



## Рецензия

върху дисертационен труд за получаване на научната степен „доктор“

**Автор на дисертационния труд:** инж. Гаврил Михайлов Гавrilov, докторант на самостоятелна подготовка в Технически университет (ТУ) - София

**Тема на дисертационния труд:** Приноси относно ХАРАКТЕРИЗИРАНЕ НА ТЪНЪК ДИЕЛЕКТРИЧЕН ИЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СЛОЙ ВЪРХУ СТЪКЛЕНА ПОДЛОЖКА, ОСНОВАНО НА МЕТОДА НА ОБВИВКИТЕ

**Професионално направление:** 5.2 Електротехника, електроника и автоматика

**Научна специалност:** Микроелектроника

**Рецензент:** проф. д-р Дианка Нешева-Славова от ИФТТ-БАН, член на научно жури съгласно заповед на Ректора на ТУ-София ОЖ-5.2-27 от 08.02.2021 г.

### 1. Кратки данни за дисертанта и дисертационния труд

Инж. Гаврил Гаврилов завършва висшето си образование в ТУ София през 1992 г. със специалност „електоинженер“. В периода 2012-2015 г. е назначен като „асистент“, а от 2016 г. досега работи като инженер в ТУ - София. От 01.07.2020 г., инж. Г. Гаврилов е зачислен, като „докторант на самостоятелна подготовка“ към катедра „Микроелектроника“ на Факултета по електронна техника и технологии с научен ръководител доц. дн Дориан Минков. На семинар на Катедрата от 01.02.2021 г., представената от инж. Г. Гаврилов дисертация е насочена към защита.

Представените от инж. Г. Гаврилов документи за защита на дисертационен труд за присъждане на образователната и научна степен „доктор“ са в съответствие с изискванията на чл.26 (1) от Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени (ПУРПНС) в Технически университет – София. Дисертационният труд е в обем от 141 стр. включващи: Заглавна страница, Съдържание (3 стр.), Представяне на Дисертационния труд (4 стр.), Списък на съкращенията (1 стр.), Увод (2 стр.), 7 глави, Списък на публикациите, свързани с дисертацията и разпределението им по вид на научното издание (2 стр.), Списък на използваната литература (139 заглавия, вкл. 6 бр. публикации, свързани с дисертацията) и Списък на приносите. Дисертацията съдържа 41 фигури и 15 таблици. Описаните в Глава 5 резултати, отнасящи се до спектри на отражение на тънък слой, няма да бъдат коментирани в рецензията, тъй като статията, в която са публикувани не е включена в „Списъка на публикациите по дисертационния труд“.

## **2. Актуалност на разработения в дисертационния труд проблем**

Много съвременни електронни, оптоелектронни и оптични устройства (светодиоди и лазерни диоди, различни видове филтри и огледала, тъкослойни транзистори, електронни памети и др.) включват тънки слоеве с различен състав, структура и свойства. Това изисква наличие на методи за точното им характеризиране, включително алгоритми за бързо компютърно прилагане на тези методи. Несъмнено, оптичното характеризиране на тънки слоеве върху светопропускащи подложки чрез измерване на един спектър на пропускане е изключително привлекателен и много често използван подход за определяне на оптичните константи и дебелините на слоевете. То е неразрушително и относително просто за експериментална реализация, а позволява добра точност. Резултатите в дисертацията са актуални и важни, защото позволяват постигане на висока точността при използване на този подход.

## **3. Степен на познаване състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал**

В Глава 1 на дисертацията е направен много добър преглед на състоянието на оптичните изследвания при диелектрични и полупроводникови тънки слоеве. Накратко са представени дисперсионните модели, дефинирани са основни понятия. Разгледано е прилагането на метода на обвивките (МО) и графичния метод на обвивките (ГМО) за характеризиране на равномерен или неравномерен слой върху прозрачна и погъщаща подложка, представено е пресмятане на обвивките на интерференчни спектрите на пропускане и отражение за случая на нормално падане на светлината, направено от други автори и съществуващи компютърни алгоритми. В Глава 2 ясно са посочени проблемите при оптично характеризиране на тънки слоеве с прилагане на различни методи. Отбелязани са предимствата на МО, обърнато е внимание на причините за неточностите при този метод и са посочени пътища за подобряване на точността. Направеният критичен анализ показва, че дисертантът отлично познава състоянието на изследванията в областта.

## **4. Съответствие на избраната методика на изследване с поставената цел и задачи на дисертационния труд**

Приложен е математически апарат, използван от изследователите, работещи в областта и успешно са описани оптичните характеристики на структурата "тънък слой - светопропускаща подложка" за случай на нормално падаща светлина. Получените резултати са използвани в предложените компютърни алгоритми и е постигната висока точност. Публикуването на разултатите и цитирането им от други автори потвърждава, че е избрана методика на изследване, подходяща за постигане на поставената цел.

