

# РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд

за придобиване на научна степен „доктор на физическите науки“  
в професионално направление 4.1. Физически науки (Физика на атомите и молекулите)  
по процедура за защита във Физически факултет (ФзФ)  
на Софийски университет „Св. Климент Охридски“ (СУ)

Рецензията е изготвена от: проф. дфн Елена Вадимовна Стойкова, Институт по оптически материали и технологии, Българска Академия на науките в качеството ѝ на член на научното жури съгласно Заповед № РД 20-127 / 22.01.2021 г. на Ректора на Софийския университет.

**Тема на дисертационния труд: “Квантово-оптични аналогии”**

**Автор на дисертационния труд: доц. д-р Андон Ангелов Рангелов**

## I. Общо описание на представените материали

### 1. Данни за представените документи

Кандидатът доц. д-р Андон Рангелов е представил дисертационен труд и Автореферат, а така също и задължителните таблици за Физически ф-т от [Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“](#). Представени са и 6 други документи (автобиография, дипломи за „бакалавър“ и ОНС „доктор“, декларация за авторство, списък с цитирания и справка за изпълнение на минималните изисквания), покриващи постиженията на кандидата.

Представените по защитата документи от кандидата съответстват на изискванията на ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и [Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“](#) (ПУРПНСЗАДСУ).

### 2. Данни за кандидата

Кандидатът за защита доц. д-р Андон Рангелов завършва като бакалавър Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“ през 2002 г с отличен успех. През 2008 г. той успешно защитава дисертация в същия факултет за придобиване на образователната и научна степен „доктор“. От 2009 г. е асистент, а от 2012 г. главен асистент във Физическия факултет на СУ, като през 2015 г. печели конкурс за академичната длъжност „доцент“. Доц. Андон Рангелов работи в областта на квантово-класическите аналогии, кохерентния квантов контрол, поляризационната оптика, нелинейната и вълновата оптика. Осъществява международно сътрудничество в областта на фотоиндуцираните вълноводи с University of Metz and Supélec, Франция, в областта на адиабатните техники с Lawrence Livermore National Laboratory в САЩ и в областта на композитните импулси с Института по приложна физика / Нелинейна оптика на Техническият университет на Дармщат, Германия.

Доц. Андон Рангелов изнася лекции и провежда упражнения по „Квантови преходи“ по магистърска програма, по „Електродинамика“ за студенти от специалността Инженерна физика, както и упражнения по „Квантова механика“ за студенти от специалност Инженерна физика. В момента е съ-ръководител на един докторант и е бил съ-ръководител на един успешно завършил докторант. Бил е ръководител на трима успешно завършили бакалаври по физика.

Доц. Андон Рангелов има 51 публикации, 32 от които са включени в дисертационния труд. Индексът на Хирш на кандидата е 12 с общ брой цитирания 575.

### 3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

#### *Обща характеристика на дисертацията*

Дисертационният труд обобщава изследванията на доц. Андон Рангелов в актуалната област на квантово-класическите аналогии. Изследванията са провеждани с водещото участие на кандидата в рамките на 10 годишен период. Дисертацията се базира на статии в научни списания, публикувани от 2010 до 2019. Целта на дисертацията е да се приложат техниката на композитните импулси и концепцията за адиабатна еволюция от областта на кохерентния квантов контрол на атомни и молекулни процеси за създаване на ширококолентови оптични устройства в поляризационната и нелинейната оптика и при фотоиндуцираните вълноводи. Композитните импулси, използвани от десетилетия в ядрено-магнитния резонанс като ефективен дискретен метод за контрол, намират все по-широко приложение в квантовата оптика и квантовата информация, както и за анализ на други физични системи. Основно тяхно предимство е стабилността им към флуктуации на параметрите на съставлящите ги импулси вследствие на взаимното погасяване на нежеланите ефекти, породени от тези флуктуации. На базата на аналозите с кохерентно възбуждане в система с две състояния в дисертацията са дадени точни аналитични решения за композитни устройства за ахроматично преобразуване на поляризацията на светлина в среда с двулъчепречупване и създаване на високоефективна ширококолентова техника за сумиране на честоти на базата на композитни кристали. В дисертацията се използва математичното описание на **кохерентното възбуждане при стимулиран Раманов адиабатен преход** (с абревиатура на английски STIRAP) в квантовата оптика. Разработените техники за преобразуване притежават присъщите за STIRAP ефективност и стабилност. Изследванията в дисертацията обхващат теоретичен анализ, числено моделиране и експериментално тестване. В резултат се предлагат нови ширококолентови устройства за промяна на оптичната поляризация, ефективни ширококолентови преобразуватели на честота, оптични изолатори и подходи за преобразуване на светлина във вълноводи.

