображението се проектира върху фосфоресциращ екран, CCD матрица или специална плака.

При Трансмисионните електронни микроскопи (ТЕМ) се използват: еластично разсеяни електрони, директен сноп (преминали електрони), нееластично разсеяни електрони.

Методът на Сканиращата електронна микроскопия (SEM) е подобен на трансмисионната, само че се използват обратно разсеяни електрони, Оже електрони и вторично разсеяни електрони.

Трансмисионният електронен микроскоп може да се използва и за получаване на дифракционна картина, по която може да се разбере дали веществото е аморфно, поликристално или кристално и да се измери константата на кристалната решетка и съответно да се определи вида на веществото.

Атомно силов микроскоп (AFM). Атомно силовият микроскоп (AFM) е техника за изобразяване релефа и анализ на повърхността с разделителна способност от порядъка на нанометри. Атомно силовият микроскоп работи на принцип подобен на грамофонната плоча. Игла с размери нанометри обхожда повърхността на образеца и описва релефа на повърхността. Съществуват няколко режима на работа на атомно силовия микроскоп – контактен, динамичен мод и проводящ. При проводящия режим се измерва тока, дължащ се на тунелирането на електрони между иглата и повърхността, като се получава



карта на проводимостта на повърхността на образеца. Контактният режим се използва при гладки повърхности, а динамичният мод (*Фиг.13*) при по-грапави.

В контактния режим AFM действа чрез сканиране на иглата, закрепена по повърхността на образеца, наблюдавайки промяната на отклонението, измервано с фотодиоден детектор. Иглата е в контакт с повърхността през адсорбиран слой флуид върху повърхността на образеца.

В динамичен мод AFM сканира повърхността на образеца с игла, закрепена на края на осцилиращ кантилевър. Кантилевърът осцилира с честота малко под резонансната с амплитуди от порядъка на 10 nm до 100 nm. Иглата леко потупва повърхността на образеца, придвижвайки се по x и y. Използва се при по-грапави образци

Най-разпространени са кантилеверите от силиций и силициев нитрид. Сондите от силициев нитрид се състоят от кантилевър с интегрирана остра игла на върха. Свойствата и размерите на кантилевера играят важна роля при определянето на разделителната способност на AFM.

Емпирична база на изследването

В тази глава са изложени експерименти, резултати и дискусия. Изложени са измерванията със Спектрометрия във видимата и ултравиолетовата област (UV/Vis), Елипсометрия, Рентгенова фотоелектронна микроскопия (XPS), Раманова спектрометрия (Raman), Трансмисионна електронна микроскопия (TEM), Сканираща електронна микроскопия (SEM) и Атомно силова микроскопия (AFM).

Подготовка на образците

Тънките слоеве диамантено подобен въглерод за нашия експеримент са отложени върху подложки от оптично стъкло и силиций по метода на филтрираната катодна дъга. Въглеродната плазма се създава от дъга от катод направен от 99.999% чист графит във висок вакуум. От дъгата се образува високо йонизирана въглеродна плазма. Плазмата се направлява към магнитен филтър, за да се елиминират неутрални частици и примеси и след това се насочва към подложката. Слоевите са получени при стайна температура.

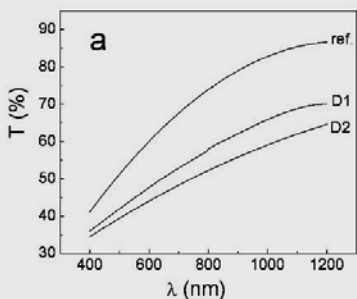
За подготовката на експеримента по йонна имплантация бе използвана програмата SRIM [4]. Тя моделира процеса на имплантация, използвайки метода на Монте Карло. Задават се енергия и вид на бомбардиращите йони, както и дебелина и вид на подложката (тя може да бъде многослойна). Програмата пресмята средния проектиран пробег R_p и девиацията ΔR_p . В нашия случай е избрана енергия $E=20 \text{ keV}$ и йонни дози $D=3.10^{14} \div D=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$. SRIM дава като резултат $R_p \sim 17 \text{ nm}$ и $\Delta R_p \sim 4 \text{ nm}$ за Ga^+ имплантирани йони в та-С слой с дебелина $d = 40 \text{ nm}$. При тези параметри областта на въздействие на йоните остава в диамантено подобния слой и не достига подложката, което е и целта на експеримента. Дозите са избрани на база на разглежданите по-горе изследвания на Тая Цветкова и Снежа Китова с галиеви йони имплантирани в a-SiC:H, като се очаква те да са достатъчно големи за получаване на аморфизация и графитизация на имплантираната област

Йонната имплантация на Ga^+ е проведена при стайна температура, използвайки промишлен широкоплощен имплантатор. Интензитетът на йонния сноп е $I \sim 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, енергията на йоните е $E=20 \text{ keV}$, а йонните дози са $D_1=3.10^{14}$ и $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

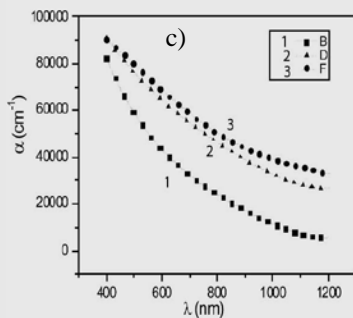
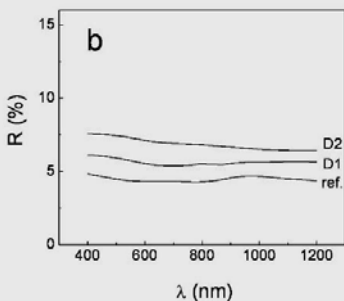
Спектрометрия във видимата и ултравиолетовата област на спектъра

Използвани са образците отложени върху стъкло, като те са три съответно — неимплантиран и имплантирани с дози $D_1 = 3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и $D_2 = 3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Оптичeskото пропускане T и абсолютният коефициент на отражение R са измерени с Cary 5E спектрофотометър при нормално падане на оптичния лъч в обхвата $350 \div 2500 \text{ nm}$ [5]. Оптичните константи на слоя са получени използвайки итеративната техника на Newton–Raphson (намиране на корените на функция, използвайки производната y') и производната y' Nelder–Mead техника (метод за намиране на локални минимума и максимуми в n -мерното пространство с помощта на $n+1$ мерен многоъгълник). Изчисленията по този начин резултати за коефициента на абсорбция за неимплантирания и за двете различни дози на Ga^+ ($D_1=3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$) са представени на **фиг.14**.

