



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

**ДЕПАРТАМЕНТ ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧНИ И ТЕХНИЧЕСКИ
НАУКИ**

КАТЕДРА „ФИЗИКА”

инж. Силвия Веселинова Пехливанова

**Изследване свойствата на ултра-нанокристални диамантени
слоеве. Фотоелектрохимично приложение**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”

по научна специалност 4.1. Физични науки

(Електрични, магнитни и оптични свойства на кондензираната материя)

Научни ръководители:

проф. д-р инж. Пламен Петков

проф. д-р инж. Тамара Петкова

Научно жури:

1. Доц. д-р Ружа Харизанова – председател
2. Проф. д-р Дориана Малиновска – рецензент
3. Доц. д-р инж. Йорданка Трифонова – рецензент
4. Доц. д-р Димана Назърова
5. Проф. д-р Тамара Петкова

София, 2016

Дисертационният труд е написан на 138 страници, съдържа 87 фигури и 7 таблици. Цитирани са 147 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на катедрен научен съвет на научното звено на катедра „Физика”, състояло се на 28.03.2016 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 01.07.2016 г. от 14.00 часа в зала 424, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересувашите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

Диамантът притежава уникални свойства, които през последните десетилетия все повече привличат интереса на голяма научна и инженерна общност. Диамантът е широко използван в редица области, започвайки от механиката, минавайки през електрониката и достигайки до електро- и биохимията. Интересът към диаманта произтича от неговите изключителни свойства като висока топлопроводимост, твърдост, голяма химична инертност и здравина, коефициент на триене.

За съжаление естественият диамант е рядко срещан и поради тази причина изключително скъп материал. Решение на този проблем предлага разработването на техники за синтезиране на изкуствени диаманти. Получените по изкуствен път диаманти са със сходни или дори по-добри свойства от тези на естествения кристал.

В тази посока методът на химическо отлагане на пари (Chemical Vapor Deposition) е най-обещаващият метод за синтезиране на изкуствени диаманти, позволяващ отлагане на диамантени слоеве с голяма площ и висока степен на чистота. Един от най-важните аспекти при отлагане на синтетични диаманти е дотирането им с различни елементи. Най-често синтетичните диамантени слоеве се отлагат върху силициеви подложки поради високата термична и механична стабилност на силиция.

Ние сме получили бор дотирани тънки нанокристални диамантени слоеве по метода на химическо отлагане на пари при ниска температура и налягане. Използвани са различни методи за модификация на диамантената повърхност с цел увеличаване на хидрофилността на слоевете. Качеството на отложените филми е охарактеризирано с помощта на Раманова спектроскопия, рентгенова фотоелектронна спектроскопия и сканираща електронна микроскопия.

В настоящата работа сме намерили приложение на уникалните свойства на диаманта и в електрохимията, които са извън обсега на всеки конвенционален полупроводников материал.

Цел и задачи

Целта на настоящата работа е да бъдат създадени бордотирани диамантени електроди с отложен върху тях каталитичен слой от фталоцианин за очистване на вода от нитрати.

Основни задачи, поставени въз основа на целта на настоящата работа:

- Получаване на тънки нанокристални диамантени слоеве по метода на химическо отлагане на пари (CVD-метод);
- Охарактеризиране морфологията и качеството на получените слоеве със СЕМ;
- Модифициране повърхността на слоевете с кислородна / амонячна плазма и ултравиолетова модификация за по-лесно и ефективно отлагане на катализатор върху тях;
- Нанасяне на каталитичен фоточувствителен филм (фталоцианин) върху диамантените слоеве посредством два различни метода:
 - 1) чрез потапяне на слоевете в разтвор на фталоцианин;
 - 2) чрез вакуумно-термично изпарение;
- Изследване на очувствените с фталоцианин диамантени слоеве;
- Електрохимично охарактеризиране и тестване на фоточувствителните диамантени слоеве като електроди за очистване на вода от нитрати.

Експериментална част

В настоящата работа посредством метода химическо отлагане на пари (Hot Filament Chemical Vapor Deposition) върху силициеви подложки са отложени тънки нанокристални диамантени слоеве дотирани с бор. Слоевете са без тримерни дефекти и с хомогенна повърхност. Изградени са от добре оформени нанокристали с диаметър от няколко стотин нанометра.

Получените диамантени филми са детайлно изследвани и охарактеризирани с помощта на съвременни методи за анализ. След което са тествани като материал за електроди за очистване на вода от нитрати.

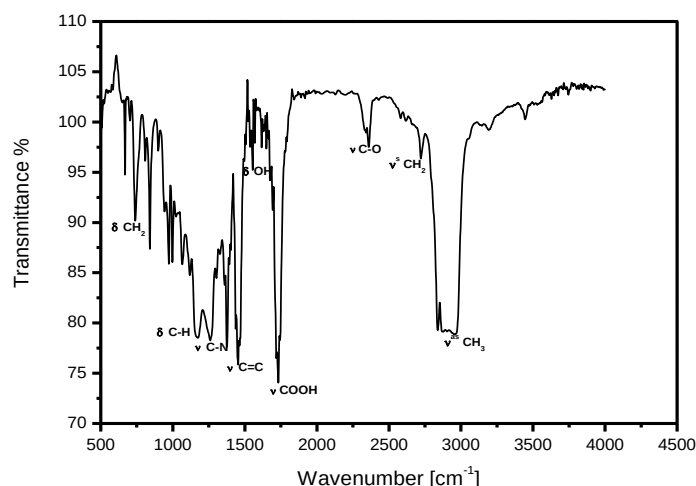
В настоящата работа върху повърхността на диамантените филми са закачени фоточувствителни молекули (фталоцианин). С цел оптимизиране закачането им, повърхността на отложените филми се модифицира с помощта на кислородна плазма, амонячна плазма и ултравиолетова светлина. Обработката на пробите с кислородна плазма и с ултравиолетова светлина води до образуване на ОН групи на повърхността на диамантените филми, а третирането с амонячна плазма води до генериране на NH_2 групи. С цел да се провери как се променят свойствата на диамантените слоеве след различните модификации по метода на неподвижната капка (sessile drop method) са измерени контактните ъгли на пробите. Промяната на функционалните групи на модифицираните диамантени повърхности води до намаляване на контактния ъгъл от 68° при немодифицирана проба съответно до 18° (UV/ O_3 -модифициране), 20.6° (O_2 - плазма), 26.9° (NH_3/N_2 - плазма) и до промяна на свойствата на слоя от хидрофобни до хидрофилни. Наблюдаваните промени доказват, че повърхността на пробите е успешно модифицирана и техните свойства са силно повлияни от направените модификации.