## 5. Кратка аналитична характеристика на естеството на материала, върху който се градят приносите на дисертационния труд

Тъй като при МО точността при характеризиране на тънък слой силно намалява ако слоят е неравномерен по дебелина, погъща в част от изследваната спектрална област и е отложен върху погъщаща подложка, изследванията са насочени към разработване на алгоритми за точно характеризиране на равномерен и неравномерен тънък слой, като се отчита погъщането в слоя и подложката. Алгоритмите са валидирани и приложени към реални образци. Създадени са софтуерни кодове за изпълнението им. Материалът, който е в основата на приносите в дисертацията е представен в глави 3, 4, 6, 7.

В Глава 3 МО и ГМО са приложени за характеризиране на прозрачен, хомогенен слой от аморфен арсенов сулфид, AsS<sub>2</sub>, върху прозрачна подложка [публикация A5 от списъка на публикациите, на които е основан дисертационния труд]. Двете обшивки на експерименталния спектър на пропускане, показателят на пречупване и дебелината на слоя са пресметнати с използване на съществуващите алгоритми. За оценяване на точността, с която са определени характеристиките на слоя, е пресметнат показател на грешката, използването на който е предложено в публикации [A1 и A6]. Показано е, че в този случай дисперсионните зависимости на показателя на пречупване и коефициентът на погъщане се определят с точност по-добра от 1%. В резултат, координационното число и оптичната забранена зона на този относително малко изследван материал са определени с много добра точност.

В Глава 4 е поставен акцент върху създаване на подобрен алгоритъм за компютърно пресмятане на обшивките на интерференчен спектър на пропускане  $T(\lambda)$  на равномерен и неравномерен тънък слой върху непрозрачна подложка, като се отчитат погъщането в подложката и особеностите на  $T(\lambda)$  в областта на силно погъщане на слоя [A3]. За повишаване на точността при пресмятане на обшивките, в допълнение към 'допирателните точки' на обшивките с  $T(\lambda)$ , се въвежда използване на „гранични“, „допълнителни“ и „спомагателни“ точки и се прилага интерполяция на обшивките чрез участъков кубичен Ермитов полином. Подобреният алгоритъм е валидиран, чрез прилагане към аналитичен модел на тънък слой от a-Si:H и е показано, че двете обшивки на  $T(\lambda)$  са точно пресметнати. Алгоритъмът е приложен и към експериментални спекtri на два слоя от a-Si:H върху погъщаща подложка с много различна дебелина. Заключението е, че прилагането на този алгоритъм позволява по-точно пресмятане на обшивките от съществуващите алгоритми.

За разлика от съществуващите алгоритми, които са за определяне на характеристиките само на равномерен или само на неравномерен слой, подобреният [A2] и усъвършенстваният [A6] алгоритми на МО за  $T(\lambda)$ , описани в Глава 6, може да бъдат

прилагани за характеризиране както на равномерен, така и на неравномерен тънък слой върху непрозрачна или прозрачна подложка. При подобрения алгоритъм повишаване на точността се постига чрез минимизиране на показателите на грешката и точно определяне на вариацията на дебелината на слоя [A2]. Този алгоритъм е приложен към спектри на пропускане на термично изпарени слоеве от  $As_2S_3$  и  $GeS_2$  и слой от  $As_2S_3$ , отложен от газова фаза и е наблюдавано различие в характеристиките на слоевете от  $As_2S_3$ , отложени с различни методи. При усъвършенствания алгоритъм отпада изискването за широка област на квазипрозрачност на слоя, което позволява разграничаване на поглъщането в слоя от неравномерността в дебелината му и точно определяне на неравномерността. Алгоритъмът е валидиран за четири образца с различно поглъщане и неравномерност и е приложен към два слоя от неравномерен a-Si върху стъклена подложка. Сравнението на оптично определената дебелина с дебелината, определена със сканиращ електронен микроскоп показва, че при съществуващия алгоритъм грешката при определяне на средната дебелина на слоя е 25% / 38%, а при усъвършенствания алгоритъм тя е  $< 0,4\%$ .

В Глава 7 са описани резултати по подобряване на съществуващия алгоритъм [A1] и детайлизирано разработване и използване на усъвършенстван алгоритъм на ГМО за  $T(\lambda)$  на тънък слой [A4]. В подобрения алгоритъм се отчита поглъщането в подложката и той е приложим за характеризиране на неравномерен тънък слой върху непрозрачна или прозрачна подложка. Алгоритъмът е приложен към гореописаните слоеве от  $As_2S_3$  и  $GeS_2$  и е показано, че характеризирането им е по-точно в сравнение с прилагане на съществуващия ГМО към  $T(\lambda)$  на равномерен слой и в сравнение с прилагане на МО и ГМО към  $T(\lambda)$  на неравномерен слой. При усъвършенствания алгоритъм е въведено минимизиране на показателя на грешката и е отчетено поглъщането в подложката. Той е приложим за неравномерен/равномерен тънък слой върху непрозрачна или прозрачна подложка. Прилагането на алгоритъма е довело до много по-точно характеризиране на два моделни образца и на два реални образца от аморфен силиций (грешка  $\sim 1\%$ ), единият от които е с много голяма дебелина.

