Р Е Ц Е Н З И Я

по конкурс за заемане на академичната длъжност "професор", обявен от Централна лаборатория по приложна физика към Българска академия на науките (ЦЛПФ-БАН) в ДВ бр. 26 от 01.04.2022 г. в професионално направление 4.1. „Физически науки", научна специалност „Физика на кондензираната материя" (Създаване и изследване на тънки слоеве за модификация на повърхности)

Кандидат: д-р Лиляна Петрова Колаклиева, доцент в ЦЛПФ-БАН

Рецензент дфн Дианка Димитрова Нешева-Славова, професор в ИФТТ-БАН

(заповед No19/20.06.2022 г. на проф. Р. Каканаков, зам. директор на ЦЛПФ)

Обща характеристика на представените материали*

Доц. д-р Лиляна Петрова Колаклиева е единствен кандидат по обявения конкурс и е представила всички изисквани материали за участие в конкурса.

Доц. д-р Лиляна Колаклиева завършва висшето си образование във Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски" през 1980 г. със специализация „Физика на полупроводниците" и същата година е назначена като „физик" в Лаборатория по приложна физика - БАН. През 2000 г. придобива ОНС „доктор" за дисертационния си труд на тема „Създаване и изследване на температурно стабилни омови и Шотки контакти за високомощни прибори от SiC", с ръководител чл.кор. Й. Касабов. Доц. Колаклиева е специализирала в Института по физика на полупроводниците, СО АН, Русия (1986 г.), в Института по електронни структури и лазери в Крит, Гърция (2000 г.) с финансиране по програма НАТО-наука за мир и е била на пост-докторска специализация в катедрата по Материалознание в Linkoping University, Швеция (2002 - 2004 г.). Тя притежава умения за работа с разнообразно високотехнологично вакуумно оборудване за нанасяне на многослойни и нанокомпозитни покрития и със специализирана апаратура за комплексно изследване на слоеве. Заемала е последователно академичните длъжности: научен сътрудник III ст. в Институт по приложна физика (1987 - 1997 г.), н. с. II ст. (1997 - 2000 г.) и н. с. I ст. (2000 - 2004 г.) в ЦЛПФ. От 2004 г. досега тя е ст.н.с. II ст./доцент и ръководител на група „Технология и характеризиране на тънки слоеве" в ЦЛПФ. В периодите 2011-2012 г. и 2021-2022 г. тя е заместник директор, а в периода 2012-2021 г. и в момента - директор на ЦЛПФ.

Доц. Колаклиева е съавтор общо на 101 научни публикации, които имат 339 независими цитирания (Хирш индекс 9) и на 7 патентовани полезни модела. Участвала е в разработката на 11 научно-приложни технологии и в голям брой финансирани проекти - 6 международни проекта по програмите Copernicus, NATO, INTAS, PHARE, 1 по ОП Развитие на конкурентоспособността на българската икономика, 2 по ОП НОИР, 10 - с ФНИ, МОН, Министерство на икономиката, Националния новационен фонд. Участва в двустранни изследователски проекти и работи в сътрудничество с учени от Русия, Швеция, Беларус и Гърция. Трябва да се отбележи и участието й в двустранни иновативни договори с фирми („СолТех" ЕООД, „Милко Ангелов Консулт" ЕООД, „Нанотех груп" ООД и др.) и организирането на научни форуми и редактирането на материалите им за публикуване.

*Цитираните по-долу показатели и квартили са дефинирани в Правилника за прилагане на ЗРАС РБ, Професионално направление 4.1, Таблици 1 и 2.

За участие в конкурса доц. Колаклиева е представила следните активи: показател *В4* – хабилитационен труд включващ 8 публикации, излезли в периода 2009-2021 г., осигуряват 160 точки при изискван мин. 100 т.; от тях 1 бр. е в квартил Q1, 6 бр. - в Q2, 1 бр. - в Q3; в 5 публикации тя е първи автор, а в другите има съществен принос. Всички научни трудове, представени в показател *Г7-8 (*общо 16), са публикувани след защитата на дисертацията за „доктор" и конкурса за „доцент" и не са включени в базата данни на НАЦИД, за покриване на минималните национални изисквания за заемане на академична длъжност „доцент" от д-р Колаклиева. От тях 2 са глави в книги с първи автор доц. Колаклиева, 4 са в списания с Q2, 4 – в Q3, 3 - в Q4, 3 - в издание без импакт фактор и заедно с трите защитени полезни модела в *Г9* осигуряват 311 точки по показател *Г* при мин. 220 т. В 6 от тези публикации кандидатът е първи автор, в 3 – втори и в 3 - трети. Нямам сведения за плагиатство.