В настоящата работа като каталитичен слой за нанасяне върху диамантените слоеве е използван манганов фталоцианин. Той е нанесен по два различни метода - чрез потапяне на диамантените слоеве в разтвор на манганов фталоцианин и чрез вакуумно-термично отлагане.

Фталоцианиновият комплекс е охарактеризиран с помощта на спектроскопски методи – инфрачервена спектроскопия (ИЧ) и оптична спектроскопия (UV–VIS).

- - Инфрачервена спектроскопия

Прахообразният манганов фталоцианин е разтворен в CH_2Cl_2 до достигане на концентрация $1 \mu\text{M}$.



Фигура 50: ИЧ спектроскопия на ($C_{128}H_{208}ClMnN_8S_8$) в област $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$

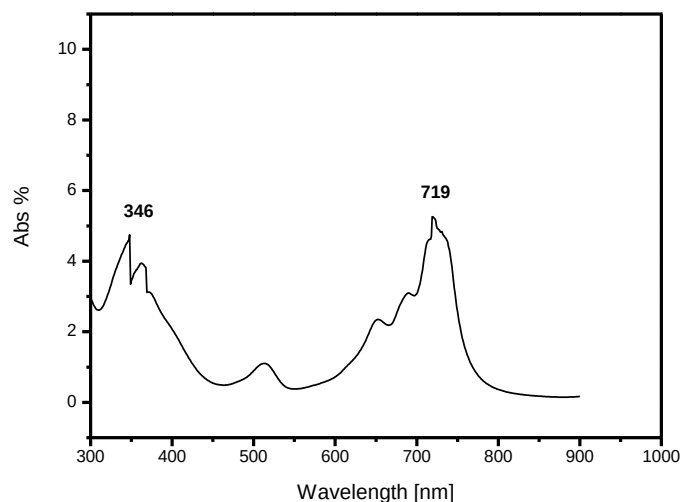
В ИЧ спектъра на мангановия фталоцианин се наблюдават значителен брой пикове, дължащи се на относително сложният строеж на молекулата му. По-голямата част от пиковите се намират в средната инфрачервена област. В този спектрален диапазон пиковите, свързани с централния метален атом, не се наблюдават. Инфрачервените спектри, обаче, би трябвало да отразят промените, които настъпват в конфигурацията на фталоцианиновия макроцикъл при въвеждането на шаблонен централен метален атом.

В далечната част на спектъра, при около 4000 cm^{-1} , се наблюдават множество малки ивици, дължащи се на валентни колебания на ОН групи. Ивиците, наблюдавани при 3444 cm^{-1} се отдават на деформационни колебания на N-H групи. При 2970 cm^{-1} , 2872 cm^{-1} и 2837 cm^{-1} се регистрират други по-малки ивици. Те се дължат на асиметрични и симетрични валентни колебания на разтягане на метилови групи и съответно на симетрични колебания на метилен. При около 2500 cm^{-1} се наблюдават ивици, отговарящи на някои въглерод - кислородни връзки, а при 1750 cm^{-1} се наблюдават ивици на COOH групи. Пикът, регистриран при 1651 cm^{-1} , се отдава на валентни колебания на ОН групи. Слабите вибрации между $1580\text{--}1610\text{ cm}^{-1}$ са резултат от C-C връзки, докато C = C ароматните връзки, характерни за фталоцианиновия пръстен, се намират между $1450\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$. При около 1610 cm^{-1} са регистрирани валентни колебания на C - N връзки. При 1415 cm^{-1} и 1491 cm^{-1} се наблюдават силно изразени ивици, дължащи се на деформационни колебания на C - H връзки, като се застъпват с валентни колебания на изоиндолови групи при 1480 cm^{-1} и 1421 cm^{-1} . Наблюдаваните

ивици при около 1272 - 1268 cm^{-1} най-вероятно се дължат на симетрични валентни колебания на C – N връзки. При 1111 cm^{-1} и 752 cm^{-1} се наблюдават ивици, съответстващи на симетрични трептения на изоиндолови фрагменти, характерни за фталоцианиновия пръстен. Ивицата при 721 cm^{-1} се отдава на деформационни валентни колебания на CH_2 групи [137], [138].

- Оптична спектроскопия

При изследването отново е използван разтворен в CH_2Cl_2 фталоцианин. Пробите са сканирани в диапазон 300 - 900 nm с честота на сканиране 600 nm/min. Като референтен разтвор е използван CH_2Cl_2 .