#### *Наукометрични показатели*

Дисертационният труд се базира на 32 публикации в реномирани международни списания като Opt. Commun., JOSA A, Opt. Lett., Phys. Rev. A, Appl. Opt., J. Opt., Photonics. Res., Adv. Chem. Phys., Rev. Mod. Phys., които са от категория Q1 (25 публикации) и Q2 (5 публикации) и са включени в група I в изискванията на Физическия факултет. Две от публикациите са от група III. В 8 от публикациите доц. Рангелов е първи автор и в 16 от публикациите е втори автор, като е с водещ принос в почти всички теоретични публикации, както и в теоретичния анализ на тези с експериментални изследвания. Две от публикациите са самостоятелни. Доц. Рангелов има водещо участие в 17 от публикациите. Забелязани са 151 независими цитирания на резултатите от дисертацията.

По наукометрични показатели дисертационният труд не само отговаря, но и надвишава минималните национални изисквания (по чл. 26, ал. 2 и 3 на ЗРАСРБ) и съответно допълнителните изисквания на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване на научна степен „доктор на физическите науки“ в професионално направление 4.1. Физически науки. В група показатели „В“ кандидатът има 30 публикации от група I, включени в дисертационния труд, при изискване за минимум 14 публикации от група I, като в 17 от публикациите той е с водещо участие при изискван минимум от 9 такива публикации. В група показатели „Д“ кандидатът има 151 независими цитирания в реферирани издания (Web of Science или Scopus) при изискване за минимум 100 цитирания. Научните публикации в дисертацията не повтарят такива от предишни процедури за придобиване на научно звание и академична длъжност.

Няма доказано по законоустановения ред плагиатство в представените дисертационен труд и Автореферата, базираци се изцяло върху публикации в реномирани списания, които осигуряват проверка за подобие и рецензиране с повече от един рецензент.

#### 4. Съдържателен анализ на научните и научно-приложните постижения на кандидата, съдържащи се в материалите за участие в конкурса

Основният научен и научно-приложен принос на настоящата дисертация е създаването на нови оптични елементи с помощта на подходи и техники от кохерентния квантов контрол. Дисертацията се състои от 6 глави, всяка от които е посветена на разработване и теоретичен анализ на определен тип оптични елементи. Първите три глави, които са значително по кратки от останалите, са посветени на използването на квантови аналогии в поляризационната оптика. В последните три глави, които са по-големи по обем, квантовите аналогии се използват за решаване на задачи в нелинейната оптика и за пренос на светлина. Във всяка глава приносните резултати могат да се класифицират като създаване на теории и хипотези, разработване на нови методи и получаване на нови факти. Казано обобщено, създадено е теоретично описание на композитни закъснителни пластини в поляризационната оптика, на процеса на сумиране/изваждане на честоти в анизотропна среда с квадратична нелинейност и на пренос на светлина във фотоиндуцирани вълноводи чрез използване на подходи като техника на композитните импулси и концепцията за адиабатна еволюция в кохерентния квантов контрол. Създадените теории обогатяват познанията в класическата оптика. Разработени са нови методи за конструиране на ширококоленови композитни оптични елементи в поляризационната и нелинейната оптика, които се характеризират с висока ефективност и надежност по отношение на вариации на параметрите на елементите в композицията и промени в околната среда. Тези приноси в дисертацията имат голяма приложна стойност. Съществен принос са и получените теоретично и експериментално нови факти за поведението на важни за практиката оптични елементи в поляризационната и нелинейната оптика, позволяващи оптимизиране на техните параметри. За да се изтъкнат по-добре конкретните приноси в теоретичното и експериментално разработване на нови оптични елементи в няколко различни области, по-долу са анализирани приносите в описаните в дисертацията 6 изследователски направления.