В конкурса д-р Колаклиева участва със списък от 296 независими цитирания на 58 публикации (592 т. в *Д11,* при мин. 200 т.). С висока цитируемост са работите с номера 1 (90 пъти), 6 (19 пъти) и 2 (15 пъти) в този списък. Представени са много примери за съществени цитирания на нейни публикации, които убедително показват добро познаване на работите й и използване на съобщени в тях резултати и предложени обяснения. Един пример: в работа на Wang, Y.-H., Liang, Y.C., Samudra, G.S., Chang, T.-F., Huang, C.-F., Yuan, L., Lo, G.-Q., Semicond. Sci. Technol. 28, 125010 (2013) се казва „Въпреки че в идеалния случай транспортът на носителя през контакта е доминиран от независимия от температурата процес на тунелиране, се наблюдава, че както контактното съпротивление, така и специфичното контактно съпротивление намаляват при по-високи температури. Това може да се обясни с участието на термоелектронен механизъм, който се засилва при по-висока температура, по време на транспортирането на носител през прехода метал-полупроводник [L. Kolaklieva, R. Kakanakov, Chapter 18 in "Micro Electronic and Mechanical Systems", Edit. Kenichi Takahata, p. 293-318 (2009)]. В показател *Е* са включени: ръководство на екипа на ЦЛПФ в 2 центъра по ОП НОИР и 1 ИНФРАМАТ проект, ръководство на 2 национални проекта, участие в 3 международни и 2 национални проекта. Заедно с привлечените средства по тези проекти те съответстват на 965 точки при мин. 150 т. Ще спомена и въведението на приложената авторската справка. В него стегнато и компетентно са очертани двете основни тематични области, в които са постиженията, с които доц. Колаклиева участва в конкурса. Посочени са актуалността, проблемите, възможните пътищата за решаването им и приложимостта на резултатите и това убеждава във важността на проведените изследвания и значимостта на получените резултати.

Доц. Колаклиева има и значителна педагогическата дейност - била е научен ръководител на четири защитили дипломанти, на двама редовни докторанти, отчислени с право на защита и в момента ръководи един редовен докторант.

Активите, с които доц. Л. Колаклиева участва в конкурса, много надвишават минималните национални изисквания за заемане на академичната длъжност „професор", посочени в Правилника към ЗРАС РБ и изискванията на БАН и ИФТТ. Те я представят като активно работещ учен с висока компетентност, сериозни научни и научно-приложни приноси и педагогически опит. Постиженията й са добре познати и използвани от международната научна общност, а част от тях са близо до практическо приложение.

Обща характеристика на научната и научно-приложната дейност на кандидата

Представените за конкурса постижения на доц. Колаклиева са в областта на метални и неметални слоеве със сложен състав и структура и са в две тематични области: (1) високомощна и високотемпературна микроелектроника (вкл. мощни униполярни транзистори с високо напрежение и мощни биполярни диоди и транзистори) и (2) твърди и свръхтвърди покрития като ефективно средство за модифициране на повърхността на

материали, използвани в съвременната индустрията (металообработване, автомобилостроене, оптични приложения и др.). В първата област много голям е интересът към SiC и III-V нитридите и в частност GaN, които позволяват разработването на устройства с високи пробивни електрични полета, висока топлопроводност и подвижност на електроните. Качеството на контактите към SiC и GaN е от изключително значение за добрата и стабилна работа на такива устройства и изследванията, провеждани от доц. Колаклиева, са свързани с този важен и актуален проблем. Не по-малко интересни и актуални са разработените с нейно участие наноструктурирани твърди и свръхтвърди покрития. Те са с подобрени механични и трибологични свойства, висока температурна стабилност, корозионна и износоустойчивост и са с потенциал за различни приложения.

Разработваните контакти и твърди покрития са многослойни или многокомпонентни и за всяко от тях е създадена технология с подходящи параметри на отлагане. Използвани са различни методи на физично отлагане от газова фаза (термично, електронно-лъчево и катодно-дъгово изпарение, разбалансирано магнетронно разпрашване и др.). Последните два метода в скобите са избрани, защото се използват в индустрията и това би улеснило приложението в практиката на разработваните твърди покрития. За комплесното характеризиране на образците са използван голям брой съвременни техники, подходящи за изучаване на морфологията, структурата и състава на наноразмерни и наноструктурирани обекти (TEM, SEM, AFM, EDX, XPS, Раманова спектроскопия и др.), както и техники за изследване на електрични и термични свойства, твърдост и т.н.

Основни научни и научно-приложни приноси

Основните приноси на доц. Колаклиева са обединени в горните две тематични области, като при всяка област са включени резултати от статии от показатели *В4 и Г7-9*.

