

## РЕЦЕНЗИЯ

по конкурс за заемане на академична длъжност „доцент“ по професионално направление 4.1. „Физически науки“, специалност “Физика на кондензираната материя”, обявен в ДВ, брой 36 от 13.05.2016г. с кандидат: гл.ас. д-р Емил Божилов Манолов

**Рецензент: проф. д-р Петко Костадинов Витанов**

### 1. Общо описание на предоставените за конкурса материали

Кандидатът е представил автореферат на дисертационен труд, копия от 38 публикации в списания, една глава от тематичен сборник, едно патент регистриран в България и списък от доклади и постери на конференции (общо 35бр). Няма пълните текстове на докладите и постерите и те не се приемат за рецензиране. В дисертационния труд са включени 6 публикации от списъка на кандидата и патента.

### 2. Публикации преди и след получаване на научната степен „доктор“

Общият брой на публикациите до получаване на научната степен „доктор“ са 34бр., като от тях 6 публикации са включени в дисертационния труд. След присъждане на научната степен има публикувани пет статии.

### 3. Обща характеристика на научната и научно-приложна дейност на кандидата

Кандидатът е започнал своята трудова дейност в научно-изследователски институти към индустрията, в началото към Институт по полупроводникова техника – Ботевград, а в последствие Институт по микроелектроника –София. В този период от неговото кариерно развитие, той придобива професионален опит и технологични умения във водещи развойни институции, а това обуславя и последващо му научно развитие в ИФТТ-БАН. Характерът на научно-изследователската и научно-приложна дейност на кандидатът се определя от неговата дългодишна изследователска активност в областта на получаване и изследване на тънки слоеве, с цел приложение за полупроводникови прибори и микроелектрониката. Научните интереси на кандидата са ориентирани към изследвания и разработка на нови технологични процеси за отлагане на диелектрични слоеве на базата на вакуумно термично изпарение и високочестотно магнетронно разпръскване. Тези технологични методи са използвани за получаване на тънки слоеве от силициев субоксид ( $\text{SiO}_x$ ), съдържащ силициеви наночастици в аморфна фаза или кристална фаза, както тънки слоеве от метални оксиди от типа на  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{WO}_3$  и  $\text{SiO}_2$ . Трябва да се отбележи, че кандидатът активно участва и в изследванията

на техните свойства. От характера на публикациите следва, че неговата роля е съществена и при реализиране на тестовите структури за измерване, както и на приборите, включващи тези слоеве. Това е една от съществените причини той да бъде включен като участник в 5 проекта с международно участие, за което има представени документи. Гл. асистент д-р Емил Манолов е в бил в работния колектив и на 5 проекта финасирани от фонд „ Научни изследвания“

#### 4. Основни научни и научно-приложни приноси

Съществена част от научните и научно-приложни приноси на кандидата се отнасят към получаване и изследване на тънки слоеве от  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{WO}_3$  с цел тяхното приложение за сензорни елементи (статии 1-5, 12, 18,25). Оптимизирани са технологични процеси за високочестотно (RF) магнетронно разпрашване на композитна мишена от  $\text{SnO}_2$ , както и реактивно разпрашване от мишени на Mo и W в атмосфера от Ar и  $\text{O}_2$ . С цел доказване на качествата на получените оксидни слоеве са изследвани морфологията, структурата и химическия им състав чрез методите на сканираща електронна микроскопия (SEM), дифракция на рентгенови лъчи (XRD) и фотоелектронна спектроскопия с рентгенови лъчи (XPS) (статии 5, 12,18). За доказване на тяхната приложимост са изучавани техните електрически свойства, като листово съпротивление и контактно съпротивление с контакти от трудно топими метали Ti, W, Cr, както и двуслойни контакти от типа на TiAl, TiAu, WAl, WAu, CrAl, CrAu. ( работи 1,2). Характерът на научните приноси може да се класифицира като получаване на потвърдителни факти.

Естествено подължение на тези изследвания са проучванията за използване на метало- оксидните слоеве, като сорпционни покрития в сензори на базата на кварцови резонатори. Изследвани са сорпционните свойства на  $\text{SnO}_2$  (публикации 3, 4, 5),  $\text{MoO}_3$  (18),  $\text{WO}_3$  (25) като функция на „масовото“ натоварване, което води до промяна на честотата  $\Delta f$  на резонатора след подлагането му на въздействие в газова среда на  $\text{NH}_3$  с различни концентрации (10 – 1000 ppm). Анализирани е ефектът на началната грапавост на кварцовата повърхност върху параметрите и сорпционните свойства на приборите, както и влиянието на дебелината на слой от  $\text{SnO}_2$  върху чувствителността на подобен тип сензори. Научният принос може да се формулира като получаване и доказване на нови факти.

