



РЕЦЕНЗИЯ

от проф. д-р Корнели Григоров

Относно: Конкурс за присъждане на образователната и научна степен „ДОКТОР“ за нуждите на Института за Космически Изследвания и Технологии - ИКИТ при БАН в област висше образование: Технически науки, Професионално направление: Електротехника, електроника и автоматика, Докторска програма: Автоматизирани системи за обработка на информация и управление с единствен кандидат гл. ас. Аделина Митева от секция КМ към ИКИТ.

Тема на дисертацията: „Полупроводникови квантови ями с променлив състав под влияние на постоянно електрично поле с потенциал за наземни и космически приборни приложения“, научен консултант проф. д-р Димитър Теодосиев при ИКИТ, БАН

Дисертационната работа е обсъдена на специализирано заседание на Научния семинар на секция “Космическо материалознание” при ИКИТ- БАН на 28.02.2019 г. и допусната до защита със заповед No: 47/14.03.2019 съгласно изискванията на ЗРАСРБ, и правилника за неговото прилагане за участие в конкурса.

1. *Обща характеристика на представените материали*

Представената дисертация представя резултати на сериозен и задълбочен труд в областта на квантовата теория и по-специално квантови ями (QW) в полупроводници с променлив състав. На базата на ефекта на Stark описва квантовото отместване и разрешената популация на заряди заедно с използването на атомистичната теория на силната връзка (TB) са оценени и определени състоянията на електроните и дупките в (QW) и квантови точки (QD) в нанокристални структури с постоянен и променлив състав. Тематиката е разгъната професионално и сериозната подготовка на кандидата в областта е неоспорима. Привидно строго теоретичния характер на дисертацията и множеството приложения на ефекта на Stark, детайлно описани заедно със подробна литературна справка придават на дисертацията фундаментално-приложен характер, като в това число на първо място безусловно се открояват полупроводниковите лазери. Дисертацията е базирана на изследвания и изчисления на полупроводникови наноструктури, в частност хетероструктури и произтичащите устройства като квантови ями, свръхрешетки, квантови точки и жици. Описани са и методите за тяхното получаване – Molecular Beam Epitaxy (MBE) и Metalorganic Chemical Vapour Deposition (MOCVD). Посочени са и други устройства базирани на Stark-ефекта, в частност детектори в инфрачервената област, слънчеви клетки, оптични логични устройства и превключватели като например оптичния транзистор (SEED) - Self-Electro-optic-Effect Device разработени от David Miller в Бел лабораториите през 1986 година.

Ефекта на Stark - Lo Surdo както този на Zeeman са част от квантовата теория които дефинират характера на емисионно-абсорбционните спектри на широк клас полупроводникови прибори, като главен обект на изследване са устройства базирани на елементи от група IV и III-V съединенията. В дисертацията се разграничават два основни дяла – обща и специална част в приблизително съотношение 60 : 40 % което превръща работата в отличен дидактичен материал за студенти от горните специализирани курсове, както и за специалисти в областта.

Научните публикации на кандидата са отразени предимно в списания с импакт фактор в съавторство с известни водещи учени в областта и сродни такива, ще спомена участието на проф. С. Влаев, проф. Виктор Валаско, проф. Веселин Дончев, проф. Росица Якимова и др.

Дисертационният труд е написан много добре, чисто и грамотно на 138 страници, включва 57 фигури и 5 таблици. Той се базира и на 7 научни публикации на авторката, като 4 от тях са

самостоятелни. Цитирани са общо 190 литературни източника, включително и собствени работи. Авторефератът съдържа 58 страници, 42 фигури и 4 таблици, чиито номера отговарят на тези в дисертацията. Същият отразява стегнато и ясно съдържанието на дисертацията и дава представа за основните моменти в нея.

2. Характеристика на научната, научно-приложната и педагогическа дейност на кандидата

Дисертацията се състои от увод, цел и задачи на дисертацията, обща част от пет глави, Специална част от три глави, Заключение и приноси, приложения, цитирана литература и публикации, цитати и апробация. Тя е фокусирана изцяло върху изследването на електронната структура на $\text{AlxGa1-xAs}/\text{AlyGa1-yAs}/\text{AlxGa1-xAs}$ (QW) с постоянен и променлив химичен състав, с и без приложено постоянно електрично поле в перпендикулярно направление на интерфейса. Чрез теоретично моделиране на електронните и оптични свойства на тези системи са предвидени оптималните стойности на ред важни параметри в това число концентрационни профили, критични стойности на слаби полета по отношение на енергийните нива на различни видове (QW) и пр.