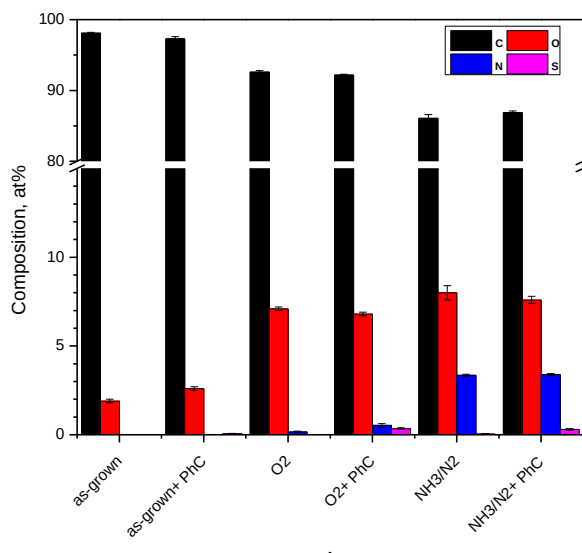
Фигура 51: UV-VIS спектри на MnPc, разтворен в CH_2Cl_2

Мангановият фталоцианин показва силни абсорбционни свойства в ултравиолетовата област при около 346 nm (B band) и във видимата област съответно при 719 nm (Q band). В областта 450 - 600 nm разтворът до голяма степен пропуска светлината. Интензивният абсорбционен пик при 719 nm и по-слабо изразеният пик при 684 nm са много характерни за фталоцианини, съдържащи S и O, или S, O и N циклични заместители [139].

За изследване и охарактеризиране на диамантените слоеве с отложен върху тях каталитичен слой от фталоцианин са използвани следните методи:

- Рентгенова фотоелектронна спектроскопия

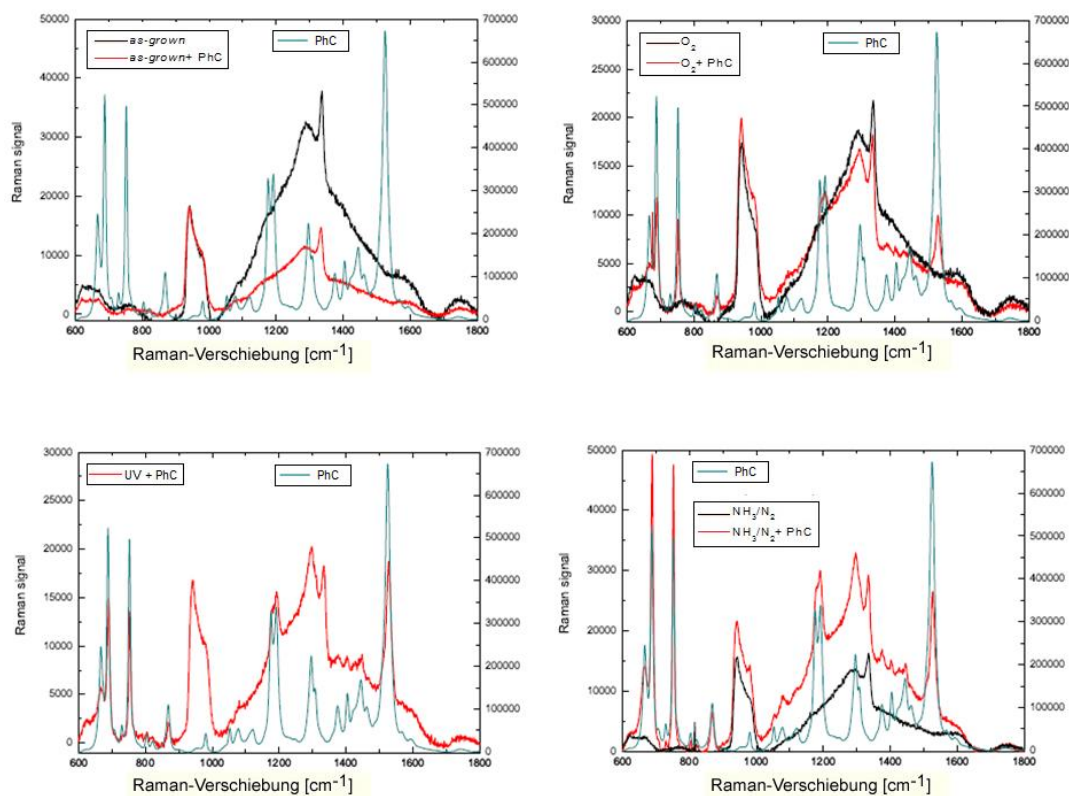
За определяне на химичния състав на повърхността на диамантените слоеве пробите са изследвани с рентгенова фотоелектронна спектроскопия.



Фигура 56: C-, O-, N- и S- съдържание в пробите

При пробите с различна модификация, се забелязва значително увеличаване на съдържанието на кислород и азот. Това е резултат от обработването на пробите с кислородна и амонячна плазма и е показател за успешна модификация на повърхността на слоевете.