Измерванията показват значителна промяна (около 2 пъти и повече в различните спектрални области) на коефициента на абсорбция след имплантацията.



Фиг.14. Спектър на оптично пропускане (а), отражение (б) и коефициент на поглъщане (с) на *ta-C* за референтния образец (1) и имплантираните образци с Ga^+ с енергия 20 keV и дози $D_1 = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (2) и $D_2 = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (3).



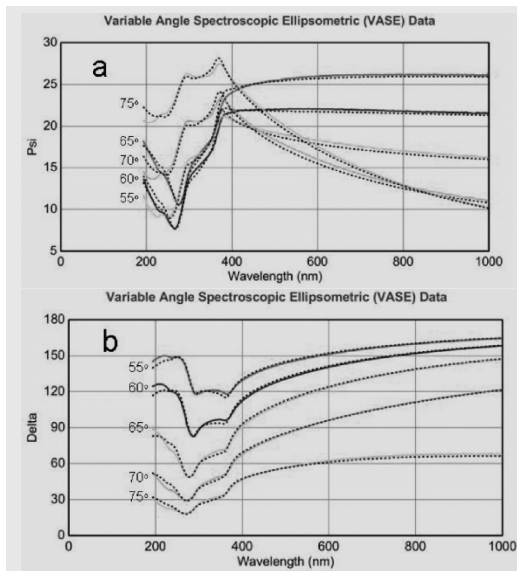
Измерените резултати за оптичното пропускане (T) и отражението (R) на неимплантираните и имплантираните с галий *ta-C* образци са представени на **фиг.14.a** и **фиг.14.b** респективно. Коефициента на поглъщането на слоевете α е показан на **фиг.14.c** и се определя от уравнението:

където d е дебелината на слоя, T_f и R_f са пропускането и отражението на слоя. T_f и R_f се получават от измерените пропускане T и отражение R , коригирано за приноса на стъклената подложка.

Резултатите от оптичните измервания показват, че дори и при ниски дози и енергии на имплантирания галий има значителни структурни промени и изменения на оптичните свойства при имплантираните слоеве, Увеличаването на коефициента на поглъщане достига около 2 пъти и повече за обхвата от дължини на вълните, в който са извършени измерванията, което е достатъчно за изпълняване на изискванията за оптичен контраст при запис на данни.

Елипсометрия

Изчислени са елипсометричните ъгли ψ и Δ и са получени резултатите от *фиг.15*.

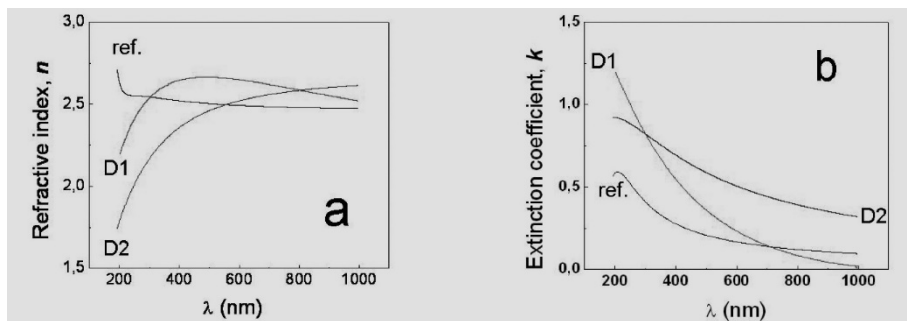


Фиг.15. Експериментални (плътните линии) и теоретични (пунктирните линии) зависимости на елипсометричните ъгли $\Psi(a)$ и $\Delta(b)$ за образец имплантиран с галиеви йони и доза $D_2=3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

На *фиг. 16* са показани кривите на дисперсия на коефициента на пречупване и екстинкция при трите случая (неимплантиран, имплантиран с галий с доза $D_1=3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и имплантиран с галий с доза $D_2 = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$). Вижда се, че за светлина с дължина на вълната над 400 nm коефициентът на пречупване при доза $D_1=3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ е по-голям от този на неимплантирания образец, а при дължина на вълната над 600 nm подобно поведение има и коефициентът на

пречупване на имплантирания с доза $D_2 = 3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ образец. При коефициента на екстинкция също се наблюдава увеличение с увеличаването на дозата.

Фиг.16. Криви на дисперсия за коефициента на пречупване $n(\lambda)$ а) и коефициента на екстинкция $k(\lambda)$ б) за референтен и имплантирани с доза $D1 = 3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и $D2 = 3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ образци.

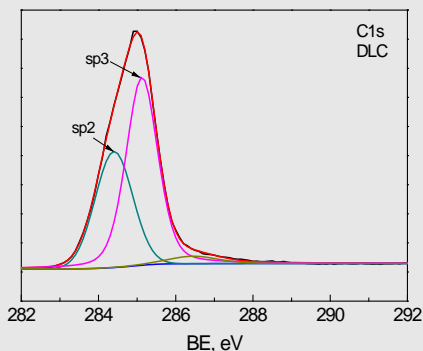


Чрез извършените експерименти е установено, че имплантацията на галий в диамантено подобните слоеве води до структурни промени в аморфната въглеродна матрица, които водят до увеличена абсорбция, увеличено отражение и намалена забранена зона. Наблюдаваните промени на коефициента на отражение и абсорбция се обясняват с формирането на галиеви колоидни капки (установено с TEM и SEM), внасянето на дефекти и модификацията на структурата на материала, включваща графитизация. Наблюдават се промени и на коефициентите на пречупване и екстинкция.

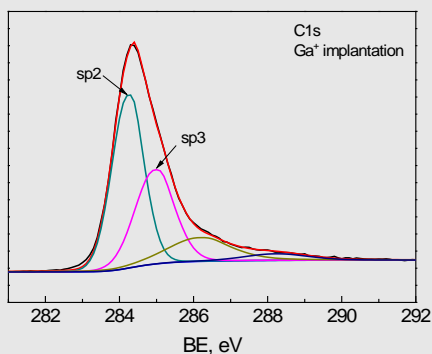
Рентгенова фотоелектронна спектроскопия (XPS)

Тънки ta-C слоеве ($d=40\text{nm}$), отложени върху оптично стъкло използвайки промишлена система за филтрирана катодна дъга FCVA (Commonwealth Scientific Corporation), и са имплантирани с галий при дози $D_1=3.10^{14}$ и $D_2=3.10^{15}$ с широкопощен конвенционален имплантатор.