Дисертацията се базира на 7 научни публикации на кандидата, както следва според номера в списъчния лист (стр. 58 в Автореферата): публикация № 1 от 1997 е в пълен текст материали от международна конференция (в Бг), публикация № 2 от 1998 г. в Доклади на БАН с двама рецензенти; публикация № 3 от 1999 г. е в реферирано международно списание с импакт фактор, публикация № 4 от 2011г. е в пълен текст материали от българска конференция с международно участие, публикация № 5 от 2013 г. е в пълен текст материали от българска конференция, публикация № 6 от 2014 г. и публикация № 7 от 2017 г. са в българско списание. В 5 от публикациите докторантката е самостоятелен автор, а в 6 - е първи автор. Изложените факти сами по себе си говорят недвусмислено за ролята на кандидата в изготвянето на въпросните трудове.

В Уводната част накратко се обсъжда актуалността на проведените изследвания. Принципно новите физични свойства на полупроводниковите наноструктури (в сравнение с тези на обемни материали) ги правят уникален обект както за фундаментални физични изследвания, така и в научно-приложен аспект за създаване на качествено нови или подобрени наземни и космически прибори в области като оптоелектроника, фотоника, микро- и нано- електроника, информационни технологии, и др. Така поставените цел и конкретните задачи на дисертационния труд са ясно формулирани.

В Общата част се дават основни сведения за квантово ограничения ефект на Щарк в полупроводникови квантови ями, както и възможностите за неговото експериментално измервания. Описана е електронната структура на обемни А3В5 полупроводници и електронните свойства на А3В5 (QW) с резки и нерезки интерфейси. Представен е използвания теоретичен метод на sp^3s^* ТВ с отчитане на спина и взаимодействието само между първи съседи. Показано е как ТВ методът се комбинира с метода за съшиване на Гриновите функции на интерфейсите и с приближението на виртуалния кристал. Подробености за метода са дадени в Приложения 1, 2 и 3.

2.1. Специална част

В тази част са реализирани седемте (7) задачи произтичащи от набелязаните цели на дисертацията, а именно изработване на модел на силната връзка на електронните състояния в QW с постоянен и променлив състав, с и без приложено постоянно електрично поле.

Специалната част (Резултати) започва с глава шеста, в която са изложени конкретните използвани компютърни методи и алгоритми за пресмятане на електронната структура на (QW) и

са дадени използваните при пресмятаната ТВ - параметри. Отчитането на влиянието на електричното поле е дадено в Приложение 4, а част от софтуерния код – в Приложение 5. Тези резултати покриват планираната задача No. 1

Глава седма е посветена на изследване на базовия модел на правоъгълни QW с постоянен състав. Проведените са за първи път с ТВ метода числени пресмятания на свързаните електронни състояния, свързаните дупчести състояния и техните пространствени разпределения без и с прилагане на надлъжно електрично поле. Те показват, че използваните алгоритъм и параметризация дават адекватни резултати и могат да се приложат за изчисления и при сложни нано-хетероструктури, каквито са QW с променлив състав.

Разгледани са QW от типа $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/Al_{\gamma}Ga_{1-\gamma}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$ с различни ширини (GaAs: 11, 22 и 44 монослоя) и нулева концентрация на Al в QW, раздел 7.2. Пресметнати са и QW от типа $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/Al_{\gamma}Ga_{1-\gamma}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$ с различни дълбочини $\gamma = 0, 0.03, 0.06, 0.12$ при еднаква ширина от 44 монослоя, раздел 7.3. Влиянието на полето се оказва по-силно при по-широки ями, както и при по-плитки ями (с по-висока концентрацията γ на Al). Получена е стойността на критичното поле, при която интензитетът на основния оптичен преход (C1-НН1) рязко отслабва. Заключение е, че по отношение на ефекта на Щарк, ширината на правоъгълната QW (с постоянен състав) се оказва много по-силен фактор от дълбочината γ , т.е. квантово ограниченото отместване на Щарк – Quantum-confined Stark shift (QCSS) при еднаква стойност на приложеното поле се повлиява много по-силно от ширината, отколкото от дълбочината. Тези резултати покриват планираните задачи No. 2, 7.

В глава осма се изследва електронната структура на QW с променлив химичен състав при приложено електрично поле перпендикулярно на интерфейса. Подробно са разгледани QW с параболичен концентрационен профил, QW с дифузия на интерфейсите, аналогови и цифрови QW без и при приложено електрично поле перпендикулярно на интерфейса.