В поляризационната оптика е предложен метод за създаване на вълнови пластини с определена фазова задръжка, чието оптично действие е стабилно по отношение на факторите, които я променят (**Глава 1**). Пластините не се влияят от неточности във въртящата мощност и дебелината и могат да работят в широк спектрален диапазон. Предложени са композитни вълнови пластини чрез комбиниране на няколко завъртяни на точно определени ъгли стандартни пластини с различни фазови задръжки. Получени са точни решения за ъглите на завъртане с използване на аналогията с композитните импулси. Предложени са и са тествани експериментално нови полу-вълнови и четвърт-вълнови композитни поляризационни пластини, съставени от поредица стандартни пластини от този вид с еднаква дебелина, и е постигната работа в ултраширока честотна лента. Предложените устройства превъзхождат закъснителните пластини от няколко двулъчепречупващи материала. Предложено е усъвършенстване чрез поставяне на огледало в края на поредицата от стандартни пластини. Предложени са ахроматични устройства за промяна на кръгова поляризация чрез комбиниране на традиционни полу-вълнови пластини, завъртяни под определени ъгли по отношение на техните бързи оси. Постигната е добра стабилност по отношение на вариациите на температурата на кристала, честотата на падащото светлинно поле, дължината на кристала и ъгъла на падане. Експерименти с няколко лазерни източника с различни дължини на вълните потвърждават валидността на решенията. Предложен е ширококоленов поляризационен ротатор, изграден от две еднакви ширококоленови композитни полу-вълнови пластини чрез въвеждане на ъгъл на въртене между тях (**Глава 2**). Разработен е метод за конструиране на алтернативен ширококоленов ротатор от четен брой полу-вълнови пластини. С Монте-Карло моделиране са оптимизирани ъглите на въртене и са получени точни аналитични формули за случая с четири полу-вълнови пластини. Експериментално са демонстрирани ъглово управляеми ширококоленови поляризационни ротатори от 2, 4, 6, 8 и 10 пластини, като е налице добро съответствие с теорията. Направен е изводът за увеличаване на честотната лента при

по-голям брой полуълнови пластини. Предложено е честотно независимо управляемо адиабатно въртене и преобразуване на поляризацията на светлината с помощта на оптично анизотропна среда с линейно и кръгово двулъчепречупване (**Глава 3**). Преобразуването се базира на аналогията между уравнението на въртящия момент на движение на вектора на Стокс в среда с нулеви поляризационно-зависими загуби и време-зависимото уравнение на Шрьодингер в приближението на въртяща вълна, описващо кохерентното възбуждане при STIRAP в квантовата оптика. Представени са точни аналитични решения за различни модели за преобразуване на поляризацията в двулъчепречупваща среда. Разработената техника е ефективна и стабилна и е приложима не само за преобразуване на линейна в линейна или на кръгова в линейна поляризация, но и за произволно преобразуване на светлинната поляризация чрез реализирането на т.нар. частичен STIRUP. Предложена е алтернативна схема за частична адиабатна еволюция за вектора на Стокс чрез дискретна промяна на посоката на вектора на двулъчепречупването с помощта на достатъчен брой кристали, всеки завъртян под малък ъгъл. Демонстрирани са експериментално широколентови и свръх-широколентови ротатори на линейна поляризация, съставени от два набора от 10 идентични вълнови пластини. Използвано е приближението на бавно-променяща се амплитуда при разпространението на светлинната вълна и е показана аналогията с време-зависимото уравнение на Шрьодингер в приближението на въртяща вълна за атоми с две нива. Посочени са условията за прилагане на концепцията за адиабатна еволюция.