- Раманова спектроскопия



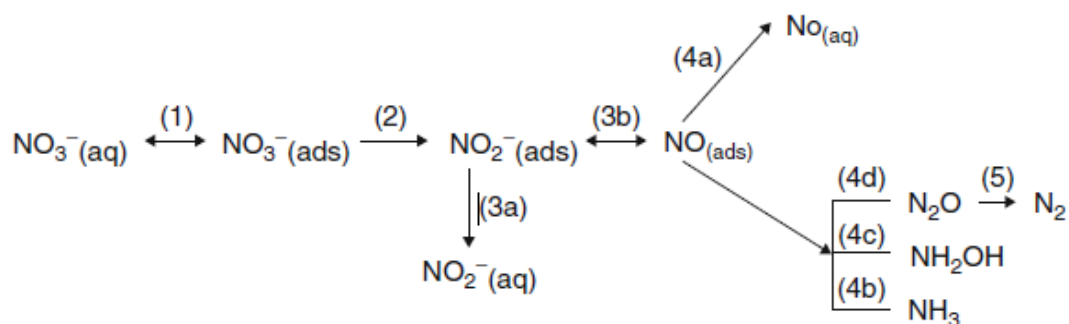
Фигура 63: Раманова спектроскопия на изследваните проби при дължина на вълната 785 nm

На спектрите на всички модифицирани проби, с изключение на немодифицираната проба, се наблюдават пикове, характерни за фталоцианина. Това показва успешното закачане на фталоцианин върху обработените с плазма и UV-модификация диамантени повърхности.

- Провеждане на електрохимични изследвания. Редукция на нитрати

Като последна стъпка от настоящата работа получените тънки нанокристални диамантени слоеве с отложен върху тях фталоцианин са подложени на фотоелектрохимични изследвания. Това е направено с цел да се проучи влиянието на фталоцианина върху процеса на почистване на вода от нитрати при осветяване с източник на светлина с дължина на вълната в близост до максимума на абсорбция на фталоцианините.

Електрохимичната редукция на нитрати преминава през няколко етапа, като основните от тях са онагледени на фигура 67:



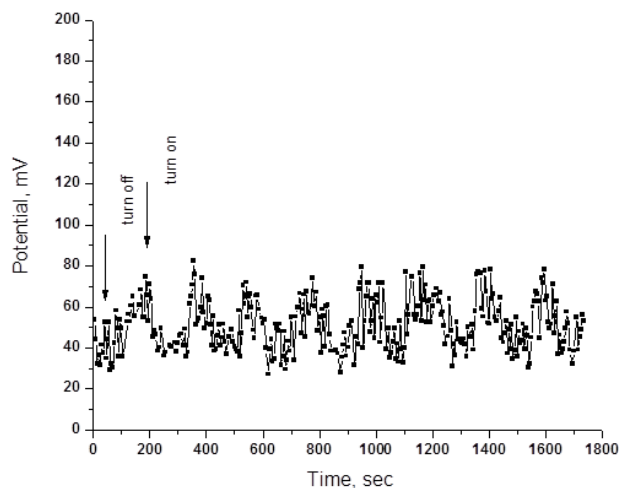
Фигура 67: Последователност на електрохимична редукция на нитрати [143]

- 1) Транспорт на изходните вещества към електрода;
- 2) Адсорбция на изходните вещества върху електрода с последваща реакция на дисоциация;
- 3) Пренос на електрони през фазовата граница;
- 4) Десорбционни процеси върху електродната повърхност;
- 5) Абсорбция на реакционните продукти в разтвора.

Пригответените диамантени електроди са охарактеризирани електрохимично с циклична волтаперометрия. Електрохимичните изследвания са проведени в триелектродна клетка. Като работен електрод е използван описаният бор дотиран диамантен електрод с работна повърхност $0,5 \text{ cm}^2$. Като противоелектрод и сравнителен електрод са използвани съответно платина, пластина с площ 2 cm^2 , и стандартен каломелов електрод $[\text{Hg}/\text{HgCl}_2 \text{ в } \text{KCl}]$. Експериментите са проведени в два водни електролита, първият от които е така нареченият фонов електролит, несъдържащ нитратни йони $0,1\text{M KCl}$ и основен работен електролит $0,1\text{M KNO}_3$.

- Изменение на потенциала с времето при импулсно подаване на светлина (Open circuit potential)

Целта на това изследване е да се установи променя ли се равновесният потенциал на потопения в разтвор електрод от диамант с нанесен върху него фталоцианин при осветяване.

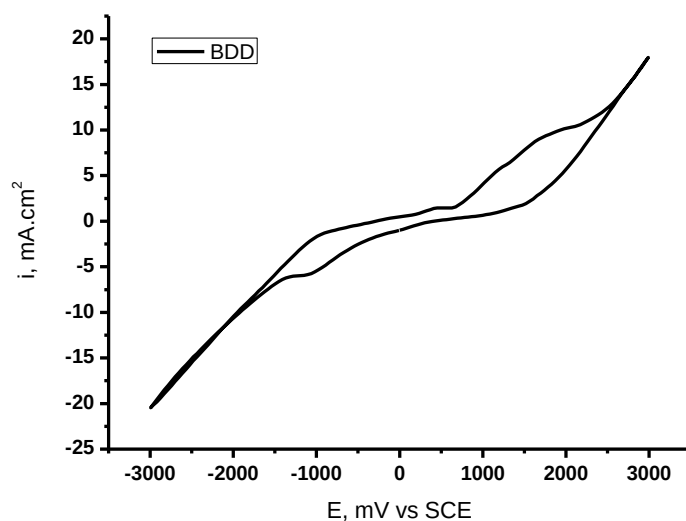


Фигура 72: Фотопотенциал на бордотиран диамантен електрод имобилизиран с фталоцианин, под действието на светлина с дължина на вълната 682 nm

Това изследване показва, че върху повърхността на диамантения електрод, използван като работен електрод при електрохимична редукция на нитрати, има успешно отложен фталоцианин и той е фоточувствителен.