Химичният състав и състоянието на елементите на диамантено-подобни слоеве на повърхността със и без имплантация с Ga^+ йони е изследвана с помощта на Рентгенова фотоелектронна спектроскопия (XPS) [6]. **Фиг.17.** и **18.** представляват C1s спектъра на неимплантирания и имплантирания с галий диамантено подобен слой.



Фиг. 17. C1s пик за неимплантиран образец



Фиг.18. C1s пик за имплантиран с Ga^+ образец с доза $D_2 = 3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$

Този пик може да бъде напаснат с четири компонента. Първите два са ситуирани около 284.4 eV и 285.0 eV и се асоциират с C-C връзката в sp^2 и sp^3 конфигурациите. Другите компоненти, имащи по-висока енергия на връзката, са свързани с наличието на C-O връзки върху повърхността на слоя.

Таблица 1

C1s Неимплантиран ta-C				
Пик	Позиция (eV)	Площ	FWHM (eV)	%GL (%)
0	284.400	24227,290	1.142	0
1	285.123	37737,990	0.968	28
3	286.450	2278,163	1.500	24

C1s Имплантиран ta-C с Ga⁺, доза 3.10¹⁵ cm⁻².

Пик	Позиция (eV)	Площ	FWHM (eV)	%GL (%)
0	284.224	28104,160	1.015	3
1	284.944	19102,700	1.250	6
3	286.136	8750,891	2.000	35
2	288,220	2264,289	2.000	20

Очевидно е от резултатите, че Ga⁺ йони конвертират sp³ връзките в sp². Повисоката доза на имплантация с галий предизвиква почти пълна трансформация на sp³ връзките в sp², което може да се види от **Таблица 1**.

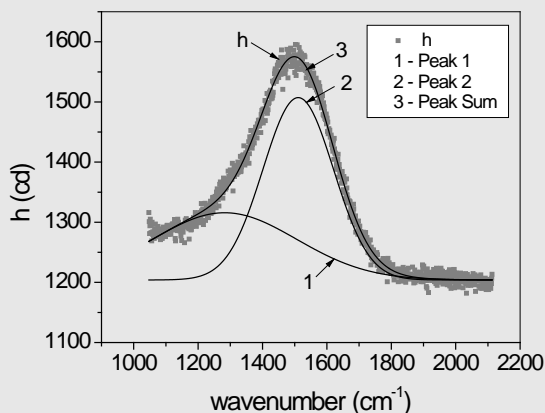
Получените резултати показват, че йонната имплантация води до значителна промяна на структурата на имплантираните слоеве, получавайки увеличена графитизация и промяна на електронните свойства.

Раманова спектроскопия (Raman)

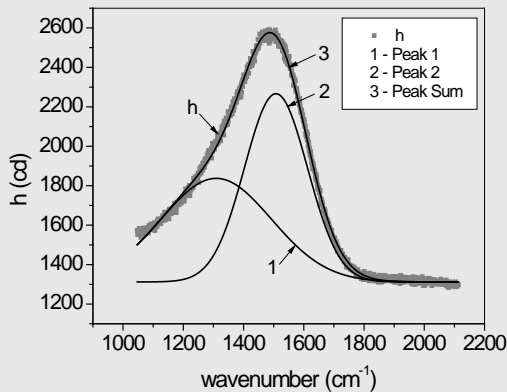
Тънки ta-C слоеве ($d \sim 40$ nm) са отложени върху подложка от кристален силиций c-Si (100), използвайки промишлена FCVA система (Commonwealth Scientific Corporation) и са имплантирани с галий при дози $D_1 = 3.10^{14} \div D_2 = 3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

Рамановите спектри са получени от LabRAM HR Visible (Horiba Jobin-Yvon) Раманов спектрометър [7]. Обектив X50 е използван едновременно да фокусира падащия лазерен сноп върху повърхността на образеца в петно $2 \mu\text{m}$ и да събира разсеяната светлина. За възбуждането се използва линията 633 nm на He-Ne лазер. За да се избегне прегряването мощността на лазера е редуцирана до 0.6 mW.

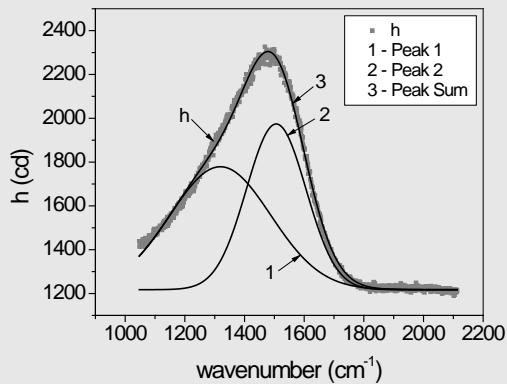
Директна информация от измерванията на интензитета не може да бъде получена, но промените в съотношението I_D/I_G на интензитетите на D и G пиковите в Рамановия спектър, могат да ни дадат информация за промяната на въглеродните връзки и структурата на слоя. По тази причина с цел да определим стойностите на I_D и I_G и да сравним техните интензитети е извършена деконволюция на рамановия спектър с помощта на програмата Origin и са получени съответно D и G пиковите (Фиг.19, 20 и 21).



Фиг.19. Деконволюция на Рамановия спектър на неимплантиран образец.



Фиг.20. Деконволюция на Рамановия спектър за имплантиран с Ga^{+} ta-C образец, при доза $D_1=3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$.



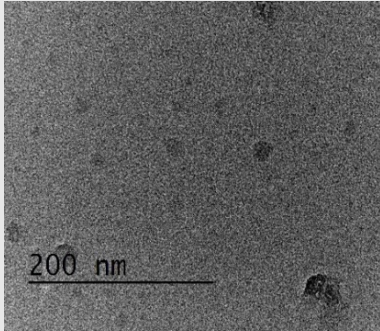
Фиг.21. Деконволюция на Рамановия спектър за имплантиран с Ga^{+} ta-C образец, при доза $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

Стойностите на FWHM (full width at half maximum) за G и D пиковите: $FWHM_G$ and $FWHM_D$ са получени за трите вида образци. Стойностите на $FWHM_G$ за неимплантираните и имплантираните с дози D_1 и D_2 са 219.35 cm^{-1} , 209.45 cm^{-1} и 199.92 cm^{-1} , респективно. Наблюдава се намаляване на $FWHM_G$. Това означава намаляване на съдържанието на sp^3 връзки и увеличаването на sp^2 . Структурните модификации предизвикани от йонната имплантация се свързват също с отместване на Рамановия пик наляво (към по-ниските честоти с увеличаване на дозата).