В работи 6 и 14 са представени резултати от изследвания на слоеве от SiC, получен чрез бързо термично отгряване на аморфен въглерод върху силициева повърхност. Регистрирано е, че с високотемпературен синтез се формира тънък слой от SiC с дебелина от 5nm до 14 nm в зависимост от температурата на отгряване. Електрическите измервания потвърждават хипотезата за образуване на хетеропреход със силициевата подложка.

Научният принос може да се разглежда като получаване потвърдителни факти.

Част от научните резултати на кандидата са свързани с характеризиране на MOS структури със слой от хидрогенизиран аморфен силиций (a-Si:H) получен чрез плазмено стимулирано отлагане от газова фаза (PECVD) (статии 7 и 11). Използван е методът на квазистатичните волт-капацитивни измервания за определяне на плътността на електронните състояния в забранената зона на a-Si:H.

Съществена част от научните резултати на кандидата се отнасят към изследвания на метал-оксид-силиций (MOS) структури, съдържащи силициеви нанокристали (Si NC) или аморфни силициеви наночастици (a-Si NP) в гейтовия диелектрик. Те са публикувани в 10 статии (8, 9, 10, 13, 15, 16, 22, 23, 28, 39). В дисертационния труд са включени работи 9 и 10. Изучавани са електрическите свойства на MOS структури с еднослоен ( $\text{SiO}_x$ ), двуслоен ( $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ ) и трислоен ( $\text{SiO}_2/\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ ) гейтов диелектрик, в които слоят  $\text{SiO}_x$  ( $x = 1.15$  или  $1.3$ ) е получен чрез термично изпарение. Идеята е от излишните (несвързани) Si атоми в силициевия субоксид ( $\text{SiO}_x$ ), чрез температурна обработка, да се образуват по-големи кълъстери от Si атоми, които да имат размери в нанометричната скала. С аналитични, спектрални и структурни изследвания е доказано, че след температурна обработка в азотна среда при  $700^\circ\text{C}$  за 60 мин. се регистрират Si наночастици с аморфна фаза. Направени са сравнителни изследвания с образци, отгрявани при  $1000^\circ\text{C}$  за 60 мин, които показват формиране на подобни частици, но с кристална фаза. Диаметърът на формираните нанокристали, регистриран с трансмисионна електронна микроскопия (TEM) е до 5nm, а на частиците от аморфен-Si е 60nm. Продължителността на високотемпературното отгряване на тези образци оказва влияние не само върху размера на Si нанокристали, но и върху качеството на разделителната повърхност  $\text{SiO}_x / \text{c-Si}$ . За да се оцени ефектът на Si наночастици с аморфна и кристална фаза върху електрическите свойства на слоеве са използвани структури от типа метал/диелектрик/ силиций (MOS структури), които позволяват капацитивни измервания. Волт-фарадните измервания на тези структури показват наличие на хистерезис при промяна на приложеното напрежението от -10 V до +10 V, което е в резултат на захващане на електрически заряд. Това е класически подход за регистриране захващане на електрически заряд в диелектричния слой в област близо до силициевата повърхност. Оценен е процеса на намаляване на заряда в уловките с времето с цел да се покаже до колко те са приложими като елемент на памет (статия 10). На основание на тези резултати е предложена структурата  $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{SiO}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$  като елемент за памет (патент 65971 B1). Научните приноси в тази област на изследвания могат да се оценят като получаване и доказване на нови факти.

Резултатите от изучаване на оксидни слоеве, отложени чрез реактивно високочестотно магнетронно разпрашване на Si мишена са интересни и актуални (17,19-21). При различно съотношение ( $R$ ) на парциалното наляганя на  $O_2$  към това на Ar, вариращо в широк диапазон (1–0.0003) се получават слоеве с различни качества. За  $R = 1$  съставът на слоя е близък до стехиометричния силициев диоксид, докато при  $R = 0.0003$  са получени  $SiO_x$  слоеве обогатени на Si, в които след високотемпературна обработка се наблюдава формиране на Si наночастици. Това е един съществен научно-приложен резултат, който позволява чрез промени на съотношението на  $O_2$  към това на Ar да се формира послойна структура, която да се използва като елемент на енергонезависима памет.

За първи път е показано, че MOS структури, съдържащи силициеви нанокристали в гейтовия диелектрик, могат да бъдат използвани като дозиметри за гама лъчение. По аналогия на структура с „плуващ“ гейт се формира многослойна структура, като ролята на „плуващ“ гейт се изпълнява от слой със Si наночастици. Идеята е да се натрупа заряд в този слой в резултат на захват на електрони при подаване на положително напрежение на металния електрод. В последствие при облъчване, този заряд трябва да намалява пропорционално на погълнатата доза. Изменението на заряда се оценява чрез изменението на напрежението на плоски зони, получено от капацитивните измервания. Като съществен научно-приложен принос, свързан с получаване и доказване на нови факти, може да се оцени разработката на експериментален прототип на дозиметър за гама лъчение.