В нелинейната оптика са предложени подходи за широколентово сумиране/изваждане на честоти при фазов синхронизъм чрез двулъчепречупване и квази фазов синхронизъм с композитни нелинейни кристали (**Глава 4**). Приложена е техниката на универсалните композитни импулси, разработена наскоро с участието на катедрата по теоретична физика на ФзФ, за осъществяване на три-вълнови смесвания в приближението на бавно-променяща се амплитуда. Задачата е решена за напوماщо светлинно поле с амплитуда много по-голяма от амплитудите на другите две полета, което води до аналогия с време-зависимото уравнение на Шрьодингер за атом с две нива. Предложено е заместване на нелинейния кристал с композитен кристал като съвкупност от сегменти с различни локални периоди на модулация. Числените симулации с параметрите на КТР кристал показват широколентово преобразуване. Областта от параметри за висока ефективност се увеличава значително с броя на сегментите. Ефективността на композитните кристали е висока както за линеен режим на работа, когато напوماщото поле превъзхожда другите две полета, така и в нелинеен режим при намаляваща амплитуда на напوماщото поле. Разгледано е смесване на три вълни в среда с квадратична нелинейност и фазов синхронизъм чрез двулъчепречупване с техниката на композитните последователности на Шака и Пайнс с промяна на знака на взаимодействието. Оптичното преобразуване на честотите се реализира с  $N$  кристални домейна с подходящо избрани дебелени и редуващи се положителни и отрицателни взаимодействия. Областта от параметри с висока ефективност на преобразуване силно се разширява за по-дълги композитни кристали. Разработената техника е проверена с числени пресмятания за фероелектрични нелинейни кристали като  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ . Експериментално е демонстрирано ефективно широколентово генериране на втора хармоника за свръх къси импулси чрез композитни нелинейни кристали. Получена е ефективност на преобразуване 50% за импулси с продължителност 100 fs и наноджаули енергия за кристал от 31 сегмента, като е показана устойчива работа при температурни промени в интервал от 90 градуса за 35 nm честотна лента. Постигната е високоефективна генерация на втора хармонична за ултра къси импулси в сравнително къси нелинейни кристали. Възможно е ефективно преобразуване на импулси до 25 fs. Техниката е приложима за непрекъснати и импулсни лазери в линеен и нелинеен режим.

Предложени са широколентови оптични изолатори (**Глава 5**). Първият е оптичен диод с една ахроматична реципрочна четвърт-вълнова пластина и една нериципрочна, поставени между два поляризатора с взаимно перпендикулярни оси. Ахроматичните вълнови пластини

са проектирани с прилагане на концепцията за адиабатната еволюция на вектора на Стокс. Предложена е проста реализация с помощта на влакнеста оптика. Разработена е теорията на ширококоленов оптичен изолатор чрез прилагане на концепцията за композитните импулси в поляризационната оптика. Като елемент на ширококоленов оптичен изолатор теоретично е обоснован ширококоленов Фарадеев ротатор, съставен от стандартни Фарадееви ротатори и ахроматични четвърт-вълнови пластини, завъртяни на предварително определени ъгли. Анализирани са Фарадеев ротатор, реализиран с тербиев галиев гранатен кристал. За увеличаване на честотната лента е предложена система от Фарадеев ротатор с даден ъгъл на въртене между две ахроматични четвърт вълнови пластини, завъртяни под различни ъгли по отношение на бързи им оси. Единичният Фарадеев ротатор се замества с поредица от  $N$  елемента с различни ъгли на въртене. Показано е числено, че за реализирането на ширококоленов в двете посоки композитен ратотар с ъгъл на въртене 45 градуса се изискват не по-малко от 4 елемента, параметрите на които се определят от система нелинейни алгебрични уравнения за 8 ъгъла на въртене. Показано е създаване на ширококоленов изолатор само от три елемента, когато няма изискване за 45 градуса ъгъл на въртене. Анализирани са случаите на използване на стандартни ротатори на Фарадей, както и на нестандартни ъгли на въртане. Направено е експериментално тестване на композитен оптичен изолатор с композитен Фарадеев ротатор от три части, съставени всяка от тях от обикновен Фарадеев ротатор между две ахроматични четвърт вълнови пластини. Композитният оптичен изолатор е с ефективност над 95% в спектралния интервал 700-1000 nm. Предложена е реализация на оптичен диод като нелинеен елемент чрез смесване на три вълни в среда с квадратична нелинейност при силно напompващо поле, слаб сигнал на втората честота и голямо поглъщане за генерираната сума или разлика от честоти, при което задачата става линейна. За работа в сравнително широк спектрален интервал е използвана адиабатна честотна конверсия в апериодично полирани квазифазови кристали. Математичното описание е фотонен аналог на атомна система с две нива, която взаимодейства с външно електрично поле, като възбуденото състояние се разпада извън системата. Предложеният метод е илюстриран чрез сумиране на честоти в калиев титанилфосфат  $\text{KTiOPO}$ .