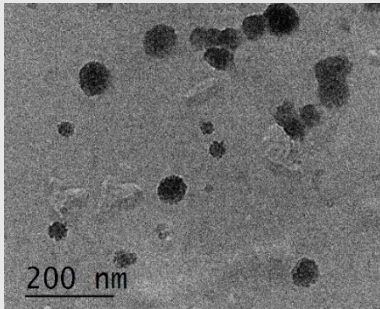
Резултатите от измерванията показват значителни промени в структурата на диамантено подобния слой в резултат от йонната имплантация. Наблюдава се

увеличение на безпорядъка, преминаване на sp^3 връзките в sp^2 и графитизация на слоя.

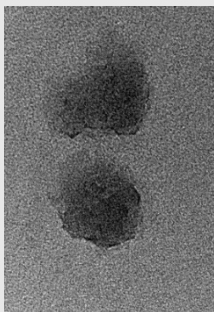
Трансмисионна електронна микроскопия



Фиг. 22.а. ТЕМ изображение на област имплантиран с Ga^+ ta-C слой с доза $D_1=3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$



Фиг. 22.б. ТЕМ изображение на област имплантиран с Ga^+ ta-C слой с доза $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$



Фиг. 22.с. ТЕМ изображение на област имплантиран с Ga^+ ta-C слой с $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ при по-високо увеличение

Тънки диамантено-подобни слоеве бяха отложени върху оптично стъкло и са имплантирани с галиеви йони с дози $D_1=3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$

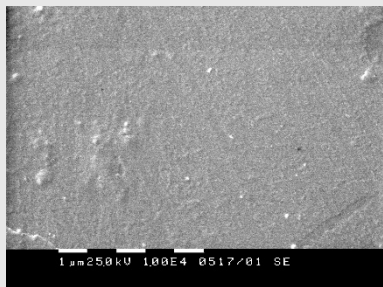
ТЕМ експериментът е проведен с помощта на High Resolution Scanning Transmission Electron Microscope JEOL JEM 2100 при енергия 200 keV и височина между обективната и прожекторната леци 25 cm.

Фиг.22.a представя ТЕМ изображението на чист ta-C слой без въздействие от имплантацията. На повърхността се виждат малко на брой тъмни петна, които се явяват дефекти в аморфната въглеродна матрица.

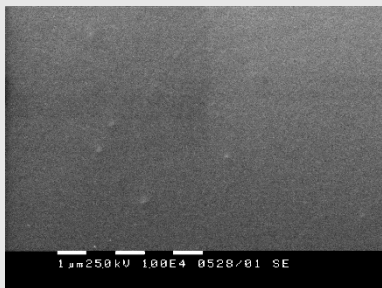
В случая на имплантиран с галий диамантено подобен слой въглерод ТЕМ изображенията (**Фиг.22.b и 22.c**) показват присъствието на отлагания от галий във формата на колоидни капки. Колоидните капки са приблизително сферични. Изследванията с ТЕМ в режим на дифракция SAED (Selected area electron diffraction) показват, че колоидните капки са от аморфен галий. Размера на тези колоидни капки нараства с нарастването на дозите на имплантацията. Тези резултати са с добро съгласие с предишни резултати на имплантирани с галий стъклени образци на P. D. Townsend [8].

Сканираща електронна микроскопия

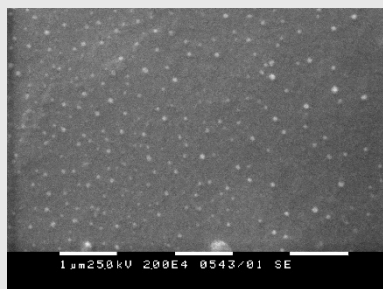
SEM експериментът е проведен с Philips 515 Сканиращ електронен микроскоп.



Фиг.23.a SEM изображение на неимплантиран ta-C слой, при енергия на електронния сноп 25 kV и увеличение:5000

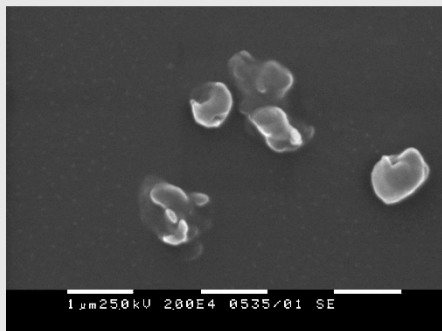


Фиг.23.б SEM изображение на неимплантиран ta-C слой, при енергия на електронния сноп 25 kV и увеличение:5000

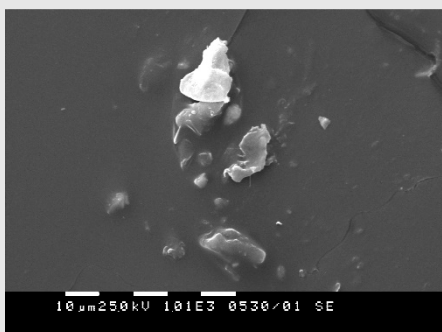


Фиг.23.в SEM изображение на неимплантиран ta-C слой, при енергия на електронния сноп 25 kV и увеличение:5000

На **фиг. 23.а** е показано изображението на неимплантиран образец, а на **фиг.23.б** и **23.в** са показани изображенията на имплантирани с Ga^+ с различни дози: $D_1=3.10^{14} \text{ cm}^{-2}$ и $D_2=3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$, съответно. Сравняваме ги с референтния образец (**фиг.23.а**). На **фиг.23.б** образецът с доза D_1 показва няколко изпъкналости. От **фиг. 23.в** се вижда силно увеличение на броя на тези изпъкналости. Наблюдаваните обекти са галиеви колоидни капки. Тяхната форма се вижда по-добре на следващите изображения с по-голямо увеличение, показани на **фиг 24.а** и **фиг.24.б**.



Фиг. 24.а. SEM изображение на имплантиран с Ga^+ ta-C слой и доза, $D_1=3.10^{14} cm^{-2}$, енергия на електронния сноп 25kV, увеличение: 20000



Фиг. 24.б. SEM изображение на имплантиран с Ga^+ ta-C слой и доза, $D_2=3.10^{15} cm^{-2}$, енергия на електронния сноп 25kV, увеличение: 20000

В заключение сканиращата електронна микроскопия ни дава възможността да наблюдаваме получаването на галиеви колоидни образувания в резултат на имплантацията. Тези галиеви колоидни кластери влияят на оптичните свойства, като водят до увеличаване коефициента на отражение.