- Циклична волтаперометрия

С цел да се изследва поведението на диамантения електрод като електрод за почистване на вода от нитрати електрохимичните изследвания са проведени в два различни електролита - 0,1M KCl и 0,1M KNO₃. Цикличните криви са снети при постоянно разбъркване на електролита с помощта на електромагнитна бъркалка при стайна температура.

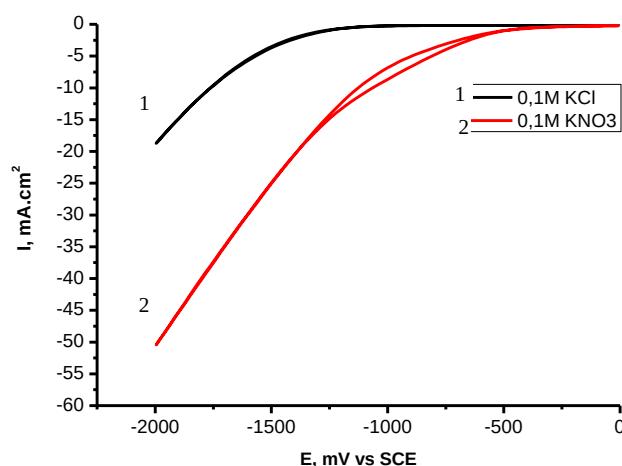


Фигура 13: Циклична волтамограма на бор дотиран диамантен електрод в 0,1M KNO₃ със скорост на сканиране 100 mV/s

От фигура 73 се вижда, че отделянето на кислород и водород върху диамантения електрод се осъществява съответно при големи стойности на положителните и отрицателните потенциали. Именно това от своя страна позволява извършването на редица други реакции върху електрода преди достигането на необходимите условия за разлагане на водата [145].

- Диамантът като електрод за почистване на вода от нитрати

Проведени са систематични изследвания, като за тази цел първо са снети циклични криви на бор дотиран диамантен електрод в 0,1M KCl и в 0,1M KNO₃ при разгъване на потенциала (скорост на сканиране) 50 mV/s (фигура 74).

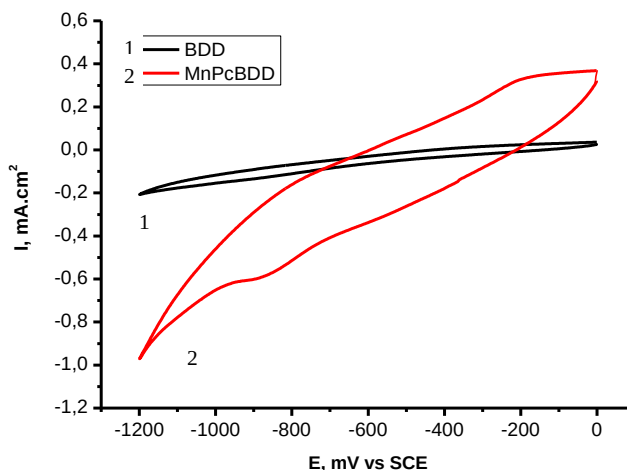


Фигура 74: Циклична волтамограма на бор дотиран диамантен електрод в 0,1M KCl и 0,1M KNO₃ със скорост на сканиране 50 mV/s

Ясно се забелязва разликата между кривата, снета в разтвор, който не съдържа нитратни йони, и тази в разтвор, съдържащ нитратни йони. Кривата, получена при работа в 0,1M KCl е без пикове. При кривата, снета в 0,1M KNO₃, се забелязва една характерна област в диапазон от потенциали от -0.6 V до около -1.2 V. Това показва, че на повърхността на електрода протичат реакции. Тъй като това не се наблюдава във фоновия електролит, се предполага, че реакциите, които протичат при провеждане на експерименти в KNO₃, са свързани именно с наличието на нитратни йони в разтвора.

- **Използване на фталоцианин и светлина като катализатори за процеса на редукция на нитрати**

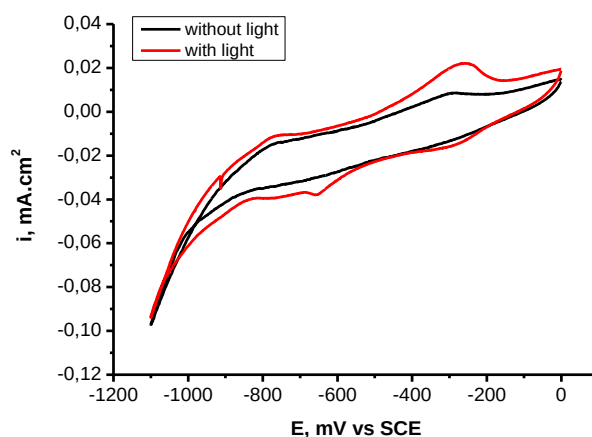
Фигура 75 показва циклични криви на два електрода – бор дотиран диамантен електрод и бор дотиран диамантен електрод с фталоцианин. Изследванията са проведени в 0,1M KNO_3 при потенциали между 0 и -1,2 V и скорост на сканиране 20 mV/s.



Фигура 75: Циклична волтамограма на бор дотиран диамантен електрод и бор дотиран диамантен електрод, имобилизиран с фталоцианин в 0,1M KNO_3

Съпоставяйки двете криви от графиката, ясно се вижда, че при кривата, снета при работа с електрод с фталоцианин (BDD+MnPc), в диапазонът, в който се изменя тока се извършват реакциите на редукция на нитрати е по-широк. При този електрод при потенциал -1,2 V катодният ток достига -1.0 mA.cm^{-2} , докато при диамантения електрод само с бор при същия потенциал е измерен ток от -0.2 mA.cm^{-2} . При кривата, снета при работа с електрод с фталоцианин се наблюдава образуването на пикове, съответстващи на реакции свързани с редукцията на нитратни йони. От направените разсъждения може да бъде направено заключение, че фталоцианинът може да бъде използван като катализатор за редукция на нитрати и нашите очаквания са, че бор дотираният диамантен електрод, имобилизиран с фталоцианин би работил по-добре.

