

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд
за придобиване на научната 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. дфзн Иван Митев Узунов**, Факултет по приложна математика и информатика на Технически Университет - София, в качеството му 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 Ангелов Рангелов** е представил необходимите документи по член 78 от Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“, както и следните задължителни таблици за Физически ф-т: справка за съответствие с минималните национални изисквания и минималните изисквания на ФзФ, списък на забелязаните цитирания на първите 26 статии от дисертацията. Представените по защитата документи от кандидата съответстват на изискванията на ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и ПУРПНС-ЗАДСУ.

2. Данни за кандидата

Доц. д-р Андон Ангелов Рангелов е бакалавър по физика от ФзФ СУ „Св. Климент Охридски“ (2002). Изработил е докторантурата си във Физическия Факултет в периода 2004 -2008. От 2008 до 2012 е асистент, а от 2012 до 2015 е главен асистент във ФзФ. От 2015 е доцент във Физическия Факултет на СУ. Преподавателската дейност на кандидата включва: Квантови преходи (лекции и упражнения за магистърска програма), Електродинамика (лекции и упражнения за студенти от специалността Инженерна физика) и Квантова механика (лекции и упражнения за студенти от специалността Инженерна физика). Основните области в които е работил кандидата са: квантовикласически аналогии, кохерентен квантов контрол и оптика в това число: нелинейна, поляризационна и вълноводна. Прави впечатление доброто припокриване между областите на научни и преподавателски интереси.

3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

Дисертационният труд е посветен на теоретичното и експерименталното изследване на различни оптични устройства: широколентови устройства за промяна на оптичната поляризация (вълнови пластини (глава 1), ротатори (глава 2) и преобразуватели на поляризация (глава 3)); широколентови нелинейни преобразуватели на честота (глава 4); изолатори (глава 5); както и различни схеми за манипулиране на светлина във вълноводи (глава 6). Както се вижда разглеждат се задачи от поляризационната, нелинейната и вълноводната оптика. Всеки един от тези раздели през последните десетилетия претърпя голямо развитие като своеобразен синтез на техните постижения бе реализиран в нелинейната влакнеста оптика. С нелинейната влакнеста оптика са

свързани изключително важни приложения каквито са създаването на влакнесто-оптични комуникационни системи, и анализа на работата на твърдотелни и влакнесто-оптични лазери и усилватели. Други приложения на нелинейната влакнеста оптика включват редица влакнесто-оптични компоненти: влакнести решетки, оптически превключватели, интерферометри и др. От друга страна, развитието на нелинейната влакнеста оптика се превърна в истинска експериментална лаборатория за изследване на известни и новополучени решения за интегрируеми с метода на обратната задача на разсейване, нелинейни частни диференциални уравнения. Нелинейното уравнение на Шрьодингер, уравнението на Гинзбург-Ландау, различни техни пертурбирани варианти, както и системи от такива уравнения се превърнаха в основополагащи математически модели в областта. Забележителен резултат на теоретичните, експерименталните и технологичните изследвания бе формулирането на идеята за използването на оптични солитони за пренасяне на информация. От тази гледна точка, разглежданите задачи в дисертационния труд са много актуални и важни за приложенията. От друга страна, изследването на връзката между идеите на квантовата механика и идеите на вълновата оптика привлича вниманието на физичната общност от времето на създаването на квантовата механика.

Основна специфика на разглежданите оптични задачи в дисертационния труд е пренебрегването на влиянието на дисперсията на груповите скорости. С други думи, разглеждат се непрекъснати електрични полета (независещи от времето) и техните взаимодействия, което води до свеждането на математическите модели до системи от обикновени диференциални уравнения. Основни използвани опростяващи предположения са: приближението за бавно-изменящата се амплитуда, приближението на зададено поле (едно от полетата (например това на напмпващото поле) е много по-силно от останалите), изпълнението на условието за фазов синхронизъм и други.