Атомно силов микроскоп (AFM)

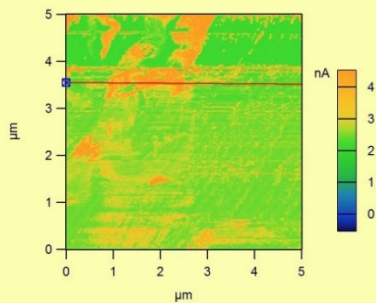
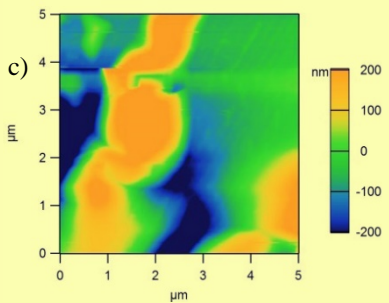
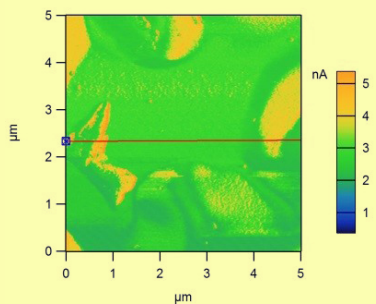
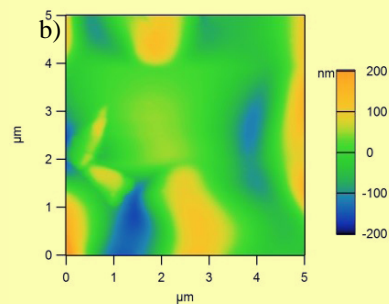
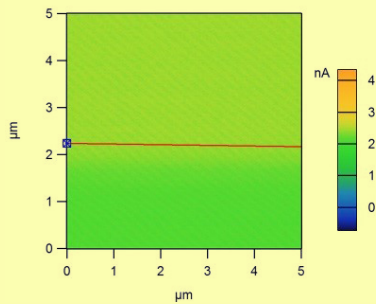
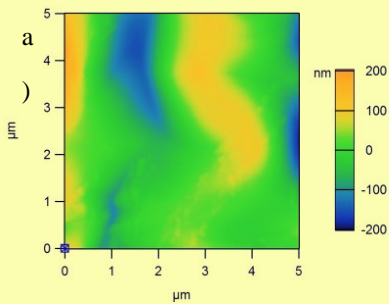
Тънки слоеве диамантено подобен въглерод (DLC) са получени с помощта на филтрирана катодна дъга и са имплантирани с галиеви йони при енергия $E=20keV$ и дози $D_1=3.10^{14} cm^{-2}$ и $D_2= 3.10^{15} cm^{-2}$. След това са изследвани с помощта на Атомно силов микроскоп (Conductive atomic force microscope (C-AFM)) модел MFP-3DTM, Asylum Research, Oxford Instruments в динамичен мод и проводящ режим за измервания на проводимостта на повърхността на образеца и второ измерване на грапавостта на повърхността на образеца . Изследвани са три образеца – неимплантиран, имплантиран с доза $D_1=3.10^{14} cm^{-2}$

² и имплантиран с доза $D_2 = 3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Резултатите от измерването на промяната на морфологията са показани на **фиг.25**.

От **фиг. 25** се вижда, че грапавостта нараства с дозата на имплантация. Това се обяснява с разпрашването на повърхността от бомбардиращите йони.

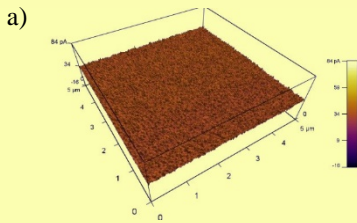
На **фиг.26** по долу е показана промяната на проводимостта на образеца в зависимост от дозата. Вижда се, че още при първата доза се наблюдава значително увеличение на проводимостта, което се обяснява с появата на графитени кластери при бомбардирането с галиеви йони показано от Рамановите и XPS изследванията. При увеличението на дозата проводимостта не се увеличава количествено, а само се увеличава плътността ѝ на повърхността. Липсата на увеличение на проводимостта може да се обясни със стопирането на получените графитени кластери от (увеличените по брой) галиеви колоидни капки. А увеличаването на броя проводящи области се обяснява с увеличаването на броя графитизирани области.

Резултатите от измерванията на тока по повърхността на имплантираните образци потвърждават горните резултати и са представени на **Фиг. 27, Фиг. 28 и Фиг. 29**.

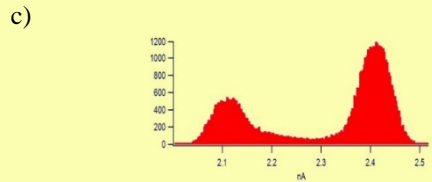
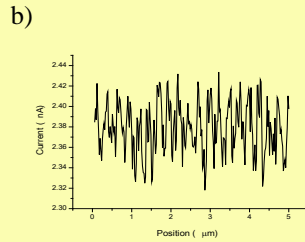


Фиг.25. AFM изображения на повърхността на DLC слой: неимплантиран (a), имплантиран с Ga^+ с доза $D_1=3.10^{14}$ (b) и $D_2=3.10^{15}$ (c).

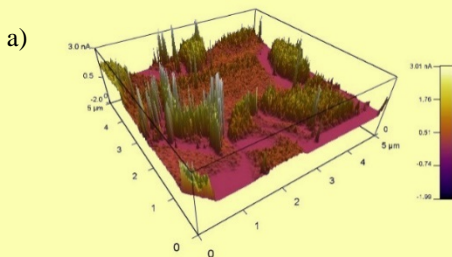
Фиг.26. AFM изображения на проводимостта на DLC слой: неимплантиран (a), имплантиран с Ga^+ с доза $D_1=3.10^{14}$ (b) и $D_2=3.10^{15}$ (c).