2.2. Параболична квантова яма от типа $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/Al_{\gamma}Ga_{1-\gamma}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$, раздел 8.1.1

С метода на силната връзка (ТВ) се изследва ефекта на Stark (SE) при инверсна параболична потенциална яма. Тук концентрацията x на Al в бариерите е $x = 0.36$ и варира параболично с начална стойност 0.02 в левия и десен край на ямата до 0.12 в средата на QW. Резултатите за параболична QW се сравняват с аналогичните за правоъгълна QW ($Al_{0.36}Ga_{0.64}As/Al_{\gamma}Ga_{1-\gamma}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$, т.е. при $x = 0$), като и двете са с ширина от 44 монослоя. Изчислени са основните енергии на оптичен преход $E(C1-НН1)$, $E(C1-ЛН1)$, $E(C2-НН2)$ без и в присъствие на постоянно електрично поле, както и пространствените разпределения за свързаните състояния в зоната на проводимост $EC1$ и във валентната зона $EH1$. Изчисленията са в много добро съгласие с наличните експериментални данни. При еднакви стойности на приложеното електрично поле енергийните нива и пространствените разпределения на свързаните състояния са по-чувствителни при параболичната, отколкото при правоъгълната (QW). Пресметнатата стойност на критичното поле е по-ниска за параболичната (QW) отколкото за правоъгълната.

2.3. Параболични (QW) с различни ширини и дълбочини

Пресметнатите параболични QW с различна ширина от типа $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/Al_{\gamma}Ga_{1-\gamma}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$ са с концентрацията x на Al в бариерите от 0.36 и варира параболично от 0.02 в левия и десен край на ямата до 0.12 в средата на QW, като ширините са 11, 22 и 44 ML (при еднаква дълбочина), раздел 8.1.2.

Пресметнатите параболични QW с различна дълбочина са от типа $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/Al_{\gamma}Ga_{1-\gamma}As/Al_{0.36}Ga_{0.64}As$, където γ варира параболично от 0.02 в левия и десен край на ямата до различни

стойности на y (0.03, 0.06, 0.12) в средата на ямата, при еднаква ширина от 44 монослоя, раздел 8.1.3.

Зависимостта от електричното поле е по-голяма за енергиите на преход (C1-НН1) и (C1-LН1), отколкото за (C2-НН2), наблюдавано както при параболични (QW) с различна ширина, така и при параболични QW с различна дълбочина. И тук, както при правоъгълните QW, се потвърждава, че влиянието на електричното поле е по-силно при по-широките параболични ями, както и при плитките (т.е. с по-високо съдържание на Al). Критичната стойност на полето за прехода (C1-НН1) при параболични QW с ширина 44 ML е около 71kV/cm, при дълбочина на ямата $y = 0.06$. Критичната стойност на полето за същия преход (C1-НН1) при параболични QW с различна дълбочина е по-ниска за по-плитки ями (с по-голяма концентрация y (Al) в средата на ямата). Резултатите в раздел 8.1. покриват планираните задачи No. 3, 6, 7.

2.4. Дифузни квантови ями, раздел 8.2

Квантови ями с дифузия на интерфейсите са изследвани за пръв път с ТВ метод при прилагане на постоянно надлъжно електрично поле от докторантката и съавтори през 1999 г. (публикация No 3 от списъка, цитирана в текста като [27]). Подобни ями експериментално са били вече установени и от други автори [178].

Изследваните в дисертацията QW са с дифузионни дължини (LD) от 0, 10, 20, 50 и 100 Å при полета от -25 до 25 kV/cm със стъпка от 5 kV/cm. Концентрацията на Al на разстояние z от центъра на ямата се определя от y -ние (44) и зависи от концентрациите на Al в ямата и в бариерите преди дифузията, от първоначалната ширина на ямата и от дължината на дифузия L_D .

Изчислени са енергиите на свързаните състояния за електрон (C1); тежка дупка (НН1) и лека дупка (ЛН1), пространствените разпределения за C1 и НН1 и отместванията на Щарк за енергиите на преход E(C1-НН1) и E(C1-ЛН1). Установено е, че колкото е по-голяма дължината на дифузия, толкова е по-силна зависимостта на енергиите C1, НН1 и ЛН1 от силата на електричното поле. Ако полето е отрицателно, промените на енергията с LD са по-силни за електроните, а ако е положително – за дупките. С нарастване на дифузионната дължина се подобряват характеристиките на Щарк-отместването дотолкова, че дори надминават тези за правоъгълни QW. Тези резултати покриват планираните задачи No. 4, 6

2.5. Аналогови и цифрови квантови ями, раздел 8.3

Експерименталните трудности при израстване на аналогови потенциални ями са свързани с недостатъчно прецизния контрол на състава в областта на ямата. Алтернативен подход, наречен приближение на цифровата сплав, заменя аналоговите QW с последователност от ями и бариери с една и съща дълбочина, но с програмирана последователност от ширини. В литературата аналоговите и цифрови QW често се смятат за еквивалентни.