За тяхното изучаване се прилагат методите на временно-зависимата квантова механика на атоми и молекули изучени и активно използващи се в областта на кохерентния квантов контрол. Между теоретичните методи и техники от тази област използвани в дисертационния труд са: резонансни кохерентни осцилации (осцилации на Раби) (Параграфи 4.1, 4.2 и 4.4); модел на Ландау-Зенер за кохерентно възбуждана квантова система с две нива без и със загуби в населеността) (4.5 and 5.4); адиабатно прехвърляне (3.3 and 4.4); стимулиран Раманов адиабатен преход (СРАП) със свързаните явления разделянето на Аутлет – Таун и електромагнитна индуцирана прозрачност (3.1, 5.1 and 6). Разработки на тези методи и техни приложения са извършени в групата на проф. Н. Витанов. По тези въпроси е работил и д-р Рангелов, като част от получените с негово участие резултати съставляват съдържанието на докторската му дисертация. В този смисъл се наблюдава приемственост и последователност в работата на кандидата.

Принципиално важна особеност на представения дисертационен труд е съдържанията се в него голям обем от експериментални резултати, които се съпоставят с теоретичните предсказания. Получените при проведените експерименти резултати се съгласуват много добре с теоретично предсказаните. Д-р Рангелов е проявил уменията за организиране и успешно провеждане на съвместни научни изследвания с различни научни колективи.

По показател А кандидатът е защитил дисертационен труд за присъждане на ОНС „доктор“ и следователно има 50 точки. По показател В 4 и по показател Г 7 е представил 32 научни публикации от които 24 в списания с Q1, 6 научни публикации в списания с Q2 и 2 научна публикация с SJR. Списанията са най-реномираните във физиката и оптиката като: Phys. Rev. A, Rev. Mod. Phys., J. Opt. Soc. Am., Opt. Lett., Opt. Commun., Appl. Opt., и др. Сумарно по този показател кандидатът получава 740 точки. От тези публикации тези със съществен принос са 17. Кандидатът значително преизпълнява както минималните национални изисквания по категории и показатели, така и допълнителните изисквания на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване на научната степен „доктор на физическите науки“ по професионално направление 4.1 Физически науки.

4. Научните и научно-приложните постижения

На базата на процедура използваща матрицата на Джонс в базиса на ляво-дясната кръгова поляризация са предложени композитни вълнови пластини действащи като пластини на половин и четвърт дължина на вълната приложими в широк спектрален диапазон. Предсказаната ефективност на преобразуване на поляризация на вълновите пластини е експериментално потвърдена за 7 лазерни дължини на вълната между 405 nm и 1550 nm. Предложено е устройство за преобразуване от лява кръгова поляризирана светлина в дясна кръгова поляризирана светлина и обратно) с намалена чувствителност спрямо изменения във фазовото отместване.

Предложена е теория и метод за направата на композитен и широколентов поляризационен ротатор. Получените експериментално зависимости на коефициентите на пропускане от дължината на вълната за ротатори състоящи се от 2,4,6,8,10 вълнови пластини на половин дължина на вълната се съгласуват много добре с теоретичните резултати.

Предложени са техники за контролирано и стабилно преобразуване между линейна поляризирана светлина и кръгово поляризирана светлина както преобразуване от лява кръгово поляризирана светлина в дясна кръгово поляризирана светлина и обратно чрез анизотропна следа. Първата от тези техники се основава на аналогията на модела за еволюция на поляризацията с този на стимулиран Раманов адиабатен преход в квантова система с три нива при контраинтуитивно подредени импулси. Както е известно при тази техника се реализира ефективен и устойчив почти пълен трансфер на населеността. Експерименталната проверка потвърждаваща предсказаните свойства на широколентовия линеен поляризатор е реализирана чрез дискретно адиабатно изменение бързите оси на последователност от 10 двойно-лъчепречупващи кристала. Втората от техниките се базира на аналогията на изведения модел за двете компоненти на интензитета на електричното поле на разпространяваща се плоска вълна през оптично активен линеен кристал с този на бързото адиабатно преминаване в квантова система с две нива, където също се реализира пълен трансфер на населеността.

Предложени са стабилни и ефективни преобразуватели на честоти чрез три-вълнови смесвания в композитни нелинейни кристали с $\chi^{(2)}$. За реализиране на условията за фазов синхронизъм се използват двойно лъчепречупване и квази фазов синхронизъм. Квази фазов синхронизъм се реализира чрез използване на композитен кристал с различен брой сегменти или чрез въвеждане на определена пространствено зависимост на периода на модулация на периодичната структура.