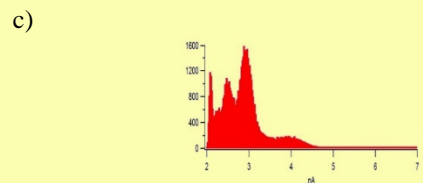
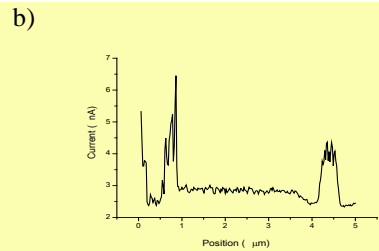
$I_{aver}=2,3 \text{ nA}$, $R_a=125 \text{ pA}$



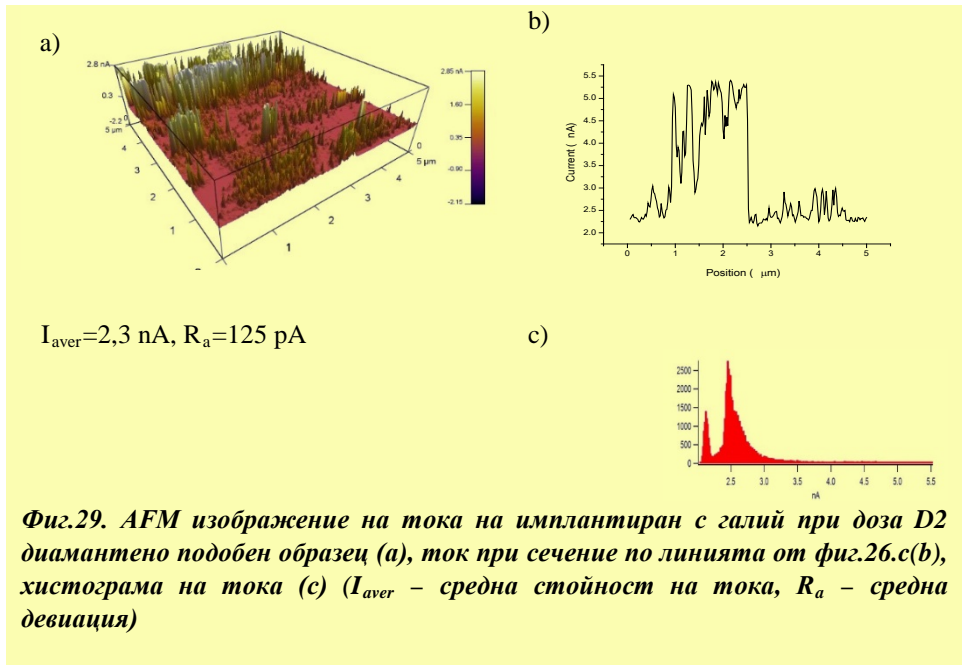
Фиг.27. AFM изображение на тока на неимплантиран диамантено подобен образец (a), ток при сечение по линията от фиг.26.a (b), хистограма на тока (c) (I_{aver} – средна стойност на тока, R_a – средна девиация)



$I_{aver}=2,3 \text{ nA}$, $R_a=125 \text{ pA}$



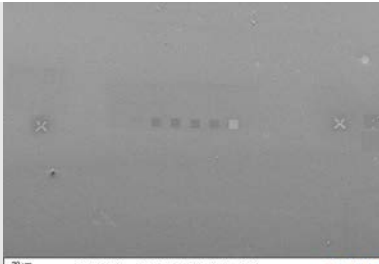
Фиг.28. AFM изображение на тока на имплантиран с галий при доза D1 диамантено подобен образец (a), ток при сечение по линията от фиг.26.b (b), хистограма на тока (c) (I_{aver} – средна стойност на тока, R_a – средна девиация)



Формиране на микро-изображения в диамантено-подобни слоеве чрез фокусирана йонна имплантация (FIB) с галиеви йони.

Системата за фокусирана йонна имплантация (FIB) на Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Германия, CANION 31Mplus column, Orsay Physics, работеща с Ga^+ йони, е използвана за създаването на субмикронни електрически и оптични изображения в ta-C слоеве с оглед различните им приложения.

На оптическите микрофотографски изображения показани на **фиг. 30** се виждат квадратчета имплантирани с различна доза и логото на Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Германия, получени чрез горната експериментална установка. На **фиг. 30.a** се регистрира увеличение на оптическия контраст с нарастване на дозата. Използваните дози са в обхвата $1 \times 10^{14} \div 5 \times 10^{16}$ йони. cm^{-2} , като при най-високата доза се наблюдава просветляване на слоя вследствие на неговото разпръскване и изтъняване от интензивния йонен сноп. Подобен ефект се наблюдава и на **Фиг. 30.b**. На **Фиг.31** са показани също имплантирани с фокусиран Ga^+ йонен сноп серия от оптически микро-изображения в ta-C слоеве при доза $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

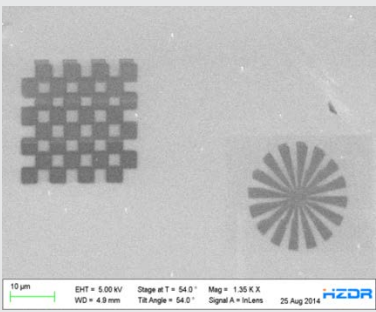


a) EHT = 5.00 kV Stage # T = 54.0° Mag = 290 X
WD = 4.9 mm TR Angle = 54.0° Signal A = SE31 22 Aug 2014 HZDR

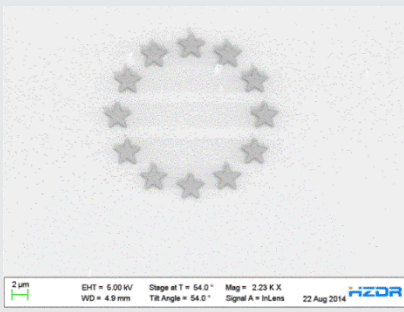


b) EHT = 5.00 kV Stage # T = 54.0° Mag = 8.17 K X
WD = 4.9 mm TR Angle = 54.0° Signal A = SE31 22 Aug 2014 HZDR

Фиг.30. Импантирани с йонен имплантатор с фокусиран йонен спон серия от изображения. Квадратите са с различна йонна доза в обхвата $1 \times 10^{14} \div 5 \times 10^{16}$ йони. cm^{-2} (a) и логото Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) импантирано с Ga⁺ импантирано с доза $5 \times 10^{15} cm^{-2}$ (b).



EHT = 5.00 kV Stage # T = 54.0° Mag = 1.30 K X
WD = 4.9 mm TR Angle = 54.0° Signal A = InLens 25 Aug 2014 HZDR



EHT = 5.00 kV Stage # T = 54.0° Mag = 2.23 K X
WD = 4.9 mm TR Angle = 54.0° Signal A = InLens 22 Aug 2014 HZDR

Фиг.31. Импантирани с йонен имплантатор с фокусиран йонен спон серия от изображения в та-С слоеве при доза $5 \times 10^{15} cm^{-2}$.

Апробация на резултатите от изследването

Получените резултати са в съгласие с предишни измервания на сходни системи и теоретичните постановки на йонната имплантация.