Разгледан е теоретично преносът на светлина в оптични вълноводи и създаването на ширококоленов светоделител за оптични вълноводи (**Глава 6**) на базата на аналогията с адиабатната еволюция при STIRAP за атоми с две и три нива. Приема се за изпълнено параксиалното приближение в слабо извити вълноводи, за което анализът на еволюцията на светлината е в рамките на теорията на взаимодействие само с най-близките съседи. Анализирани са различни структури. Предложен е тримерен ахроматичен светоделител с един вход и  $N$  вълноводни изхода, свързани с помощта на междинен вълновод. Поради аналогията със STIRAP този светоделител показва стабилна работа при вариации на експерименталните параметри, като големина на взаимодействието, разстоянието между вълноводите и тяхната геометрия. Като оптична структура, позволяваща аналогия със STIRAP, е анализиран плосък вълновод с многоканално разделяне на светлинния сноп. Структурата включва  $N+2$  вълновода с входен вълновод близо до буферен вълновод и следващ масив от  $N$ , равноотдалечени и успоредни вълновода. Проведен е експеримент с фото-индуцирана вълноводна структура с променлива конфигурация за 633 nm и 850 nm за тестване на ахроматичност чрез странично осветяване на фоторефрактивен кристал посредством пространствен светлинен модулатор. Експериментите потвърждават, че адиабатният процес не зависи от дължината на вълната на възбуждане. За нечетен брой вълноводи и контраинтуитивна последователност, в нечетните вълноводи се наблюдава светлина, а в четните интензитетът е незначителен. Изследван е експериментално адиабатният ахроматичен пренос на светлина между множество междинни вълноводи в масив от вълноводи със специална установка за индуциране на вълноводна структура с динамична конфигурация като например квази-едномерни вълноводи с произволно огъване и геометрия. Изследвано е инжектиране на светлината във входен слабо огънат вълновод, който взаимодейства с масив от  $N$  идентични прави вълноводи, а с

последния вълновод в масива е свързан слабо огънат изходен вълновод. Използвано е параксиално приближение и теорията на свързаните модове. Преносът е описан с математичния апарат на многокомпонентен STIRAP при условие, че броят на междинните състояния гарантира адиабатна еволюция. За нечетен брой вълноводи в адиабатен режим светлината се прехвърля от началния към изходния вълновод с много малко светлина в междинните вълноводи. При четен брой вълноводи не се постига оптимален пренос на светлина към изходния вълновод. Демонстриран е адиабатен пренос при 9 междинни вълновода. Разработено е теоретично описание на пренос на светлина във вълноводи, което е аналогично на адиабатно елиминиране от квантовата физика. Подходът е ефективен за нечетен и четен брой вълноводи и за вълноводи с променлива геометрия и разстояние между тях. Разгледана е теоретично система от три диелектрични вълновода в плоска конфигурация, като е доказано адиабатно елиминиране на средния вълновод. Анализът е обобщен за 4 вълновода и е направен изводът, че подходът е приложим за  $N$  вълновода. Направени са симулации с реални параметри за 3 и 6 вълновода. Теоретично и експериментално е показано, че система от три прави вълновода със затихващо свързване демонстрира електромагнитно индуцирана прозрачност чрез подходяща взаимна разстройка на константите на разпространението във вълноводите. По този начин един масив с вълноводи показва свойства аналогични на ефекта на Аутлър-Таунс. Задачата е анализирана за система от два еднакви и един различен вълновод по аналогия с уравнението на Шрьодингер за ламбда система с три нива. Разгледан е пренос на светлина между два съседни вълновода с различни константи на надлъжно разпространение на фундаменталния мод и е показана аналогията със свързана квантова система с две нива.