а) В първия случай се контролират дължините на периодите на модулации и въведените като свободни параметри добавки във ефективното фазово отместване на всеки сегмент. Числените пресмятания показват, че в случая на е-е взаимодействие при сумиране на честоти в калиев титанов оксид фосфат кристал с 13 сегмента е постигнато по-висока ефективност и по-голяма широколентовост (до 20nm) на генерирането на сума от честоти в сравнение със стандартно оформена периодична структура.

б) Във втория случай се използват последователности от сегменти с последователно променящ се знак на нелинейността $\chi^{(2)}$. Оптимизират се дебелините на сегментите. Числените пресмятания показват, че в случая на оо-е взаимодействие при сумиране на честоти в литий ниобат, легиран с магнезиев оксид с 6 и 15 сегмента е постигната по-голяма устойчивост и широколентовост на генерирането на сума от честоти в сравнение с обикновен кристал.

с) Експериментално и числено е демонстрирана генерация на втора хармоника за свръх къси (100 fs) импулси чрез композитен дизайн използващ литий ниобат, легиран с магнезиев оксид, включващ последователности от 15 и 31 сегмента с последователно променящ се знак на нелинейността $\chi^{(2)}$. С дизайна от 31 сегмента е установена ефективност на преобразуване до 50% в честотна лента от 35 nm. Демонстрирана е устойчивост на предложената техника спрямо температурни промени в интервал от 90 градуса С. Предложената схема позволява генерация на втора хармонична за свръх-

къси импулси с дължина от 25 fs. Получената честотна лента за генерация на втора хармоника с предложения композитен дизайн е по-голяма от тази със стандартно оформена периодична структура.

д) На базата на аналогия с техниката адиабатно прехвърляне на населеност чрез фазов скок във взаимодействието от квантовата оптика, е предложена техника за сумиране на честотите на два светлинни снопа с Гаусово разпределение на интензитета при оо-е взаимодействие в нелинеен кристал с $\chi^{(2)}$ от литий ниобат, легиран с магнезиев оксид. Двете половини на нелинейния кристал са с различен знак на нелинейността. Числено са изследвани зависимостите на ефективността на преобразуване в чист кристал и в кристал със знаков скок на взаимодействието от интензитета на на-помпващото поле, температурата и честотата на сигналната вълна. Установени са две симетрични области с висока ефективност на преобразуване около условието за фазов синхронизъм в които общата ширина на изменение на температурата и общата честотна ширина на допустимата сигнална честота са характерни за 20 пъти по-къс единичен кристал.

е) На базата на аналогия с техниката адиабатно прехвърляне за квантова система с три нива, е предложена ефективна и приложима в широка честотна област техника за смесване на честоти (както и за генерация на трета хармоника). Тази техника се реализиране на квази фазов синхронизъм чрез зависим от разстоянието период на модулация, водещ до линейно променящи се фазови отмествания. Линейните променящите се фазови отмествания се интерпретират в термините на „интуитивен“ и „контраинтуитивен чирп“ свързани с модела на Ландау-Зенер, който се и използва за записване на условието за адиабатна еволюция. Установено е, че при смесване на честоти „контраинтуитивния чирп“ води до по-пълен трансфер на енергията в крайното поле (с четвъртата честота), както и до по-слабо прехвърляне на енергия в междинното поле (с третата честота).

Предложени са нови широколентови оптични изолатори.

а) Използвайки аналогия с процеса на стимулиран Раманов адиабатен преход е предложен оптичен изолатор състоящ се от два кръстосани поляризатора, стандартна (реципрочна) четвърт вълнова пластина и нерещипрочна четвърт вълнова пластина. В последната пластина изготвена от стандартно силициево влакно легирано с парамагнитни тербиеви (бисмутни) йони (обезпечаващи достатъчно голяма стойност на константата на Вердет), използването на ефекта на Фарадей води до създаване на нерещипрочно кръгово двойно лъчепречупване. Получените числени резултати потвърждават висока стойност на изолацията в прозореца на пропускане на легираното влакно (500-1000 nm).