Научна новост на получените резултати

Експерименти в тази област се правени и досега, но за първи път са използвани тези материали и са изследвани по тези методи едновременно.

Практическа значимост на получените резултати

Резултатите от измерванията показват, че е възможен оптически запис с висока плътност на данните и голяма трайност с помощта на йонната имплантация.

Принос на дисертацията

1. Бяха определени началните оптимални параметри на йонната имплантация за получаване на оптичен запис в диамантено подобен слой с максимално висока плътност и дълготрайност.
 - Енергия - 20keV (определена чрез програмата SRIM)
 - Дебелина на слоя - 40 nm (максималната дебелина при която може да се отложи слоя.)
 - Дози – 3×10^{14} и 3×10^{15} (съобразена с предишни изследвания в силициев карбид, като са избрани по-ниските дози)
 - Материали – диамантено подобен въглерод (поради това, че е екологично чист, има широка забранена зона, ниска атомна маса, голяма твърдост и химическа устойчивост) ; галий – поради ниската температура на топене и висока атомна маса и като най-разпространен течно метален източник за йонна имплантация.
2. Чрез спектроскопски изследвания е получен оптичен контраст между имплантирана и неимплантирана области около 2 пъти в зависимост от разглеждания вълнов диапазон. Направените изследвания доказват възможността за използване на диамантено подобните слоеве за

високоустойчив на топлинни, химически и механични въздействия оптически запис на информация с максимално висока плътност.

3. Чрез различни методи е изследвано преструктурирането на слоя и фазовите промени в него. Основни резултати от проведени различни измервания адекватни на търсените резултати са: оптични промени, графитизация на диамантено подобния слой, поява на галиеви капки.
4. Представените нови материали за оптически запис в диамантено подобен въглерод имат преимущества по отношение на предишните резултати за аморфен силициев карбид, имплантиран с калай и германий, поради по-добрите качества на въглерода като екологичен, по-евтин и термично, химично и радиационно устойчив материал.
5. По-добрият оптически контраст при еднакви имплантационни йонни дози в оптически по-широкозонния диамантено подобен въглерод, в сравнение с аморфния силициев карбид, обаче остава да се докаже при евентуално по-добри образци от наличните ни до момента, за които още можеше да се желае като качество.

ИЗВОДИ

1. Измерванията потвърждават очакванията за получаване на оптичен контраст при йонната имплантация на галий в диамантено подобен въглерод и доказват наличието на структурни промени в изследвания слой. Наблюдават се промени в морфологията на повърхността, връзките и структурата на слоя. Получените резултати показват значителна промяна на електронните и оптическите свойства на слоя. Получава се промяна на съдържанието на sp^2 и sp^3 въглеродните връзки, като се увеличава съдържанието на sp^2 връзките в сравнение на sp^3 връзките, т.е. имаме графитизация на диамантено подобния въглерод. Йонната имплантация влияе също така на широчината на забранената зона, като я стеснява, поради появата на нови нива предизвикано от създаването на дефекти в имплантираната област, което води до увеличаване коефициента на поглъщане.

2. Чрез UV/Vis оптическа спектроскопия е получено нарастване на коефициента на поглъщане с около 2 и повече пъти, което е достатъчно за запис и четене в режим на трансмисия. Действието на имплантацията се разпростира и върху промяна на коефициента на пречупване и екстинкцията, като екстинкцията и коефициента на пречупване се увеличават с увеличение на дозата.
3. Измерванията чрез Раманова и Рентгенова фотоелектронна спектроскопия показват, че има увеличение на графитената фаза. Увеличаването на графитената фаза води до увеличаване коефициента на поглъщане.
4. ТЕМ и SEM измерванията доказват създаването на колоидните образувания от Ga в обема на слоя, като размерът на капките нараства с увеличение на дозата. Това води до увеличение на коефициента на отражение.
5. Чрез измерванията с AFM и C-AFM е получено силно увеличение на проводимостта още при най-малката доза, което се дължи отново на графитизацията на слоя. При увеличаване на дозата не се наблюдава значителна разлика на проводимостта, което обясняваме със спиращото въздействие на галиевите колоидни капки спрямо проводящите графитени кластери.
6. Показаните измервания потвърждават тезата, че е възможен оптичен запис със висока плътност върху слоеве от диамантено подобен въглерод с галиеви йони. Тъй като FIB системите с Ga⁺ йони са най-широко разпространени и компактни измежду FIB системите с различни течно метални източници, това дава надежди за прилагането на този метод в бъдеще в практиката
7. Показаните в глава 9 изображения илюстрират нагледно възможностите на метода на фокусираната йонна имплантация при избраните материали за запис на информация.

8. Представените нови материали за оптически запис по метода на йонната имплантация имат преимущества по отношение на предишните резултати за аморфен силициев карбид, поради по-добрите качества на въглерода като екологичен, по-евтин и термично, механично, химично и радиационно устойчив материал. В сравнение с други методи преди това, използваният при това изследване метод е много по-достъпен и по-евтин. По-добрият оптически контраст при еднакви имплантационни йонни дози в оптически по-широкозонния диамантено-подобен въглерод, в сравнение с аморфния силициев карбид, обаче остава да се докаже при евентуално по-добри образци от наличните ни до момента, за които още можеше да се желае като качество.

Библиография

- [1] [1] S. Kalbitzer / Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 218 (2004) 343–354
- [2] 37. L.Bischoff, J.Teichert, S.Kitova and T.Tsvetkova: “Optical pattern formation in a-SiC:H films by Ga⁺ ion implantation”, Vacuum, 69(2003)73.
- [3] Денис Синевков, Фотометър, Фотометрични методи, курсова работа, НБУ 2013
- [4] J.F.Ziegler, J.P.Biersack, U.Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Matter*, 1985, Vol.1, Pergamon, New York.
- [5] T.Tsvetkova, M.Berova, M.Sandulov, S.Kitova, L.Avramov, R.Boettger and L.Bischoff: “Focused ion beam optical patterning of ta-C films”, Surface and Coatings Technology”, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.088.
- [6] M.Berova, M.Sandulov, T.Tsvetkova, I.Avramova, R.Boettger and L.Bischoff: “X-Ray Photoelectron Study of Ion Implanted Tetrahedral Carbon”, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 92, n. 8, 2016, pp. 59-61, doi:10.15199/48.2016.08.16.
- [7] M.Berova, M.Sandulov, T.Tsvetkova, L.Bischoff, R.Boettger and M.Abrashev: “Vibrational spectroscopy of Ga⁺ ion implanted ta-C films”, J. Phys.: Conf. Ser., 682(2016)012020.
- [8] Hole D E, Townsend P D, Barton J D, Nistor L C and Van Landuyt J: “Gallium colloid formation during ion implantation of glass”, J. Non-Cryst. Solids, 180 (1995) 266.