В дисертацията се сравняват тези два подхода за кристално израстване чрез моделиране на примера на (QW) от типа AlAs/Al_xGa_{1-x}As/AlAs при приложено електрично поле, което се прави за първи път. Ширините на аналоговата и цифрова QW са по 36 монослоя (102 Å), а полето се прилага към бариерните зони (от AlAs на 5 монослоя от краищата на ямите. Използваните за числените пресмятания полета са от -200 до +200 kV/cm със стъпка 5 kV/cm. Резултатите за двете ями са сравнени помежду им, както и с правоъгълна (QW) AlAs/GaAs/AlAs със същата ширина. Изчислените в дисертацията стойности за отместванията на Щарк за прехода E(C1-НН1) в аналогови, цифрови и правоъгълни ями (Табл. 5) са сравнени с намерени експериментални или изчислени стойности от други автори. Установено е качествено съответствие с тях. Макар и малки, съществуват разлики в отместванията на Щарк при двата типа QW. С нарастване на електричното поле нараства и отместването на Щарк за енергиите на основните преходи E(C1-НН1) и E(C1-ЛН1). Ефектът е по-ясно изразен за цифровите, отколкото за аналоговите QW при всички изследвани

полета. При високи полета този ефект все пак е по-слаб, отколкото при правоъгълната QW. Тези резултати покриват планираните задачи No. 5, 6, 7.

Връзката между SE - QW и в частност създаването и оптимизиране на прибори с наземно и космическо приложение са отразени не само в литературна справка по темата представена в Общата част, раздел 1.4, но и в цялостната работа. Споменатите на няколко места в Специалната част (раздели 7 и 8) примерни приложения на изследваните QW, дават потенциал за генериране на нови концепции и базирани на тях устройства в обозримо бъдеще. Получените в дисертацията резултати имат не само фундаментален, но определено и научно-приложен характер.

4. Критични бележки и препоръки

Въпреки изискванията на повечето рецензенти използваните съкращения да са на български, това не винаги е адекватно-възможно и в общи линии затруднява плавния прочит на дисертацията. Пример – ПарКЯ, ОЩ, КЖ, ДКЯ и т.н.

5. Заключение

Дисертационният труд представя сериозна студия базираща се на изчисления и произтичащите от тях важни приноси в областта на нанокompозитни материали с постоянен и променлив химичен състав и базираните на тях полупроводникови устройства с различна форма на потенциална яма, зонна структура и концентрация на носителите. От представените в дисертацията приноси, първият има методологичен характер, следващите три – научен, а последният пети е с научно-приложен характер. Целите и произтичащите от тях задачи са изпълнени с изключителен професионализъм.

Накратко, дисертационния материал и включените научни статии и доклади на международни конференции оформят стегната монографична студия описваща и предсказваща свойствата на потенциални ями приложени за различни устройства с различни параметри. Теоретичното моделиране базирано на Щарк ефекта задава номиналните параметри на постоянното приложено електрично поле и влиянието му върху електронните и оптични спектри на тези устройства. Научната продукция на авторката е отразена в *Scopus* (ID: 6507273382) с 12 документа цитирани общо 19 пъти, като работа в „Surface Science“ от 1999 има 10 цитирания, а работа публикувана в „Superlattices and Microstructures“ от същата година има 6 цитирания. В „ResearchGate“ намираме 10 публикации, 20 цитирания и 382-ма читатели. Въпросните научни форуми и международни бази данни са солиден критерий за научния интерес, отзвук и качество на тематиката и публикуваните материали. За съжаление, някои локални публикации и тези на повечето международни конференции не са отразени в тези бази-данни.

Представените изследвания и получените важни резултати в една модерна и същевременно класическа област на физиката, както и добрия отзвук в световната литература ми дават пълно основание да считам, че кандидата отговаря и преизпълнява изискванията на ЗРАС в Република България, както и на Правилника за неговото приложение и този на ИКИТ на БАН. **На тази база, убедително предлагам, на Уважаемото Научно жури да бъде присъдена образователната и научна степен доктор на гл. ас. Аделина Митева.**

Дата 23.04.2019 г.

Рецензент:

/m/
/К. Григоров/