б) Предложени са композитни изолатори съставени от множество елементи всеки от които включва две четвърт вълнови пластини и ротатор на Фарадей. Представена е процедура за намирането на ъглите на които са завъртени четвърт вълновите пластини обезпечаващи максимално пропускане в посока напред и максимална изолация в посока назад. С увеличаването на броя на елементите се увеличава диапазона на ъглите на въртене на изолатора за които той работи ефективно. В съгласие с теоретичните очаквания експерименталната проверка показва, че композитния оптичен изолатор пропуска с ефективност по-висока (95 %) от тази на един Фарадеев ротатор (90%) за разглеждания спектрален диапазон.

в) На базата на аналогията с поведението на квантова система с две нива е предложен нелинеен оптичен изолатор (нелинеен адиабатичен оптичен диод) действащ чрез процес на смесване на три вълни в нелинейна среда с $\chi^{(2)}$ в аперидично полирани квазифазови кристали. Линейно зависимото от разстоянието ефективно фазово несъответствие може да се интерпретира като „линеен чирп“ и води до точно решимия дисипативния модел на Ландау-Зенер. В едната посока на разпространение на сигнала се реализира фазов синхронизъм и след адиабатната генерация на полето със сумарната честота сигнала се абсорбира. При разпространение на сигнала в обратната посока не се реализира фазов синхронизъм и той преминава без изменение

през кристала. Числените пресмятания използващи кристал от калиев титанилфосфат потвърждават възможността да се получи добра изолация (> 35 dB) върху спектрален участък от 60 nm.

На базата на аналогия със СРАП от квантовата оптика са предложени няколко схеми използващи фотоиндуцирани структури за разделяне и превключване на светлина между различни вълноводи на вълноводни структури. Оптична индукционна техника във фоторефрактивни кристали е приложена за създаване на практически едномерни вълноводи с произволна кривина и геометрия в посоката на разпространение.

а) С помощта на трансформацията на Морис-Шор е предложено разделител на светлина използващ един вход, един междинен вълновод и N изходни вълноводи. Теоретично е анализирано относителното разпределение на сигналите в изходите на вълноводите. В съгласие с теоретичните пресмятания, експериментално е установено (за две различни дължини на вълната 633nm и 850nm), че при $N=5$ вълновода и контраинтуитивна последователност, светлината се разпределя почти равномерно в три вълновода с нечетен номер, докато във вълноводи с четни номера има незначителен светлинен интензитет.

б) Използвайки аналогия с обобщения СРАП от квантовата оптика структура от оптично индуцирани вълноводи е предложена за реализирането на широколентов пренос на светлина. Структурата включва: входен вълновод, N на брой междинни вълноводи и един изходен вълновод. Отношението на амплитудата на светлината на изходния вълновод към тази на входния вълновод е теоретично пресметнато. В съответствие с теоретичните предсказания експериментално е потвърдено (за две различни дължини на вълната: 633nm и 850nm), че за нечетен брой N на междинните вълноводи ($N=5,7,9,11$), при изпълнението на адиабатното условие за СРАП процеса, както и при контраинтуитивно подредени взаимодействия, практически цялата постъпила във входния вълновод светлина се прехвърля в изходния вълновод. Показано е, че увеличаването на броя на междинните вълноводи N може да доведе до нарушаване на условието за адиабатност и следователно до намаляване на ефективността на прехвърлянето на светлина в крайния вълновод.

в) Използвайки идеите за адиабатно елиминирание и последващо бързо адиабатно прехвърляне от квантовата оптика е предложена структура от вълноводи за реализиране на пълен пренос на светлината. Теоретично обосновано е пълното прехвърляне на светлината между крайните вълноводи независимо както от броя (четен или нечетен) на вътрешните вълноводи, така и от контраинтуитивния или интуитивния ред на взаимодействията. Предсказаното прехвърляне на светлината е числено потвърдено с метода на разпространение на вълнов сноп (BPM) и използвайки дискретно преобразование на Фурие (a split-step Fourier method) за структури от $N=3$ и $N=6$ вълновода. За случая на $N=3$ са пресметнати z -зависимостите на величините характеризиращи условията за адиабатно елиминирание както и критерия за адиабатност на процеса. В същия случай е установена устойчивостта на ефективността на прехвърляне на светлината спрямо дължината на вълната в диапазон по-голям от 600 nm.