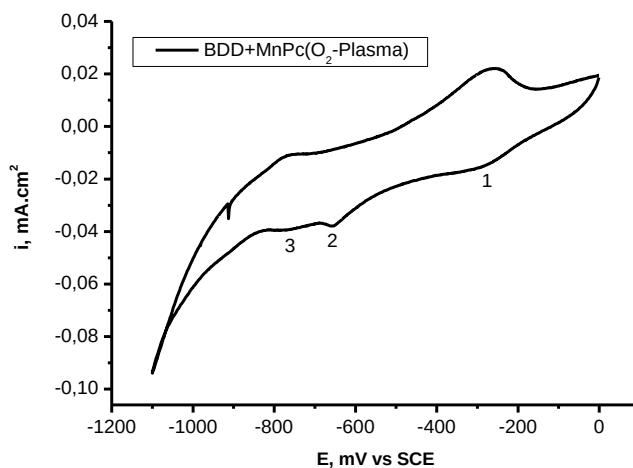
Тъй като е известно, че фталоцианините са светочувствителни съединения (фигура 72) е снета и циклична крива на диамантен електрод имобилизиран с фталоцианин при и без осветяване (фигура 76). Дължината на вълната на светлината е 628 nm.



Фигура 2: Волтамперна характеристика на бор дотиран диамантен електрод, модифициран с кислородна плазма и имобилизиран с фталоцианин, в 0,1M KNO₃ без осветяване и при осветяване при скорост на сканиране 2mV/s

От фигурата се вижда, че при осветяване на електрода по време на изследването се образуват по-ясно изразени пикове. Всеки един от тези пикове съответства на различни междинни реакции от редукцията на нитрати.

За точно охарактеризиране на пиковите и съответстващите им реакции на фигура 77 е представена само циклична крива на бор дотиран диамантен електрод имобилизиран с фталоцианин, при осветяване.



Фигура 77: Волтамперна характеристика на бор дотиран диамантен електрод, имобилизиран с фталоцианин, в 0,1M KNO₃ при осветяване със скорост на сканиране 2 mV/s

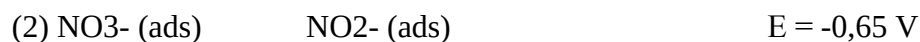
Наблюдават се няколко характерни пика. Пикът, регистриран при потенциал – 0,3 V, отбелязан като пик 1 на графиката, се отдава на процеса на адсорбиране на нитратни йони от електролита върху повърхността на електрода.

(1) NO₃-(aq)

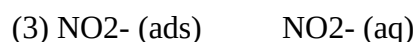
NO₃- (ads)

E = -0,3 V

Пик 2 свързваме с протичане на редукцията на нитратите. Тя се осъществява до последващо образуване и натрупване на нитрити на повърхността на електрода като междинен продукт. Това се осъществява при потенциал около $-0,65\text{ V}$.



При потенциал от $-0,75\text{ V}$ се наблюдава друг пик, който се асоциира с редукция на вече адсорбираните нитритни йони до други междинни или крайни продукти.



или



При закачане на фталоцианинови групи към повърхността на диамантения електрод и при осветяване на електрода редукцията на нитрати в електролита се осъществява при значително по-ниски потенциали, което помага за протичането на този процес (фигура 77).

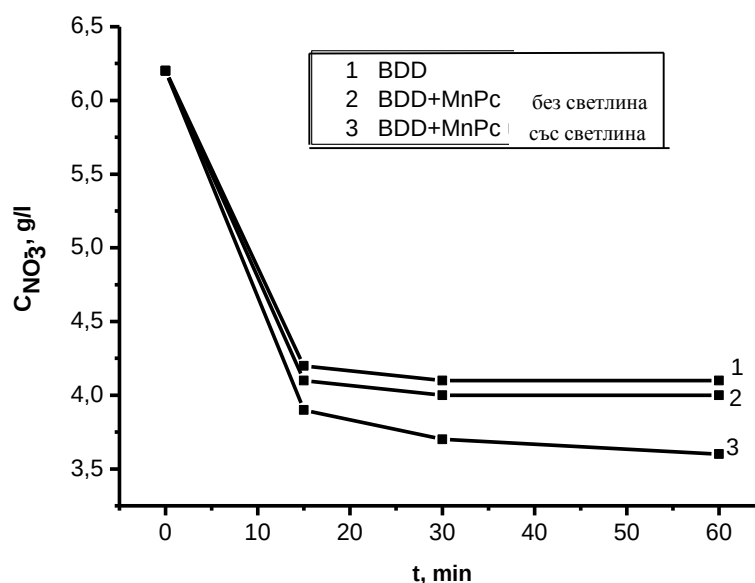
- Потенциостатични измервания

Проведен е експеримент за редукция на нитрати в продължение на един час при -800 mV . На $15'$, $30'$ и $60'$ минута от потенциостатичното изследване с помощта на пипета се вземат проби от електролита в клетката и чрез титраметричен метод се определя какъв процент от нитратите, съдържащи се в началния електролит, са редуцирани. Изследванията са проведени в $0,1\text{M}$ разтвор на KNO_3 , в който аналитично е определено, че началното количество на нитрати е $6,2\text{ g/l}$. Проведени са три експеримента – с бор дотиран диамантен електрод като работен електрод, с бор дотиран диамантен електрод с фталоцианин като работен електрод без осветяване, с бор дотиран диамантен електрод, имобилизиран с фталоцианин, като работен електрод с осветяване.