## 6. Характер на приносите

Приносите в дисертационния труд могат да се класифицират както следва:

- Доказване с нови средства на съществени нови страни в съществуващи научни проблеми и теории – всички нови алгоритми, приложими към както към равномерен, така и към неравномерен тънък слой върху непрозрачна или прозрачна подложка;
- Получаване и доказване на нови факти - нови данни за слой от нестехиометричен  $AsS_2$ , данни за влияние на метода на отлагане върху свойствата на слоеве от  $As_2S_3$  и др.

## 7. Преценка на публикациите по дисертационния труд. Използване на резултатите от дисертационния труд.

Списъкът на публикациите по дисертационния труд включва 6 труда. Три от тях са в много престижни научни списания – 2 в квартил Q1 (Journal of Alloys and Compounds, импакт фактор ИФ 4,65 и Measurement Science and Technology (MST), ИФ 2,015) и 1 в Q2 (Thin Solid Films, ИФ 1,86), 1 в международно рецензирано списание без ИФ(WoS)/ИР(Scopus) и 2 публикации в пълен текст в материали на международна конференция. Една от последните две публикации е самостоятелна, в една инж. Гавrilov е първи автор и в две – втори. Работата в MST е спечелила наградата на списанието за 2017 в областта Optical and Laser-based Techniques. Точките от публикациите (48.7) значително надхвърлят минималните изисквания (30 т.) в ПУРПНС на ТУ-София. Отлично впечатление прави значителният брой забелязани независими цитирания на публикациите по дисертационния труд в статии в научни издания, реферирали и индексирани в световноизвестни бази данни (10 цитата) т.е. резултатите от дисертацията са използвани в научната практика. Няма данни те да са използвани в социалната практика и да има икономически ефект от тях.

## 8. Оценка за степента на личното участие на дисертанта в приносите

Не познавам лично инж. Гавrilov, но запознаването ми с публикациите, на които той е автор и съавтор ми дава основание да считам, че той е работил в много тясно сътрудничество с научния си ръководител и има съществено участие в разработването на подобрените и усъвършенстваните алгоритми, представени в дисертационния труд.

## 9. Автореферат

Авторефератът правилно отразява съдържанието на дисертационния труд и е оформлен в съответствие с образца на ТУ - София за изготвяне на авторефератите.

## 10. Мнения, препоръки и бележки

Като цяло дисертационният труд е ясно написан и много добре оформлен, но големият брой въведени абревиатури затруднява четенето му. По мое мнение описаното в принос A1 е дейност, обосноваваща необходимостта от провеждане на оригиналните изследвания, описани в дисертацията и не е научно-приложен принос. Ще спомена и някои грешки и неточности: един и същ параграф присъства над и под фиг. 1.4, формули (1.14) до (1.20) са неправилно изписани, прието е да се казва „кофициент на поглъщане“  $\alpha$ , а не „показател на поглъщане“, използвано е „стопилка“ вместо „разтвор“, има известна непоследователност при цитиране на използваната литература и т.н.

# ФЕТ Т5 - НС1-058

Тъй като определянето на оптичната забранена зона (по Тауц) на слоя от AsS<sub>2</sub> не е добре описано в дисертацията, а „доктор“ е образователна и научна степен, бих искала на защитата инж. Гаврилов да представи накратко как се определя оптичната забранена зона на полупроводников материал с прилагане на Тауц-модела при отчитане на кристалната/аморфна природа на материала и вида на електронните преходи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Считам, че представеният дисертационент труд отговаря на изискванията в ЗРАС РБ, Правилника към него и Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени в ТУ - София. Той съдържа полезни теоретични решения, нови алгоритми и експериментални резултати и представлява значим оригинален принос към възможностите за точно оптично характеризиране на тънък полупроводников или диелектричен слой върху светопропускаща подложка. Оценката ми за дисертационния труд е изцяло положителна. Подкрепям присъждането на образователната и научна степен „доктор“ на инж. Гаврил Михайлов Гаврилов, Професионално направление 5.2 Електротехника, електроника и автоматика, Научна специалност: Микроелектроника.

София, 08.04.2021 г.

Рецензент:

(проф.д-р Дианка Нешева)

/m/

Барто с оригинална