Тематична област 1. Проведени са комплексни изследвания на повърхностна морфология, химичен и фазов състав, електрични и термични свойства на многослойни омови контакти на базата на алуминий и без Al, изградени от нанослоеве с различна дебелина, които са нанесени към горния слой от GaN на хетероструктури от GaN/AlGaN/GaN или слоеве от p-тип 4H-SiC. Предложени са механизми за формиране на омовите свойства. По-конкретно:

1.1. При контакти към GaN/AlGaN/GaN от типа Ti/Al/Ti(Mo)/Au е установено, че изходното тегловно съотношение на първите два слоя Ti/Al (най-близки до слоя от GaN) влияе върху съпротивлението на контакта, температурата на отгряване, при която се получава омов контакт с най-ниско съпротивление, както и върху разпределението на елементите и интерфейсната химия на отгретите контакти. Замяната на втория титанов слой с Mo затруднява дифузията на Al към повърхността на контакта, намалява повърхностната му грапавост и подобрява острота на ръба и термичната му стабилност по време на работа. Омовите свойства на контактите са свързани с образуване на $AlAu_2$ в контактния слой и TiN на интерфейса с GaN. (*В4:*A1-A3; *Г8*:B1,B2; цитираните номера на статии съответстват на подредбата във файла Списъци на научните трудове изобретенията, цитатите и …...)

1.2. При омови контакти Al/Ti/Au към p-тип 4H-SiC с различно тегловно съотношение на Al и Ti е установено, че съотношението не влияе на най-ниското специфично контактно съпротивление, но влияе на оптималната температура на отгряване, при която то е получено, а това води до различно разпределение на елементите и интерфейсна химия в отгретите контакти. (*Г7*:B3,B5; *Г8*:B2) Разработени са 4H-SiC p-i-n диоди с Al/Ti/Au контакт

към p-тип 4H-SiC слоя, които са с много добри характеристики и с такъв диод е направен много перспективен за приложения в честотния Q-диапазон високоскоростен модулатор, който е с нисък пад на напрежението в права посока при плътност на тока 100 A/cm^2, ток на утечка под 1 μA при обр. напрежение 1200 V и работната скорост от 5-7 ns. (*Г7*:B2)

1.3. Направена е оригинална разработка на контакти към GaN/AlGaN/GaN, които не съдържат Al, целяща постигане на малка грапавост и добра рязкост на ръба на контакта след термичната обработка за формиране на омови свойства Показано е, че контакти от типа Ti/Mo/Ti/Au и Ti/Ni/Ti/Au имат много ниско съпротивление и добра повърхностна гладкост. Чрез оптимизиране на съдържанието на Ti в състава им е постигната много по-добра острота на ръба им от тази при контакти на базата на Al. Направено е заключение, че тези контакти са много добра алтернатива на контактите с Al. (*Г7:*B6; *Г8*:B1).

1.4. Изследвания върху няколко типа контакти на базата на Pd (Au/Pd, Au/Pd/Al и Au/Pd/Ti/Pd) показват, че паладият е подходящ за направа на омови контакти с ниско съпротивление и добри топлини свойства към p-тип 4H-SiC за субмикронни устройства, но са необходими допълнителни изследвания за намаляване на повърхностната грапавост. Установено е, че появата на омови свойства при отгряването се дължи на образуване на PdSi на границата със SiC, което води до повече от два пъти намаляване на височината на потенциалната бариера. (*Г7:*B1,B4; *Г8*:B2)

Тематична област 2 Разработени са многокомпонентни нанокомпозитни покрития с изключително висока твърдост, стабилност при високи температури, висока устойчивост на износване и окисляване, нисък коефициент на триене, които превъзхождат използваните понастоящем покрития на металорежещи инструменти, матрици и преси, основани на дву- или трикомпонентни слоеве от нитриди на преходни метали. По-конкретно:

2.1. Разработени са две многослойни покрития, насочени към конкретни приложения и всяко от тях е патентно защитено като полезен модел. Първото е многослойно градиентно нанокомпозитно покритие на базата на TiAlSiN за приложение в металообработващата промишленост (*B4*:A4,A5; *Г9*:C1)). То съдържа както градиентен нанослой от TiAlSiN, така и нанокомпозитен слой от TiAlN/SiN. Покритието е с голяма твърдост (40 GPa), свързана с нанокомпозитния слой, състоящ се от нанокристали от TiN, AlN и (TiAl)N с размери 5-8 nm в аморфната матрица от Si_3N_4 и добра адхезия към подложката, която е отнесена към наличието на градиентен слой. То е с нисък коефициент на триене, показва слабо окисление на повърхността при 800 ºC без съществена променя в структурата и състава му, устойчиво е на високотемпературно и корозионно третиране и е подходящо за приложение в индустрията при суха машинна обработка. По данни на кандидата това покритие е внедрено при режещи металообработващи инструменти и матрици. Второто многослойно покритие е предназначено за стоматологични инструменти и се състои от буферен слой/междинен градиентен слой/завършващ диамантеноподобен слой (*Г9*:C3).