Таблица 1: Промяна на количеството нитрати при различни условия на работа

Работен електрод	CNO ₃ , g/l, останали в електролита след електролиза		
	15'	30'	60'
BDD	4,2	4,1	4,1
BDD+MnPc (без светлина)	4,1	4,0	4,0
BDD+MnPc (със светлина)	3,9	3,7	3,6

Данните от таблица 5 са графично представени на фигура 82.



Фигура 823: Редукция на нитрати по време на едночасова електролиза в 0,1M KNO_3

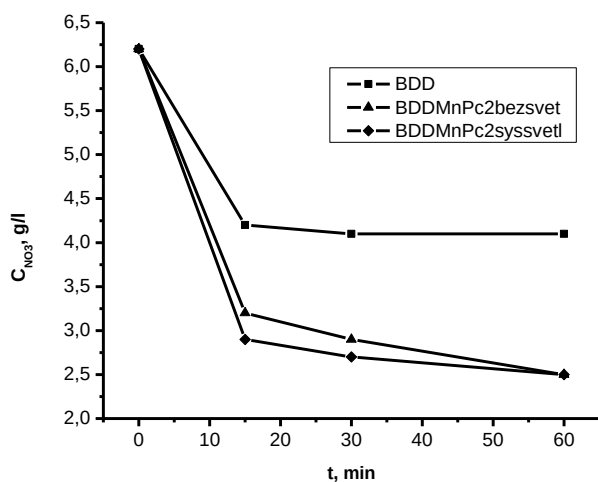
След 15 минути електролиза количеството на нитратите силно намалява, след което остава почти константно. Това се наблюдава и при трите експеримента. Най-ефективна редукция на нитрати се наблюдава обаче при бор дотирания диамантен електрод, имобилизиран с фталоцианин, при облъчване със светлина. При него на 15-тата минута от електролизата се достига до 37% очистване от нитрати, а след един час електролиза до 42%, докато при експериментите, проведени с бор дотиран диамантен електрод и бордотиран диамантен електрод с фталоцианин без осветяване след едночасова електролиза е достигнато респективно 34% и 35% очистване на електролита от нитрати.

- Изследване на бордотиран диамантен електрод с нанесен чрез вакуумно-термично изпарение фталоцианин

С този електрод е проведено потенциостатично изследване за редукция на нитрати в продължение на един час при постоянен потенциал $-0,8 \text{ V}$. Отново са направени изследвания без и със светлина, като по време на всяко от тях на 15-та, 30-та и 60-та минута са вземани проби от електролита и с помощта на титриметричен метод е определено количеството редуцирани нитрати.

Таблица 2: Промяна на количеството нитрати при различни условия на работа

Работен електрод	СNO ₃ , g/l останали в електролита след електролиза		
	15'	30'	60'
BDD	4,2	4,1	4,1
BDD+MnPc 2 (без светлина)	3,2	2,9	2,7
BDD+MnPc 2 (със светлина)	2,9	2,7	2,5



Фигура 4: Редукция на нитрати по време на едночасова електролиза в 0,1М KNO₃ с БДД2 като работен електрод

Резултатите, получени при изследване на този електрод, са подобни на резултатите, получени при работа с първия електрод (БДД 1). От графиката се вижда, че най-интензивна редукция на нитрати се наблюдава през първите 15 минути от електролизата, след което количеството на нитрати остава почти константно.

Съпоставяйки резултатите, получени при работа без и със светлина, се вижда, че осветяването катализира процеса на редукция на нитрати. При осветяване на електрода се постига 53% очистване на 15-та минута и 60% очистване след едночасова електролиза. При провеждане на експеримента без светлина редукцията на нитратите е 48% и 56% съответно на 15-та и 60-та минута.

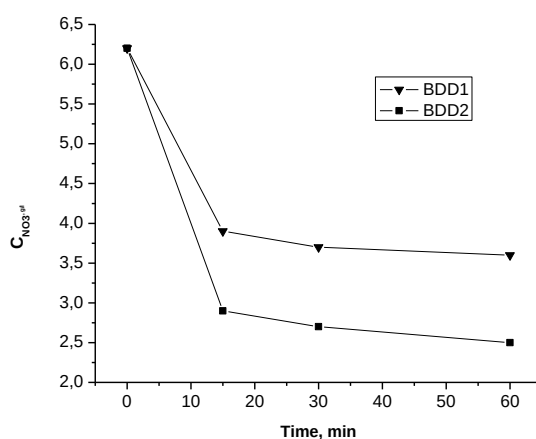
При потенциостатичното изследване и с двата електрода, освен количеството на нитратите, индиректно е определено и количеството на нитритите и някои крайни продукти.

Съпоставяйки редукцията на нитратите изразена в проценти, при работа с бор дотиран диамантен електрод, функционализиран с манганов фталоцианин чрез потапяне (БДД1), и с бор дотиран диамантен електрод с отложен върху него манганов фталоцианин чрез вакуумно-термично изпарение (БДД 2), може да бъде направено заключение, че и при двата електрода най-ефективна редукция на нитратите се постига при осветяване. В таблица 7 и на фигура 87 са дадени резултатите за постигнатата редукция на нитрати при потенциостатично изследване, проведено под въздействието на светлина и при еднакви електрохимични условия за БДД1 и БДД2, с отложен върху тях фталоцианин, съответно чрез потапяне и чрез вакуумно-термично изпарение.