г) Теоретично е предложена и експериментално е реализирана оптична система съставена от 3 свързани вълновода с която се демонстрира оставането на въведената в първия вълновод светлина („прозрачност“ на вълновода), явление аналогично на електромагнитна индуцирана прозрачност в квантова система с три нива. Въвеждайки подходящо изменение в константата на разпространение на първия вълновод спрямо константата на разпространение в другите два вълновода и пресмятайки спектъра на отношението на светлинното прехвърляне от първия към другите два вълновода като функция на въведеното изменение се получават два пика, аналогични на двата резонанса на ефекта на Аутлет-Таун.

д) Използвайки аналогията с модела за бърз адиабатен процес в квантова система с две нива е предложена и експериментално изследвана структура от два вълновода в която се реализира пълен трансфер на светлината от единия вълновод в другия. В частност, на константата на свързване на вълноводите се съпоставя честотата на Раби, а на разликата в константите на разпространение (детунинг) на двата вълно-

вода, разстройката между честотата на прехода и лазерната честота. Получените експериментални резултати потвърждават теоретичните очаквания. Числено е изследвано изпълнението на условието за адиабатичност на процеса като функция от константата на свързване и детунинга. Получените резултати са приложени за анализ на СРАП в квантова система с две състояния. Установено е, че случая когато детунинга е пространствено предшестваш константата на свързване е еквивалентен на контраинтуитивна последователност в СРАП в квантова система с три състояния. Обратната подредба съответства на интуитивна последователност в същата система. Числено и експериментално е показано е, че и в двата случая интензитета на светлината се разпределя по равно в двата вълновода.

Характерът на представените в дисертацията научни и научно-приложни приноси отнасям към създаване на нови методи, техники, схеми и устройства за описание и анализиране на различни явления в областта на поляризационната, вълноводната и нелинейната оптика. Представените резултати създават възможности за практически приложения. Получените резултати обогатяват съществуващите знания в тези области и добавят ново разбиране на някои техни страни. Считам, че основната идея на д-р Рангелов за установяването на съдържателни аналогии между методите на временно-зависимата квантова механика на атоми и молекули и изброените области на съвременната оптика е много успешно реализирана. Доколкото знам включените в дисертационния труд научни публикации не повтарят такива от предишни процедури за придобиване на научно звание и академична длъжност.

5. Значимост на приносите за науката и практиката

Справката в Scopus показва, че д-р Рангелов има общо 619 цитирания. Повече от 151 от тези цитирания са на статиите включени в дисертационния труд. Според същата справка в Scopus кандидатът има индекс на Хирш $h=11$ (без автоцитирания, включително и такива от съавтори на публикациите). Тези факти показват сериозния интерес на международната научна общност към представените резултати. По съответните показатели се изпълняват както минималните национални изисквания, така и допълнителните изисквания на Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски“ за придобиване на научната степен „доктор на физическите науки“ по професионално направление 4.1 Физически науки (Физика на атомите и молекулите).

6. Критични бележки и препоръки

Дисертацията и автореферата са добре подготвени с внимателно подбрани качествени фигури, подпомагащи разбирането на излагания материал. Авторефератът правилно отразява съдържанието на дисертационния труд. Като слабост в представените материали бих отчел отсъствието на формулирани основни научни постижения както в дисертационния труд, така и в автореферата.

7. Лични впечатления за кандидата

Имам лични впечатления от кандидата датиращи от времето преди той да започне работа по дисертационния си труд. Това са впечатления за един задълбочен и търсец изследовател. Запознаването с резултатите представени в дисертационния труд не само потвърждават моите по-раншни впечатления, но и показват по-нататъшното му успешно изграждане и оформяне като учен физик –теоретик и експериментатор.

8. Заключение

След като се запознах с представените дисертационен труд, Автореферат и другите материали, и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържа-

щи 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 удовлетворява 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, убедено **препоръчвам** на научното жури да присъди **научната степен „доктор на физическите науки“** в професионално направление **4.1 Физически науки (Физика на атомите и молекулите)**, на **доц. д-р Андон Ангелов Рангелов**.

15.04.2021. г.

Изготвил рецензията:

проф. дфзн Иван Митев Узунов