Списък публикации и участия в конференции

Дисертацията се основава на следните публикации:

- [1] **M.Berova**, M.Sandulov, T.Tsvetkova and L.Bischoff: “Ion implantation applications for high density data archiving in diamond-like carbon”, University of Plovdiv, Sci. Studies, Vol.39, FASC.4, 2015, p.102.
- [2] **M.Berova**, M.Sandulov, T.Tsvetkova, D.Karashanova, R.Boettger and L.Bischoff: “Structural modification of Ga⁺ and N⁺ ion implanted ta-C films”, J. Phys.: Conf. Ser., 700(2016)012035.
- [3] **M.Berova**, M.Sandulov, T.Tsvetkova, I.Avramova, R.Boettger and L.Bischoff: “X-Ray Photoelectron Study of Ion Implanted Tetrahedral Carbon”, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 92, n. 8, 2016, pp. 59-61, doi:10.15199/48.2016.08.16.
- [4] **M.Berova**, M.Sandulov, T.Tsvetkova, L.Bischoff, R.Boettger and M.Abrashev: “Vibrational spectroscopy of Ga⁺ ion implanted ta-C films”, J. Phys.: Conf. Ser., 682(2016)012020.
- [5] T.Tsvetkova, **M.Berova**, M.Sandulov, S.Kitova, L.Avramov, R.Boettger and L.Bischoff: “Focused ion beam optical patterning of ta-C films”, Surface and Coatings Technology”, **IF: 2,2**, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.088.
- [6] **M.Berova**: “Surface characterisation of Ga⁺ ion implanted ta-C thin films”, J. Phys.: Conf. Ser., 794 (2017) 012011 doi:10.1088/1742-6596/794/1/012011
- [7] **M.Berova**, M.Sandulov, T.Tsvetkova, S. Kitova, L.Bischoff, R.Boettger and J.Zuk: “Ion beam induced surface modification of ta-C thin films”, Acta Physica Polonica A, 2017, **IF: 0,61**, 132(2017)299.
- [8] **M. Berova**, M. Sandulov, T. Tsvetkova, A. Szekeres, P. Terziyska, S. Kitova, R. Boettger and L. Bischoff: “Optical contrast formation in ta-C films by ion implantation”, Revue Roumaine de Chimie, 2017, **IF: 0,39**, 62(10)761.

Участия в конференции и докторантски срещи:

1) XVI-ти Зимен Семинар “ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНА ФИЗИКА - модерната физика” на младите учени и докторанти от институтите на БАН на 8ми км /ИФТТ, ИЯИЯЕ, ИЕ, ЦЛСЕНЕИ, НИХМ и ИА/, 06-08 декември 2013, Творчески дом на БАН ”Златни мостове” – Витоша:

M.Берова, М.Сандулов, Т.Цветкова, Л.Бишоф: “Йонна имплантация за архивиране на наноразмерни данни в диамантено подобен въглерод”;

2) The X-th International Conference on Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons - ION 2014, Kazimierz Dolny, Poland, June 23-26, 2014 :

М.Сандулов, **M.Берова**, Т.Тsvetkova and J.Zuk: “Ion beam induced darkening in tetrahedral

amorphous carbon thin films”;

3) The 9th International Conference on New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation - NEET 2015, Zakopane, Poland, June 23 - 26, 2015:

M.Берова, М.Сандулов, Т.Тsvetkova, I.Аvramova, R.Boettger and L.Bischoff: “X-Ray Photoelectron Study of Ion Implanted Tetrahedral Carbon”;

4) The XIX-th International School on Vacuum, Electron and Ion Technologies – VEIT 2015, Sozopol, Bulgaria, 21 – 25 September, 2015:

M.Берова, М.Сандулов, Т.Тsvetkova, D.Karashanova, R.Boettger and L.Bischoff: “Structural modification of Ga+ and N+ ion implanted ta-C films”;

5) INERA Conference 2015: Light in Nanoscience and Nanotechnology - LNN 2015, Hissar, Bulgaria, 19 – 22 October, 2015:

M.Берова, М.Сандулов, Т.Тsvetkova, L.Bischoff, R.Boettger and M.Abrashev: “Vibrational spectroscopy of Ga+ ion implanted ta-C films”;

6) The 19th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams - SMMIB-19, Chiang Mai, Thailand, 22-27 November 2015:

Т.Тsvetkova, **M.Берова**, М.Сандулов, S.Kitova, L.Аvramov, R.Boettger and L.Bischoff: “Focused ion beam optical patterning of ta-C films”;

7) XVIII-ти Зимен Семинар “ИНТЕРДИСЦИПЛИНАРНА ФИЗИКА - модерната физика” на младите учени и докторанти от институтите на БАН на 8ми км

/ИФТТ, ИЯИЯЕ, ИЕ, ЦЛСЕНЕИ, НИХМ и ИА/, 04-06 декември 2015, Творчески дом на БАН ”Златни мостове” – Витоша:

М.Берова, М.Сандулов, Т.Цветкова, Л.Бишоф: “Наноразмерен оптически запис на информация чрез йонна имплантация в диамантено подобен въглерод”;

8) IV-та Национална Студентска Научна Сесия по Физика и Инженерни технологии, 25-27 май 2015 година, град Пловдив:

М.Берова, М.Sandulov, Т.Tsvetkova and L.Bischoff: “Ion implantation applications for high density data archiving in diamond-like carbon”.

9) The XI-th International Conference on Ion Implantation and other Applications of Ions and Electrons - ION 2016, Kazimierz Dolny, Poland, June 13-16, 2016 :

М.Берова, М.Sandulov, Т.Tsvetkova, S. Kitova, L.Bischoff, R.Boettger and J.Zuk : “Ion beam induced surface modification of ta-C thin films”;

10) The XIX-th International School on Condensed Matter Physics - ISCMP 2016, Varna, Bulgaria, August 28th till September 2nd, 2016:

М.Берова : “Surface characterisation of Ga⁺ ion implanted ta-C thin films”

11) International Conference of Physical Chemistry – ROMPHYSICHEM, Galați, Romania, September 21-24, 2016:

М. Берова, М. Sandulov, Т. Tsvetkova, А. Szekeres, P. Terziyska, S. Kitova, R. Boettger and L. Bischoff: “Optical contrast formation in ta-C films by ion implantation”.