Таблица 3: Промяна на количеството нитрати при работа с БДД1 и БДД2

Работен електрод	С _{NO₃} , g/l останали в електролита след електролиза		
	15'	30'	60'
BDD+MnPc 1	3,9	3,7	3,6
BDD+MnPc 2	2,9	2.7	2.5

При работа с БДД 2 се постига значително по-ефективна редукция на нитратите (59%). Основен проблем, обаче, е тяхното редуциране почти изцяло само до нитрити. При работа с БДД 1 се постига 49% очистване на водата от нитрати, като 16% от тях се редуцират до търсените крайни продукти.



Фигура 5: Редукция на нитрати по време на едночасова електролиза в 0,1M KNO₃ с БДД1 и БДД2 като работни електроди

Като заключение може да се каже, че начинът на нанасяне на използвания като катализатор фталоцианин оказва влияние върху редукцията на нитратите. За по-висока

редукция на нитрати е по-добре нанасянето на катализатора върху електрода да бъде извършено чрез потапяне. При отлагане на фталоцианин чрез вакуумно-термично изпарение превръщането на нитратите до желаните крайни продукти е недостатъчно. В тази насока е необходимо да се проведат допълнителни изследвания.

Изводи

1. Методът на химическо отлагане на пари (Hot Filament CVD) е релевантен метод за отлагане на тънки нанокристални диамантени слоеве.
2. Установена е доминираща роля на sp^3 - хибридизацията на въглерода при температура на подложката по-висока от 550 0C.
3. За отлагане на фоточувствителни молекули (манганов фталоцианин) върху диамантените слоеве е необходима модификация на повърхността на слоевете посредством кислородна и амонячна плазма, както и ултравиолетова модификация, водещи до хидрофилизация на повърхността.
4. Спектралният абсорбционен максимум на активния фталоцианинов слой в зависимост от централния метален атом лежи в областта 720 - 732 nm.
5. Фталоцианинът успешно се нанася върху повърхността на диамантените слоеве посредством два различни метода – потапяне в ратвор на фталоцианин и вакуумно-термично изпарение, като получените електроди са електрохимично тествани и охарактеризирани.
6. Диамантените слоеве с отложен катаитичен слой от фталоцианин работят стабилно като електрод за почистване на вода от нитрати.
7. Каталитичната активност на фталоцианина силно зависи от осветяването му със светлина с намерената оптимална дължина на вълната 628 nm.
8. Оптималният потенциал за работа на диамантените електроди като електроди за почистване на вода от нитрати е – 0,8 V.

Научни приноси

1. Намерен е алгоритъм за плазмено третиране на диамантените слоеве с цел повишаване лиофилността на повърхността за имобилизация на фталоцианини.
2. За първи път е използван манганов фталоцианин като фотостимулиран катализатор за почистване от нитрати.
3. Електрохимичното почистване е постигнато при значително ниски потенциали (- 0,8 V), като степента на почистване от нитрати достига около 50 %.

Списък на публикациите, включени в дисертационния труд

1. Pehlivanova, S., Petkov, Ch., Popov, C., Petkov, P., Boev, V., Petkova, T.. Nanostructured diamond electrodes for energy conversion applications. Nanoscience Advances in CBRN Agents Detection, Information and Energy Security, NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology, 39, Springer Verlag, 2015, ISSN:1874-6489, DOI:10.1007/978-94-017-9697-2_49, 479 - 486. SJR:0.11
2. Pehlivanova, S., Petkov, Ch., Surleva, A., Petkov, P., Popov, C., Petkova, T.. Diamond electrodes for waste water treatment. Bulgarian Chemical Communications, приета за печат: 2015, ISSN:0324-1130, ISI IF:0.349

Списък на участия в научни форуми

1. S. Pehlivanova, Ch. Petkov, C. Popov, P. Petkov, V. Boev, T. Petkova, „Electrochemical characterization of nanostructured diamond layers for energy conversion application“, International Conference on Oxide and Non-oxide Materials for Optoelectronics, Borovets, Bulgaria 19 – 22 Dec. 2013.
2. S. Pehlivanova, P. Petkov, T. Petkova, C. Popov, Ch. Petkov, “Immobilization of photosensitive molecules on diamond electrodes”, Eighteenth international summer school on vacuum, electron and ion technologies, Sozopol, Bulgaria, 7 – 11 October 2013.
3. S. Pehlivanova, Ch. Petkov, C. Popov, P. Petkov, V. Boev, T. Petkova, “Electrochemical characterization of nanostructured diamond layers for energy conversion application”, NATO Science for Peace and Security Series, Nanoscience Advances in CBRN Agents Detection, Information and Energy Security, Sozopol, Bulgaria, 29.05 – 06 June 2014.
4. С. Пехливанова, П. Петков, Т. Петкова, “Електрохимично охарактеризиране и приложение на тънки нанокристални диамантени филми”, IV научен семинар по физикохимия за млади учени и докторанти, Институт по физикохимия, БАН, София, България, 15 - 17 Април 2015.
5. С. Пехливанова, П. Петков, Т. Петкова, VIII-ми Пролетен семинар на докторантите и младите учени “Интердисциплинарна химия” Витоша, България, 24 Април 2015.
6. S. Pehlivanova, Ch. Petkov, C. Popov, P. Petkov, T. Petkova, „Synthesis and characterization of nanostructured diamond layers. Application in Wastewater treatment“, Poster session, UCTM, Sofia, Bulgaria, Mai 2015.