## **5. Критични бележки и препоръки**

Изложението в дисертацията е на английски език, което според мен е правилно с оглед използването на този труд от по-широка научна аудитория. Дисертацията е оформена като обобщение на резултатите от включените в нея статии, които са систематизирани в представените 6 глави. Изложението е сбито, но прецизно. Стилът на дисертацията е много добър, като същото категорично важи за стила на статиите, върху които е базирана дисертацията. Практически навсякъде в дисертацията са използвани фигурите от самите статии, но някои фигури като например фиг.4.4 и фиг.4.5 са дадени без надпис под тях и без скала, показваща изменението на величините. Номерацията на някои уравнения в текста се различава от действителната им номерация, като например в Глава 1 на стр. 3 се цитира уравнение (5.22), а на стр. 30 уравнение (3.18) е посочено като (4.22). Липсва списък с използваните съкращения. Авторските приноси са формулирани само в автореферата. Редно е тези технически пропуски да се отстранят преди разпространението на дисертацията в електронен вид. Изхождайки от това, че една дисертация за степента „доктор на науките“ е по същество монографичен труд, може само да се съжалява, че авторът не е включил в отделните глави по-обширен систематичен обзор на постигнатото от други автори в областта на изследванията. Отделните тематични части във всяка глава започват с кратко описание на задачата, която се решава в тази част, и свързването на това описание с предходни изследвания в областта би било само от полза. Цитирани са 163 източника, но обикновено в случаите, когато имат непосредствено отношение към описваните резултати. Въпреки липсата на традиционен обзор на литературните данни, добрата литературна осведомест и дълбоките теоретични познания на автора са впечатляващи. Проведените теоретични анализи са на високо равнище, обясненията на резултатите са ясни и логични. Точността и пълнотата на резултатите е също несъмнена. Прави много добро впечатление включването в дисертацията на богат експериментален материал, както и на разнообразни числени експерименти, илюстриращи стабилността и надежността на разработваните оптични елементи.

Основната ми критика в рецензията е насочена към оформянето на автореферата, който по процедурни изисквания е даден на български език. В сравнение с елегантния стил на

статите с участието на кандидата, включително и на двете самостоятелни статии, и на самата дисертация авторефератът е неприемлив като текст. Ще приведа за нагледност две изречения:

- 1.) „Освен това, чрез правилното взаимно детуниране на константите на разпространение във вълноводните, ние демонстрираме, че вълнообразен масив може да показва функционалности, аналогични на Аутлет-Таун ефект [157].“
- 2.) „В параксиалното приближение разпространението на монохроматичен светлинен лъч в този вид структура може да бъде описано в рамките на теорията на свързания режим...“

В посочените примери читателят се пита какво означава „вълнообразен масив“ или „свързан режим“, да оставим настрана изрази като „полето на помпата“ или „За по-големи номера от  $N...$ “. Категорично препоръчвам преработване на автореферата преди електронното му разпространяване. Налице е също така несъответствие между английския и българския вариант на заглавието на дисертацията.

Забелязаните от мен пропуски са лесно отстраними и в никаква степен не омаловажат съществения принос на доц. Андон Рангелов в създаването на модерни подходи за анализ и проектиране на ширококоловни оптични елементи в поляризиционната и нелинейната оптика. Представените резултати са не само значими, но имат и значителна практическа стойност.

Бих искала да задам следните въпроси:

1. Как се обяснява вълнообразното изменение на пропускането на фиг.3.4 и 3.5?
2. Ако теоретичното описание е разработено за приближението на напмпващо поле със значително по-голяма амплитуда от другите две полета при три-вълновото смесване – т.нар. линеен режим, как се преминава теоретично към нелинеен режим?

#### **6. Лични впечатления за кандидата**

Не познавам лично доц. Андон Рангелов.

#### **7. Заключение**

След като се запознах с представените дисертационен труд, Автореферат и другите материали, и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащи се в тях научни и научно-приложни приноси, **потвърждавам**, че научните постижения отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и Правилника за приложението му и съответния Правилник на СУ „Св. Климент Охридски“ **за придобиване на научна степен „доктор на физическите науки“**. В частност кандидатът надвишава минималните национални изисквания в професионалното направление и не е установено плагиатство в представените по конкурса дисертационен труд, Автореферат и научни трудове.

Давам своята **положителна** оценка на дисертационния труд.

## **II. ОБЩО ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Въз основа на гореизложеното, **препоръчвам** на научното жури да присъди **научната степен „доктор на физическите науки“** в професионално направление 4.1. Физически науки на доц. д-р Андон Ангелов Рангелов

20 април 2020 г.

Изготвил рецензията: .....  
(проф. дфн Елена Стойкова)