2.2. Разработени са градиентни покрития на базата на Cr и Ti. Покритието от CrAlSiN не се окислява при термично третиране до 800 ºC и може да се прилага върху инструменти от високоскоростна стомана (*B4:A6*), това от TiAlSiN е с висока износоустойчивост (*Г7*:B7,B8). Подобрените свойства на тези покрития се свързват с факта, че са изградени от нанокристали от TiN, AlN/$Cr_xAl_{1-x}N$ с размери под 10 nm в аморфна матрица от Si_3N_4/SiN_x. На примера на TiAlSiN е приложено отгряване непосредствено след нанасянето на покритието, което е нов подход за стабилизиране на наноструктурата, подобряване на

механичните свойства и износоустойчивостта на едни от най-често използваните покрития – тези на базата на Ti.

2.3. Създадено е ново наноструктурирано покритие CrAlSiN-AlSiN с периодично модулиран състав, което е нанокомпозит, състоящ се от нанокристали (CrAl)N и (AlSi)N с размери 9 и 7 nm, вградени в аморфна матрица от Si_3N_4. (*B4*:A7,A8) Тази структура осигурява изключително висока твърдост (54 GPa), а чрез модулирането на състава са постигнати голяма еластична устойчивост на повреда и устойчивост на пластична деформация. Покритието запазва съчетанието на свръхтвърдост с устойчивост на еластични напрежения и на пластични деформации до 800 ºC и е подходящо за високотемпературни приложения.

2.4. Създадени са технологии за отлагане при ниски температури (<200 ºC) на трикомпонентни (TiAlN, TiCrN и CrTiN; (*Г7:*B9,B11,B12)) и четирикомпонентни (TiCrAlN и CrTiAlN; (*G7*:B10,B12,B13)) нитриди на преходни метали чрез разбалансирано магнетронно разпрашване. Изследванията в това направление са мотивирани от практиката – използване на нискотемпературна инструментална стомана, върху която нанасянето на покрития изисква ниски температури. Получените покрития са със стабилна кристална структура и много добра твърдост за нискотемпературни технологии (27 – 32 GPa), а чрез използване на подходяща комбинация от адхезионен и преходен градиентен слой е постигната и добра адхезия към подложите. Покритието от CrTiAlN е с най-добро съчетание на механични свойства и адхезионно-кохезионна устойчивост, което се запазва до 600 ºC.

2.5. Чрез импулсно лазерно отлагане във вакуум или азот, при различни налягания на азота и параметри на лазерния лъч и температура на подложките в много широки граници (20 – 800 ºC) са отложени слоеве от AlN с различни структурни характеристики. (*Г7*:B14) Намерена е връзка между условията на отлагане и структурата, механичните и оптичните свойства на слоевете, като при някои слоеве е достигната висока твърдост (до 30 GPa) и много висока устойчивост на пластична деформация.

Основните научни и научно-приложни приноси може да се отнесат към: (а) създаване на нови технологии (приноси 1.3, 1.4, 2.1-2.4) и конструкции (полезен модел *Г9*:C2): (б) доказване с нови средства на съществени нови страни на вече съществуващи научни проблеми (1.1, 2.5) и получаване и доказване на нови и потвърдителни факти (при всички изследвания); (в) приноси за внедряване (полезни модели *Г9*:C1,C3, принос 1.2) и приложение на научни постижения в практиката (*Г9*:C1).

Бележки и препоръки по представените трудове

Нямам въпроси и съществени критични бележки към публикациите, с които доц. д-р Л. Колаклиева участва в конкурса, но ще отбележа, че се затрудних от различието в номерациите на статиите в авторската справка, в списъка със статии и в документа с резюметата на публикациите.

Заключение

Анализът на материалите, с които доц. д-р Лиляна Колаклиева участва в конкурса показа, че активите й значително надвишават минималните изисквания в Правилника към ЗРАС РБ и Изискванията на БАН и ИФТТ-БАН за условията и реда за заемане на академичната

длъжност „професор”. С оглед на актуалността, значимостта и международното признание на нейните научни и научно-приложни постижения, за мен няма съмнение, че доцент д-р Лиляна Колаклиева е много подходяща за академичната длъжност „професор” съгласно обявения конкурс.

Напълно убедено подкрепям кандидатурата на доц. д-р Лиляна Колаклиева и препоръчвам на почитаемото Научно жури да предложи на Научния съвет на ИФТТ-БАН доц. Колаклиева да бъде избрана да заеме академичната длъжност “професор“ в Централната лаборатория по приложна физика към Българска академия на науките, професионално направление 4.1. „Физически науки“, научна специалност „Физика на кондензираната материя“.

22.08.2022 г.

Подпис:

/проф. дфн Д. Нешева-Славова/