В технологията за реализиране на MOS структури, с приложение като елемент на памет или сензор на йонизиращо лъчение, се използва двуслойна диелектрична структура от силициев субоксид ( $SiO_x$ ), в който се формират Si наночастици, и последващо отложен стехиометричен  $SiO_2$ , наричан „контролен“ окис. В поредица от статии (24,27, 28,31) е показано едно друго технологично решение, при което след термичното отлагане на силициев субоксид ( $SiO_x$ ) се прилага двустъпков процес на отгряване, първо в азот ( $N_2$ ), а след това в газова смес от ( $N_2 + O_2$ ). Идеята да се формират две области в  $SiO_x$  слоя: хомогенна аморфна област, свободна от нанокристали, близо до горната повърхност и област с нанокристали под нея. При използване на подобен процес отпада необходимостта от допълнително отлагане на „контролен“ окис. Постигането на този резултат е потвърден с качествени снимки от трансмисионен електронен микроскоп и от електрически измервания на MOS прибори, реализирани с тази технология. Научният принос може да се формулира като получаване и доказване на нови факти.

В последните публикации на кандидата, в които той участва като съавтор, е изследвано въздействието на светлина от видимия и UV диапазон върху волт-капацитивните характеристики на конвенционални

МОС структури с термичен силициев оксид. Този факт е известен много отдавна (Grove A.S., Deal B.E., Snow E.H., Sah C.T. Solid State Electr. 8,145, 1965) ( Grosvalet J., Jung C., IEEE Trans. Electr. Dev. ED-14 , 777, 1967) ( справка С.Зи „Физика полупроводниковых приборов“, том1 стр.418). Използването на ефекта, свързан с изменение на капацитета на МОС структурата в режим на инверсия при осветяване, не е намерил приложение повече от 50 години поради много причини.

По голям интерес представляват работите, отнасящи се до изследвания на МОС структури с полупрозрачен Au горен електрод и съдържащи Si нанокристали в гейтовия диелектрик (Si/SiO<sub>2</sub>/Si NP in SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Au) (публикации 33, 37). Структурите могат да бъдат зареждани отрицателно или положително като се подава съответното напрежение на горния електрод. При облъчване с дължина на вълната 395-400 nm от UV източник се предизвиква разреждане на предварително заредените структури. Ефектът е аналогичен на МОС структурата с „плуващ“ гейт, който се използва в програмируемите паметни (EPROM). В този аспект представените резултати могат да се разглеждат като получаване на потвърдителен резултат, че захватът на електрическия заряд е в силициевите наночастици.

#### 5. Отражение на научните публикации на кандидата в нашата и чуждестранна литература

Списъкът на научните публикации на кандидата включва 41 научни труда, от които 16 публикации в реферирани международни списания с импакт/ фактор (IF) и 14 в списания с импакт/ ранг (SJR), 1 глава от книга, автореферат на дисертация за образователна и научна степен „доктор“ и 1 български патент. Научните публикации са цитирани общо 77 пъти, основно от учени в чужбина. От общия брой на цитатите 8 са в дисертации, направени в чужбина.

#### 6. Личният принос на кандидата

Научните трудове на кандидата са в съавторство с учени от България и чужбина. Броят на съавторите е от три до седем, но това се обуславя от съвмесната работа с колективи от чужбина, използването на много методики за измерване и анализ, както и от технологичния характер на проблематиката. Познавайки дългодишната научна дейност на кандидата и неговия професионален и технологичен опит считам, че личният му принос е съществен при разработката и оптимизиране на технологичните процеси за отлагане на изследваните слоеве, технологичната реализация на тестовите структури и прибори, както и при анализиране на резултатите.



#### 7. Критични бележки

Нямам критични бележки към материала в представените трудове. Работите са публикувано основно в специализирани научни списания, които имат рецензенти.

#### 8. Лични впечатления.

Познавам Емил Манолов от неговата научна и професионална дейност, като научен сътрудник в Института по микроелектроника. Личните ми впечатления са, че той е един прецизен технолог и коректен експериментатор, съблюдавайки всички изисквания за научна етика. Това личи и от подготвените материали за конкурса.

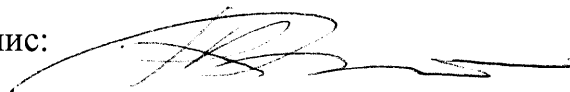
### Заклучение

След като се запознах с предоставените материали и научни публикации считам, че представени в тях резултатите и научни приноси отговарят на изискванията за присъждане на академичната длъжност „доцент” съгласно Закона за развитие на академичния състав в Република България и на Правилника за условията и реда за присъждането им в ИФТТ-БАН.

Препоръчвам на членовете на научното жури да гласуват за присъждане на **академичната длъжност „доцент”** на **гл. асистент д-р Емил Божилов Манолов** по професионално направление 4.1. „Физически науки“, специалност “Физика на кондензираната материя“

София 10.09.2016г

Подпис:



/ проф. д-р Петко Витанов/